

Науковий збірник



**Центральноукраїнський
науковий вісник
Технічні науки**

**Central Ukrainian Scientific Bulletin
Technical Sciences**

Випуск 13(44)

**Кропивницький
2026**

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

За загальною редакцією М.І. Черновола
Заснований у 1997 році

В и п у с к 13(44)

Кропивницький • 2026

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Under the general editorship of M. Chernovol
Founded in 1997

Issue 13(44)

Kropyvnytskyi • 2026

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, IT-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 16 березня 2026 року № 7.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Михайло ЧЕРНОВІЛ

Редакційна колегія: Віктор АУЛІН, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Сергій ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Олексій СМІРНОВ, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Олександр ДОРЕНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Андрій БАБІЙ, д-р техн. наук, проф.; Ірина БЕРЕЗЮК, канд. техн. наук, доц.; Варума АРІФА, Dr PhD (Niger); Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, проф.; Лариса ВІХРОВА, канд. техн. наук, проф.; Андрій ГАЛКІН, д-р техн. наук, проф.; Володимир ГАМАЛІЙ, д-р ф.-м. наук, проф.; Антон ГАСЕНКО, канд. техн. наук, доц.; Дмитро ГОЛУБ, канд. техн. наук, доц.; Андрій ГРИНЬКІВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Віктор ДАРИЄНКО, канд. техн. наук, доц.; Олександр ДІДИК, канд. техн. наук, доц.; Микола ЗОЦЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Вячеслав ІВАЩУК, д-р техн. наук, доц.; Сергій КАРПУШИН, канд. техн. наук, доц.; Андрій КИРИЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Олександр КОВАЛЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Тетяна КОРЕНЬКОВА, д-р техн. наук, доц.; Олександр КУЗИК, канд. техн. наук, доц.; Василь МАТЕЙЧИК, д-р техн. наук, проф.; Анатолій МАЦУЙ, д-р техн. наук, проф.; Єлизавета МЕЛЕШКО, д-р техн. наук, проф.; Сергій ОСАДЧИЙ, д-р техн. наук, проф.; Віктор ПАШИНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; Микола ПАШИНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.; Петро ПЛІШКОВ, канд. техн. наук, проф.; Олександр РОССОЛОВ, д-р техн. наук, доц.; Сергій РУБАН, канд. техн. наук, доц.; Василь САЛЮ, д-р техн. наук, проф.; Сергій СМІРНОВ, канд. техн. наук, доц.; Михайло СТОРЧАК, д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Людмила ТАРАНДУШКА, д-р техн. наук, проф.; Дмитро УГРИН, д-р техн. наук, проф.; Геннадій ФІЛІМОНІХІН, д-р техн. наук, проф.; Ігор ШЕПЕЛЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Володимир ЯЦУН, д-р техн. наук, доц.

Експерти – літературні редактори: Валерій МИЦЕНКО, канд. пед. наук, доц. (англійська мова); Тетяна БАБИЧ, канд. філол. наук, доц. (українська мова).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8, Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «*Україніка наукова*» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Ідентифікатор media: R30-03350 (рішення Нацради України з питань ТБ і РМ від 25.04.2024 р. № 1418).

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

ЗМІСТ

Комп'ютерні науки

І. В. Козак, В. А. Висоцька, Л. В. Чирун

Інформаційна технологія квантитативного аналізу україномовного текстового контенту на основі DocBin-структур 11-21

В. О. Качурівський, Г. М. Качурівська, Р. В. Чорба

Об'єктно-орієнтована архітектура інтегральної інформаційної системи моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників 22-32

Д. І. Угрин, О. П. Доренський, Ю. О. Ушенко, О. І. Бреславський

Методи та моделі інтелектуального комп'ютерного зору для ідентифікації та оцінки функціонального стану людини в умовах обмеженої видимості 33-40

Комп'ютерна інженерія

А. О. Головатюк, Б. О. Савенко

Гібридна система виявлення поліморфного програмного забезпечення ботнетів на основі аналізу інваріантних ознак 41-51

О. Б. Гуральник, О. С. Савенко

Формалізований метод оцінювання критичності змін Infrastructure as Code у програмно-керованих мережах 52-58

С. М. Лисенко, А. В. Качур, Л. О. Корецька

Метод синтезу резильєнтних архітектур систем віртуальної та доданої реальності 59-72

А. О. Нічепорук, В. Ю. Гурський

Архітектура віддаленої верифікації контейнеризованих застосунків Kubernetes для периферійних пристроїв на базі Raspberry Pi 73-82

П. С. Новіцький, М. В. Степаняк

Комп'ютерне моделювання та параметричний аналіз завадостійкості GNSS-приймачів літальних об'єктів 83-89

С. Р. Соловей, О. В. Барабанов

Експериментальна оцінка послідовностей попередньої обробки електроенцефалографічних сигналів для малоканалних інтерфейсів мозок–комп'ютер реального часу 90-96

Прикладна механіка

С. Г. Карнаух

Аналіз комбінованого застосування клиношарнірного і кривошипно-кругового механізмів 97-107

Г. Б. Філімоніхін, І. І. Філімоніхіна, Л. С. Олійніченко,

Ю. О. Сокальська, Ю. О. Остапчук

Метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта 108-116

Матеріалознавство

Р. Г. Пузир, Р. Р. Козлов

Огляд аналітичних методів аналізу напружено-деформованого стану
заготовки під час роздавання трубних напівфабрикатів 117-127

*М. М. Студент, О. Г. Лук'яненко, Х. Р. Задорожна, С. І. Маркович,
В. М. Гвоздецький, О. З. Студент*

Структура та зносостійкість дуплексних нітридних покриттів
на титановому сплаві ВТ9..... 128-133

О. В. Швидкий

Енергоефективний спосіб при збагаченні залізистих кварцитів 134-139

Галузеве машинобудування

Е. Б. Алієв, О. А. Черній

Експериментальні дослідження спірального віброживильника
для дозування поодинокого насіння соняшнику 140-150

І. М. Бажан, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський

Оцінка ефективності роботи решіт зерноочисних машин
із зигзагоподібним розташуванням отворів 151-166

Б. Г. Вовнянко

Дослідження руху насінини в системі подачі посівної секції сошника сівалки 167-180

В. З. Гудь, А. Д. Довбуш, А. О. Брикса, А. Г. Никитюк, В. М. Бучинський

Розроблення гвинтових робочих органів змішувачів 181-192

А. Є. Дячун, В. Ю. Грасовник

Дослідження операції навивання стрічкових гвинтових робочих органів 193-201

О. М. Іванов, Т. Г. Лапенко, В. О. Крохмаль

Параметрично-критеріальна модель процесу садіння коренеплодів
у карусельній машині 202-211

О. М. Кобець, Є. І. Лепеть

Лабораторні дослідження зміни коефіцієнта варіації поперечного розподілу
рідини дефлекторним розбризкувачем при внесенні агрохімікатів 212-218

П. Г. Лузан, В. В. Аулін, О. Р. Лузан

Теоретичне обґрунтування конструкції механізму регулювання робочої глибини
сошника посівної секції сівалки..... 219-229

О. О. Матвієнко, А. В. Гриньків, О. М. Лівіцький

Методика вибору робастних моделей вібродіагностики за доменного
зсуву та шуму міток..... 230-240

А. В. Новицький, В. І. Мельник, В. О. Лісецький, Ю. А. Новицький
Управління ресурсом фільтрів очищення оливи в логістичних системах
технічного обслуговування ДВЗ.....241-249

Д. І. Петренко, В. М. Сало, Д. С. Недельський
Аналіз ефективності роботи каскадного решітного сепаратора зернових сумішей.....250-260

*С. П. Степаненко, Б. І. Котов, А. Я. Кузьмич, В. А. Мельник,
Р. Б. Кудринський, І. С. Попадюк*
Дослідження процесу сепарації зерна на конічній перфорованій поверхні 261-272

В. М. Чумак, Є. В. Манько, С. В. Лисенко
Моделювання та оптимізація комбінованих методів поверхневого зміцнення
деталей машин на основі нейронних мереж і генетичних алгоритмів.....273-285

В. М. Зубко, О.В. Тесленко
Залежність питомого опору агромашини від твердості ґрунту 286-300

Будівництво та цивільна інженерія

М. В. Гаркуша, О. О. Давиденко
Розроблення рекомендацій із застосування бітумно-полімерної стикувальної
стрічки в транспортному будівництві.....301-313

В. А. Пашинський, А. А. Тихий, М. В. Пашинський, Н. М. Мутель
Аналіз результатів геодезичного контролю положення в плані колій мостових кранів у
цеху машинобудівного заводу 314-321

Автомобільний транспорт

Ів. Б. Гевко, М. Я. Сташків, Т. А. Довбуш, М. Г. Левкович, І. Б. Гевко
Проектування трансформаційних контейнерів з метою ефективного
перевезення габаритних вантажів автотранспортними засобами.....322-333

Д. В. Голуб, О. Ю. Ювженко, Р. П. Кічура
Визначення інтенсивності зміни показників ефективності експлуатації
вантажних автомобілів різних марок залежно від напрацювання в умовах
агропромислового виробництва 334-347

В. В. Драгобецький, А. А. Черниш, Д. В. Молоштан
Підвищення експлуатаційної надійності та захищеності екіпажу спеціального
бронеавтомобілю для розмінувальних команд.....348-360

Є. Д. Ладигенський, П. В. Петленко, В. Г. Байцан, С. Г. Ковальов-
Теоретико-методологічні засади впровадження інтелектуальних технологій
у систему технічного сервісу колісних транспортних засобів 361-373

Р. І. Розум, А. І. Папінко, В. А. Бойко
Методика вибору напівпричепа.....374-381

Транспортні технології (за видами)

К. В. Доля

Моделювання та прогнозування потоків пасажирів у мультимодальних маршрутних системах з урахуванням пересадок і надійності розкладів 382-389

В. Г. Загорянський, К. О. Грищенко

Моделювання параметрів складського комплексу переробного підприємства (на прикладі технічного переоснащення ПрАТ «Данон Кремез») 390-398

А. В. Йовченко

Lean & Green підходи в удосконаленні логістики транспортних підприємств..... 399-407

С. В. Козак

Дослідження операцій в транспортних системах міського пасажирського транспорту..... 408-413

Д. О. Кульова, М. В. Бойко, Д. П. Косякевич

Оцінювання факторів ризику та удосконалення технології перевезення температурно чутливих вантажів у рефрижераторних контейнерах 414-423

Ю. І. Мельнікова

Аналіз впливу параметрів на ефективність застосування генетичного алгоритму при вирішенні задачі синхронізації руху громадського транспорту 424-432

Д. О. Музильов, Є. О. Уколов

Модель оцінки питомих витрат доставки агропродукції до порту відправлення 433-441

О. В. Павленко, А. Г. Бойко

Оцінка ефективності функціонування транспортно-експедиторської компанії при виборі раціональної моделі автомобіля..... 442-450

Н. О. Потаман, Х. Ашраф, О. М. Орда

Адаптація Європейського досвіду нарахування компенсацій перевізникам у міському громадському транспорті в Україні 451-461

Н. Р. Рожко, О. Л. Ляшук, Ю. О. Вовк, У. М. Плекан, О. П. Цьонь

Інтеграція стандартизованої складської логістики в Україні в умовах структурного і когнітивного розвитку 462-472

Інформація про авторів..... 473

CONTENT

Computer Science

<i>Ivan Kozak, Victoria Vysotska, Lyubomyr Chyrun</i> Information Technology for Quantitative Analysis of Ukrainian-Language Textual Content Based on DocBin Structures	11-21
<i>Volodymyr Kachurivskyi, Hanna Kachurivska, Radim Chorba</i> Object-Oriented Architecture of an Integrated Information System for Monitoring the Professional Activities of Research and Pedagogical Staff	22-32
<i>Dmytro Uhryn, Oleksandr Dorenskyi, Yurii Ushenko, Oleh Breslavskyi</i> Methods and Models of Intelligent Computer Vision for Identifying and Assessing a Person's Functional State in Conditions of Limited Visibility	33-40

Computer Engineering

<i>Andrii Holovatiuk, Bohdan Savenko</i> Hybrid Detection System for Polymorphic Botnet Software Based on Invariant Features Analysis	41-51
<i>Oleksandr Huralnyk, Oleg Savenko</i> A Formalized Method for Assessing the Criticality of Infrastructure as Code Changes in Software-defined Networks	52-58
<i>Sergii Lysenko, Artem Kachur, Liudmyla Koretska</i> Method for Synthesising Resilient Architectures of Virtual and Augmented Reality Systems	59-72
<i>Andrii Nicheporuk, Vadym Hurskyi</i> Architecture of Remote Verification of Kubernetes Containerized Applications for Edge Devices Based on Raspberry Pi	73-82
<i>Pavlo Novitskyi, Mykhailo Stepanyak</i> Computer Modeling and Parametric Analysis of GNSS Receiver Jamming Resilience for Aerial Vehicles	83-89
<i>Serhii Solovey, Oleksandr Barabanov</i> Experimental Evaluation of EEG Preprocessing Pipelines for Low-Channel Real-Time Brain-Computer Interfaces	90-96

Applied Mechanics

<i>Serhii Karnaukh</i> Analysis of the Combined Application of Wedge-Joint and Crank-Circular Mechanisms	97-107

*Gennady Filimonikhin, Irina Filimonikhina, Lyubov Olijnichenko,
Yulia Sokalska, Yulia Ostapchuk*

Four-run Test Methods for Determining the Mass and Aerohydrodynamic
Imbalance of a Propeller 108-116

Material Science

Ruslan Puzyr, Rostyslav Kozlov

A Review of Analytical Methods for Evaluating the Stress-strain State of
Workpieces During the Processing of Semi-finished Pipe Products 117-127

*Mykhailo Student, Alexander Luk'yanenko, Khrystina Zadorozhna,
Volodymyr Hvozdet'skyi, Oleksandra Student, Sergiy Markovych*

Structure and Wear resistance of Duplex Nitride Coatings on VT9 Titanium Alloy 128-133

Oleksandr Shvydkyi

Energy Efficient Method for Concentration of Ferruginous Quartzites 134-139

Industrial Machinery Engineering

Elchyn Aliiev, Olexandr Chernii

Experimental Studies of a Spiral Vibrating Feeder for Dosing Single Sunflower
Seeds 140-150

Ihor Bazhan, Serhii Leshchenko, Oleksii Vasylykovsky

Performance Evaluation of Grain Cleaning Machine Sieves With a Zigzag Hole
Arrangement 151-166

Bohdan Vovnianko

Investigation of Seed Movement Within the Delivery System of a Planter
Sowing Unit Opener 167-180

*Victor Gud, Anatoliy Dovbush, Andriy Bryksa, Andriy Nikityuk,
Volodymyr Buchinsky*

Development of Screw Mixer Working Elements..... 181-192

Andrii Diachun, Vasyl Grasovnyk

The Study of the Winding Operation of Strip Helical Working Elements 193-201

Oleg Ivanov, Taras Lapenko, Vladislav Krokhmal

Parametric–critical Model of the Root Crop Planting Process in a Carousel
Machine 202-211

Oleksandr Kobets, Yevhen Lepet

Laboratory Studies of Changes in the Coefficient of Variation of the Transverse
distribution of Liquid by a Deflector Sprayer When Applying Agrochemicals 212-218

Petro Luzan, Victor Aulin, Olena Luzan

Theoretical Substantiation of the Design of a Working Depth Adjustment
Mechanism for the Opener of a Seeding Unit..... 219-229

<i>Oleksandr Matviienko, Oleksander Livitskyi, Andriy Gryniv</i> Methodology for Selecting Robust Vibration Diagnostics Models Under Domain Shift and Label Noise	230-240
<i>Andriy Novitskyi, Valentyna Melnyk, Vitalii Lisetskyi, Yuri Novitskyi</i> Management of the Resource of Oil Cleaning Filters in Logistics Systems for Internal Combustion Engine Maintenance	241-249
<i>Dmytro Petrenko, Vasyl Salo, Dmytro Nedelsky</i> Efficiency Analysis of a cAscade Sieve Separator for Grain Mixtures.....	250-260
<i>Serhii Stepanenko, Borys Kotov, Alvin Kuzmych, Vitaly Melnyk, Rostyslav Kudrynetskyi</i> Research on the Process of Grain Separation on a Conical Perforated Surface	261-272
<i>Vitalii Chumak, Yehor Manko, Serhii Lysenko</i> Modeling and Optimization of Combined Methods of Surface Hardening of Machine Parts Based on Neural Networks And genetic Algorithms	273-285
<i>Vladyslav Zubko, Olena Teslenko</i> Dependence of Agricultural Machinery Specific Resistance on Soil Hardness	286-300

Construction and Civil Engineering

<i>Mykola Harkusha, Oleksandr Davydenko</i> Development of Recommendations for the Application of Bitumen–Polymer Joint Sealing Tape in Transport Infrastructure Construction.....	301-313
<i>Victor Pashynskyi, Andrii Tykhyi, Mykola Pashynskyi, Nataliia Mutel</i> Analysis of Geodetic Control Results for the Plan Position of Overhead Crane Tracks in a Machine-Building Workshop	314-321

Automobile Transport

<i>Ivan Hevko, Mykola Stashkiv, Taras Dovbush, Mykhailo Levkovich, Igor Hevko</i> Design of Transformation Containers for the Purpose of Efficient Transportation of Oversized Cargo by Motor Vehicles	322-333
<i>Dmytro Holub, Oleksandr Yuvzenko, Ruslan Kichura</i> Determination of the Intensity of Change in the Efficiency Indicators of Operation of Trucks of Different Brands Depending on the Operating time in the Conditions of Agro-Industrial Production.....	334-347
<i>Volodymyr Dragobetskii, Andrii Chernysh, Dmytro Moloshtan</i> Increasing the Operational Reliability and Crew Protection of a Special Armored Vehicle For Demining Teams.....	348-360
<i>Eduard Ladyzhenskyi, Volodymyr Petlenko, Viktor Baitsan, Serhii Kovalov</i> Theoretical and Methodological Principles of Implementing Intelligent Technologies Into the Technical Service System of Wheeled vehicles	361-373

<i>Ruslan Rozum, Andrii Papinko, Volodymyr Boyko</i> Semi-trailer Selection Method.....	374-381

Transport Technologies (by Types)

<i>Kostiantyn Dolia</i> Modeling and Forecasting Passenger Flows in Multimodal Route Systems Taking Into Account Transfers and Schedule Reliability.....	382-389
<i>Volodymyr Zahorianskyi, Karina Grytsenko</i> Modeling the Parameters of a Warehouse Complex of a Processing Enterprise (Using the Example of Technical Re-Equipment of PrJSC "Danone Kremez")	390-398
<i>Alla Yovchenko</i> Lean & Green Approaches to Improving Logistics in traNsport Companies.....	399-407
<i>Svetlana Kozak</i> Operations Research in Urban Passenger Transport Systems.....	408-413
<i>Daria Kulova, Mariia Boyko, Dmytro Kosyakevych</i> Assessment of Risk Factors and Improvement of Transportation Technology for Temperature-Sensitive Cargo in Refrigerated Containers.....	414-423
<i>Yuliia Melnikova</i> Analysis the Impact of Parameters on the Effectiveness genetic Algorithm Application in Solving Synchronizing Public Transport Schedules.....	424-432
<i>Dmitriy Muzylyov, Yevgeniy Ukolov</i> A Model for Cost Assessment of Delivering Agricultural Products to the Departure Port	433-441
<i>Olexiy Pavlenko, Andriy Boyko</i> Assessment Of The Efficiency Of A Freight Forwarding Company When Choosing A Rational Vehicle Model.....	442-450
<i>Natalia Potaman, Ashraf Hamed, Oleksandr Orda</i> Adaptation of European experience in compensation mechanisms for public transport operators in urban public transport in Ukraine	451-461
<i>Nataliya Rozhko, Oleg Lyashuk, Yurii Vovk, Uliana Plekan, Oleg Tson</i> Integration of Standardized Warehouse Logistics in Ukraine Under Conditions of Structural and Cognitive Development.....	462-472
Information about authors	473

І.В. Козак, В. А. Висоцька, доц., д-р техн. наук, **Л.В. Чирун**, канд. техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
e-mail: ivan.v.kozak@lpnu.ua, victoria.a.vysotska@lpnu.ua, lyubomyr.v.chyrun@lpnu.ua

Інформаційна технологія квантитативного аналізу україномовного текстового контенту на основі DocBin-структур

У роботі представлено інформаційну технологію на основі розробки програмної підсистеми квантитативного аналізу українських текстів як компонента інформаційної системи обробки корпусних даних. Реалізовано алгоритми обчислення лексичних і морфологічних індексів (TTR, індекс Гоноре, індекс номінативності, частоти лем і POS) на основі структур DocBin із використанням spaCy та pandas. Проведено експериментальне тестування на корпусі з 7 документів обсягом близько 18 000 токенів. Час опрацювання 1 тис. токенів становив 0,11–6,72 с залежно від обраного NLP-агента. Результати підтвердили лінійну масштабованість, стабільність обчислень та можливість інтеграції підсистеми в захищені програмні середовища для аналітики текстових даних, зокрема в задачах моніторингу інформаційного простору та виявлення аномалій.

обробка природної мови, інформаційна система, аналіз даних, квантитативна лінгвістика, інформаційний моніторинг, корпусна лінгвістика, лексична різноманітність, TTR, індекс Гоноре, індекс номінативності, DocBin, spaCy, автоматизований аналіз тексту, українська мова

Постановка проблеми. Стрімке зростання обсягів текстових даних у цифровому середовищі формує потребу в ефективних засобах їх автоматизованого аналізу, структуризації та інтерпретації. Особливої актуальності це набуває для українськомовного сегмента інформаційного простору, де відсутність достатньо адаптованих інструментів кількісного лінгвістичного аналізу ускладнює проведення повноцінних досліджень і побудову прикладних систем, зокрема для квантитативного аналізу українськомовних текстів. Створення адаптованої підсистеми квантитативного аналізу українських текстів є важливим кроком до формування національно орієнтованих інструментів цифрової лінгвістики та розвитку безпечних інтелектуальних інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз лексичної різноманітності, індексу номінативності та частотних характеристик є ключовими аспектами корпусної лінгвістики, що дозволяють глибше зрозуміти структуру та функціонування мови [1]. Для української мови, яка є морфологічно багатою з одного боку та котра має менше прикладних засобів дослідження у порівнянні з іншими європейськими мовами, розробка та впровадження таких аналітичних інструментів є особливо актуальною.

Лексична різноманітність часто вимірюється за допомогою індексу типів до токенів $TTR=V/N$ (де V – кількість унікальних токенів чи текенів певного типу, N – загальна кількість токенів) та його модифікацій, таких як індекс Гоноре $G=V/\sqrt{N}$. Ці метрики дозволяють оцінити багатство словникового запасу в текстах різних жанрів та стилів. Однак, як зазначають в [2], існуючі інструменти для аналізу лексичної різноманітності здебільшого орієнтовані на англomовні корпуси, що створює труднощі при їх застосуванні до українських текстів. Індекс номінативності, який відображає

співвідношення іменників до інших частин мови в тексті, є важливим показником стилістичних та жанрових особливостей. Наприклад, наукові тексти зазвичай характеризуються високим рівнем номінативності. У роботі [3] підкреслюється необхідність розробки інструментів для автоматизованого обчислення цього індексу в українських текстах, оскільки існуючі рішення не забезпечують достатньої точності та адаптованості до морфологічних особливостей української мови.

Частотний (квантитативний) аналіз є фундаментальним методом у корпусній лінгвістиці, що дозволяє виявити найбільш уживані слова та конструкції в мові. Дослідження [1] демонструє застосування аналізу частот для оцінки ядра словника в українських текстах різних функціональних стилів. Вони використовують рангово-частотний аналіз для екстраполяції розміру словникового запасу, що є цінним підходом для побудови лексичних ресурсів. Крім того, інструмент StyloMetrix, спочатку розроблений для польської мови, був адаптований для української, що дозволяє аналізувати граматичні, стилістичні та синтаксичні патерни в текстах [4]. Цей інструмент використовує різноманітні метрики для класифікації текстів за стилем та жанром, що є корисним для дослідження лексичної різноманітності та інших характеристик [5-9]. Основними викликами при аналізі лексичної різноманітності, індексу номінативності та частотних характеристик в українських текстах є [1-5]:

- Морфологічна складність української мови: багатство флексій та словотворчих засобів ускладнює точну ідентифікацію лем та частин мови.

- Обмеженість існуючих інструментів: більшість доступних інструментів не адаптовані до специфіки української мови або мають обмежену функціональність.

- Відсутність стандартних корпусів: нестача великих, розмічених корпусів української мови ускладнює проведення статистичних аналізів.

Для подолання цих викликів необхідно розробляти нові інструменти, адаптовані до української мови, або модифікувати існуючі з урахуванням її особливостей [10-12]. Застосування формату збереження даних DocBin у SpaCy сприяє ефективному опрацюванню природної мови, в тому числі українськомовною конвенту [6-9].

Постановка завдання. Інформаційна технологія на основі комп'ютерної лінгвістики та Big Data аналізу базується на метриках, що відображають особливості лексики, граматики та стилю/жанру текстового контенту. Для української мови відсутні або обмежені доступні й адаптовані модульні інструменти, які б дозволяли автоматизовано обчислювати такі показники, як лексична різноманітність, індекс номінативності чи найпоширеніші частини мови. Це обмежує можливості дослідників у гуманітарних науках, лінгвістів, укладачів корпусів і розробників освітніх систем. Підсистема, що виконує обчислення таких характеристик на основі попередньо оброблених текстів, є актуальним і необхідним внеском у розвиток лінгвістичних прикладних рішень для української мови. Метою дослідження є розроблення методу для обчислення лексичних та граматичних індексів українських текстів на основі попередньо збережених у DocBin структурованих даних. Для досягнення вищезазначеної мети було поставлено наступні завдання:

1. Реалізувати механізм завантаження та опрацювання документів із DocBin.
2. Побудувати модулі для обчислення лексичної різноманітності.
3. Розрахунок індексу номінативності та визначення частот лем й частин мови.

Об'єкт дослідження – процеси аналізу лінгвальних характеристик текстів. Предмет дослідження – методи та засоби обчислення лексичних та морфологічних індексів (лексичної різноманітності, індексу номінативності, частот лем і частин мови) на основі структурованих лінгвальних даних. Запропоновано адаптацію підсистеми для обчислення лінгвістичних метрик на основі DocBin-структур із фокусом на українськомовні тексти. Отримано вдосконалене представлення мовних характеристик

тексту з урахуванням специфіки української мови. Запропонований підхід дозволяє масштабувати аналіз на інші мови, зберігаючи адаптивність і модульність архітектури.

Виклад основного матеріалу. Основною метою запропонованої інформаційної технології є забезпечення автоматизованого аналізу лінгвальних характеристик текстів (лексична різноманітність, частотні характеристики, індекс номінативності) на основі результатів морфологічної обробки. Це дозволить прикладним, корпусним та іншим лінгвістам отримувати кількісні оцінки мовної структури текстів без потреби в ручному аналізі. Аспекти генеральної мети:

1. Оцінка лексичної різноманітності – обчислення TTR, індексу Гоноре та інших метрик на основі лем.
2. Розрахунок морфологічних індексів, зокрема, індексу номінативності.
3. Частотний аналіз - виявлення найпоширеніших лем і частин мови у тексті.
4. Придатність до інтеграції дані повинні бути збереженими у вигляді, для легкого експорту чи візуалізації в подальшому.
5. Гнучкість метрик – можливість додавання нових індексів (напр. лексична щільність, ентропія).

Генеральна мета деталізується як набір інструментів, які мають покривати кілька площин: лексика, морфологія, частотний аналіз, адаптованість (рис. 1а). Виходячи з того, що функціонування підсистеми доцільне у комплексі з підсистемою попереднього опрацювання і розмітки текстів, варто також розглянути дерево цілей для всієї системи (рис. 1б). Критерії функціонування системи: підтримка обчислення метрик різноманітності, коректна класифікація частин мови для індексу номінативності та незалежність від зовнішнього API (працює офлайн). Альтернативні варіанти реалізації:

1. Власний Python-модуль, який працює з DocBin (вибраний варіант) – повний контроль, гнучкість, можливість адаптації під українську.
2. Інтеграція з існуючими бібліотеками (наприклад, stylo, lexdiv) – потребує адаптації до української мови, орієнтовані на англійську мову.
3. Використання генераторів корпусної статистики на кшталт Sketch Engine – закритість, обмеженість, не дає індексу номінативності чи TTR напряму.
4. Підрахунок вручну або в Excel – тривало, ненадійно, не масштабовано.



Рисунок 1 – Дерево цілей квантитативного/комплексного опрацювання текстів

Джерело: розроблено авторами

Підсистема виконує витяг та аналіз лінгвістичних характеристик тексту (рис. 2а) з файлів DocBin, отриманих від підсистеми попереднього опрацювання та розмітки текстів (загальний вигляд цілісної системи зображено на рис. 2б), зосереджуючись на оцінці стилістичних, морфологічних і частотних особливостей.

1. Завантаження DocBin (система імпортує збережені раніше оброблені документи з формату DocBin).

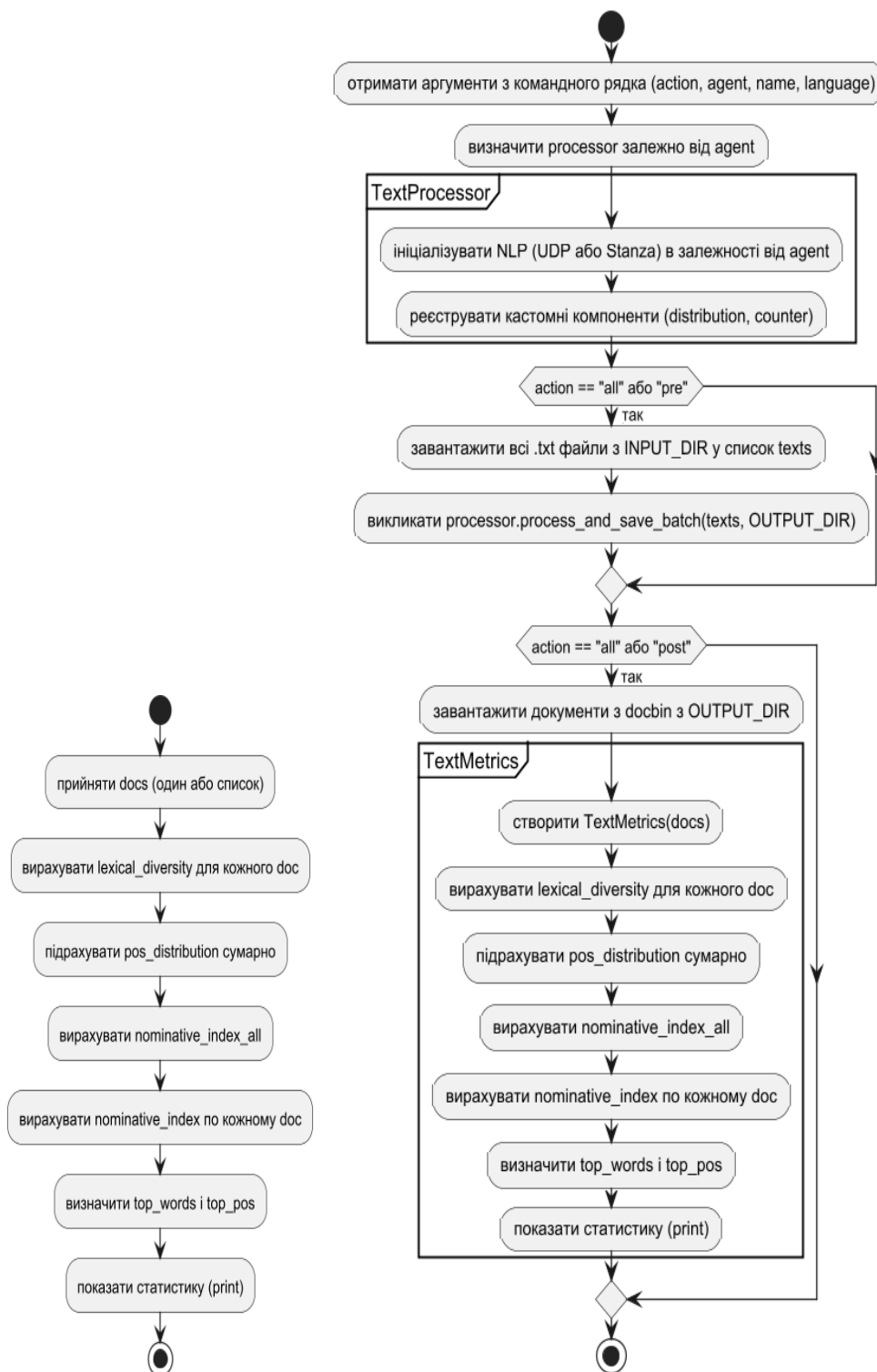


Рисунок 2 – Діаграма активностей для квантитативного опрацювання текстів та повної обробки текстів
Джерело: розроблено авторами

2. Витяг текстових та лінгвістичних атрибутів (для кожного документа отримуємо лемми, POS-теги, частоти токенів).

3. Обчислення TTR (на основі кількості типів і токенів обчислюємо індекс лексичної різноманітності (TTR) й індекс Гоноре).

4. Розрахунок індексу номінативності (рахуємо співвідношення іменників до інших частин мови).

5. Агрегація частот (формуємо список найчастотніших лем і частин мови в кожному документі або у всьому корпусі).

6. Формування звіту/результатів (результати аналізу виводимо у GUI).

У діаграмі прецедентів для підсистеми квантитативного аналізу (рис. 3а) показано, як користувач (дослідник, лінгвіст або викладач) взаємодіє з підсистемою аналізу вже опрацьованих текстів. Основні сценарії включають: завантаження попередньо збереженого DocBin, запуск аналізу лексичної різноманітності (TTR, індекс Гоноре), розрахунок індексу номінативності (на основі POS-розмітки), отримання частот лем та частин мови, формування звіту з результатами аналізу. Ця діаграма демонструє, які саме функції система надає користувачеві для отримання кількісної лінгвальної інформації з розміченого корпусу текстів. Загальна діаграма прецедентів (рис. 4а) ілюструє, як користувач активує й використовує логіку усієї системи. Ця діаграма демонструє, які саме функції система надає користувачеві для отримання кількісної лінгвальної інформації з розміченого корпусу текстів.

Діаграма послідовностей у підсистемі (рис. 3б) моделює етапи виконання квантитативного аналізу одного документа. Вона описує: завантаження документа з DocBin, отримання необхідних атрибутів: лем, токенів, POS-тегів, запуск відповідних обчислювальних модулів (TTR, номінативність, тощо), створення агрегованого об'єкта зі статистикою, збереження / повернення результатів користувачеві. Порядок викликів, залежності між модулями та внутрішня логіка обчислень представлено в контексті часової взаємодії об'єктів загальної системи (рис. 4б).

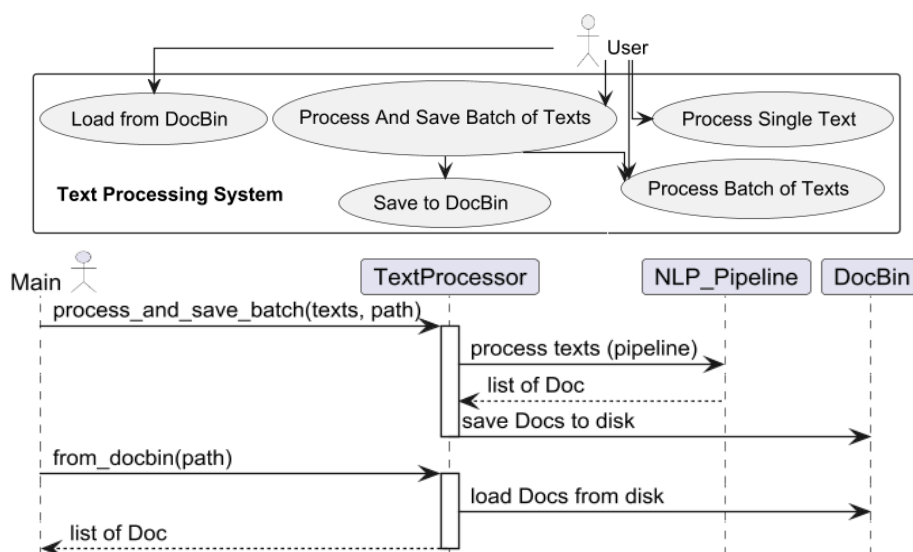


Рисунок 3 – Діаграма прецедентів/послідовностей квантитативного аналізу текстів
Джерело: розроблено авторами

Підсистема виконує розрахунок лінгвальних метрик (TTR, індекс номінативності), визначає найпоширеніші слова й частини мови. Вона слугує інструментом швидкого й надійного отримання квантитативної інформації у лінгвістичних дослідженнях. Застосовується в корпусній стилістиці, жанровому аналізі, типологічних дослідженнях, де важливо мати кількісні характеристики текстів. Також є цінним для освітніх платформ, де автоматизований аналіз дозволяє проводити практичні заняття з корпусної лінгвістики або розробляти словники чи граматики.

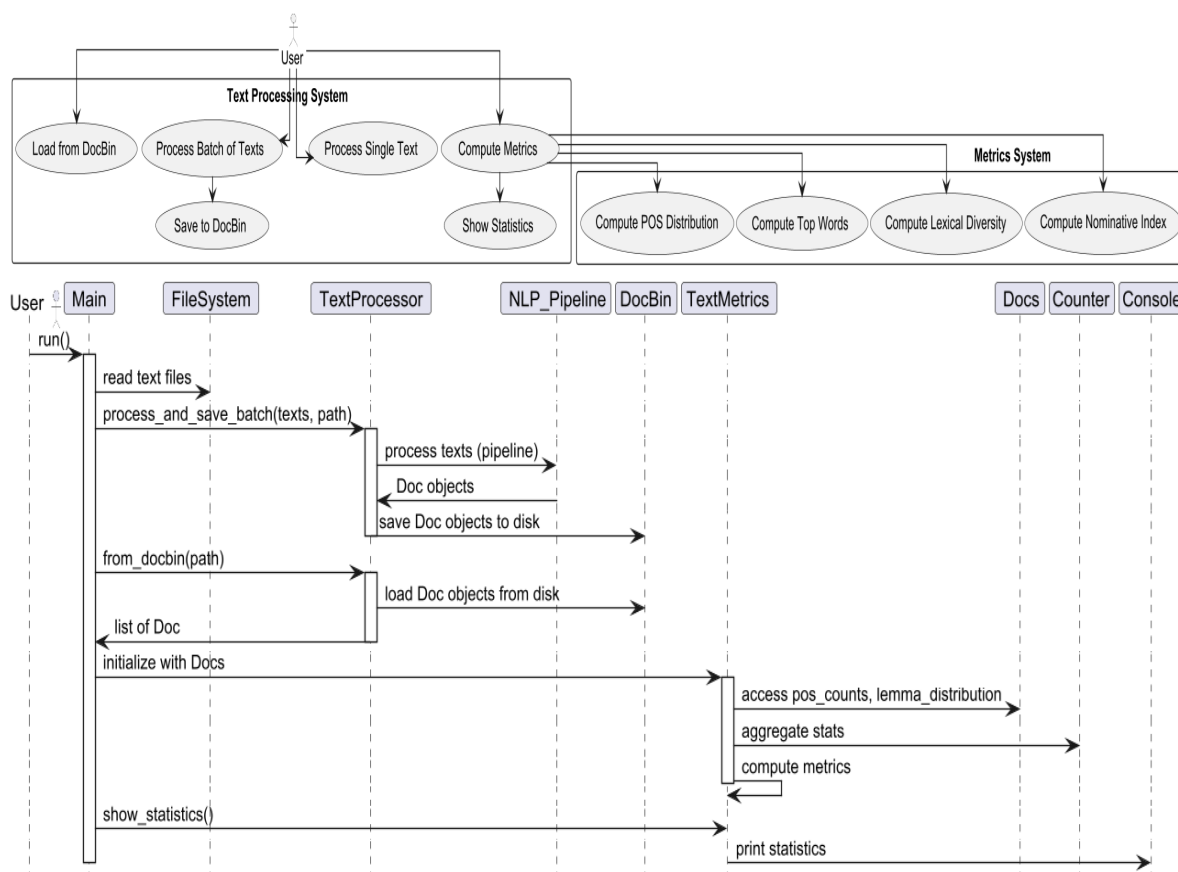


Рисунок 4 – Діаграма прецедентів/послідовностей цілісної системи

Джерело: розроблено авторами

У працях [7-10] відзначено запит на автоматичний аналіз корпусів, оскільки ручний аналіз займає багато часу і створює помилки в розрахунках. Крім того, більшість наявних інструментів не підтримують метрики лексичної різноманітності для української мови та не враховують морфологічної складності мови. Очікувані ефекти: швидке отримання індексів лексичної та морфологічної структури; підвищення об'єктивності аналізу текстів; покращення можливостей верифікації гіпотез у лінгвістичних дослідженнях. Вимоги до системи: підтримка індексів TTR, Гоноре, номінативності; агрегація частот POS і лем; вивід результатів у форматі, придатному для звіту чи візуалізації (DataFrame, CSV). Вхідні дані: DocBin, оброблені попередньою підсистемою. Вихідні: вивід для користувача результатів аналізу. Концептуальна модель: функції (витяг документів, підрахунок індексів, вивід статистики); структура (один клас (TextMetrics) з внутрішніми методами); модель (функціональна обробка документів у циклі з використанням pandas, Counter, та spaCy).

У другій підсистемі, яка відповідає за статистичний аналіз корпусу, основна увага зосереджена на обчисленні таких лінгвістичних метрик, як TTR, індекс Гоноре, індекс номінативності, частотність лем і частин мови. На відміну від першої підсистеми (паралельна підсистема, котра готує розмічені DocBin файли), де логічне виведення покладається на попередньо навчені моделі, тут використовуємо класичні числові алгоритми з відкритими формулами. Знання, на яких ґрунтується аналіз, зафіксовані у вигляді визначених метрик та способів їх обчислення. Наприклад, TTR визначається як відношення кількості унікальних лем до загальної кількості лем у тексті. Ми обрали для реалізації цієї підсистеми наступні бібліотеки як spaCy, collections.Counter та pandas. Підсистема зчитує документи у форматі DocBin, витягує з них лемми й POS-теги,

обчислює статистичні дані (TTR, індекс номінативності, частотні лем), формує зведену статистику, яка може бути використана в подальшому для дослідження стилістики, складності або жанру тексту. Вхідними даними до підсистеми мають бути DocBin-файли, отримані з першої підсистеми. Підсистема має мати доступ до списку об'єктів Doc, словників частот (лем, POS) та датафрейм з результатами аналізу. Вихідні дані – статистичні таблиці (`pandas.DataFrame`), метрики (числові значення). Уся логіка реалізована у класі `TextMetrics` (рис. 5), який інкапсулює дані та аналітичні методи.

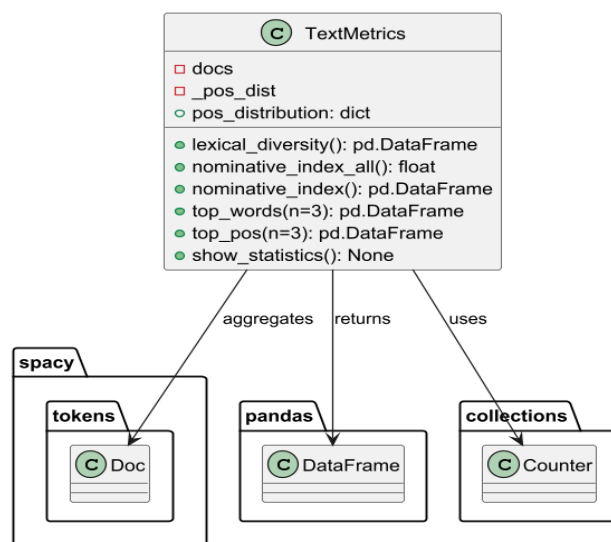


Рисунок 5 – Діаграма класів підсистеми квантитативного аналізу текстів.

Джерело: розроблено авторами

Основні функції (рис. 6):

- `lexical_diversity()` обчислює індекси TTR та Гоноре для кожного документа;
- `nominative_index()` визначає співвідношення іменників у кожному документі;
- `nominative_index_all()` розраховує індекс номінативності для всього корпусу;
- `top_pos(n)` виводить найчастотніші POS-теги;
- `show_statistics()` виводить статистику;
- `top_words(n)` виводить найчастотніші лем.

Підсистеми працюють послідовно, як два етапи одного конвеєру. Перша підсистема: читає текстові файли, проводить обробку, генерує DocBin. Друга підсистема: читає DocBin, аналізує розмічені документи, генерує звіти. Між ними не передається сира текстова інформація, а лише структуровані документи у форматі Doc, що гарантує консистентність лінгвістичних атрибутів (лем, POS, токенів) і дозволяє повторно використовувати корпус для різних цілей (стилометрія, жанровий аналіз, тощо). Ця інструкція користувача призначена для ознайомлення з функціональними можливостями інформаційної системи, розробленої для обробки та аналізу корпусів текстів українською мовою. Система складається з двох основних підсистем: попередньої обробки та статистичного аналізу. Керування програмою виконуємо з командного рядка передаючи параметри через аргументи. Основна команда виклику: `python main.py --action all --name corpora --agent stanza --language uk`. де: `--action (-a)` – визначає, яку частину запустити (`pre` – лише попередню обробку текстів (підсистема 1), `post` – лише аналітичну обробку (підсистема 2), `all` – повний цикл); `--name (-n)` – назва файлу або імені сесії, за яким будуть збережені DocBin і звіти. `--agent` – обробник (`stanza` або `udpipe`); `--language` – мова текстів (за замовчуванням `uk`).

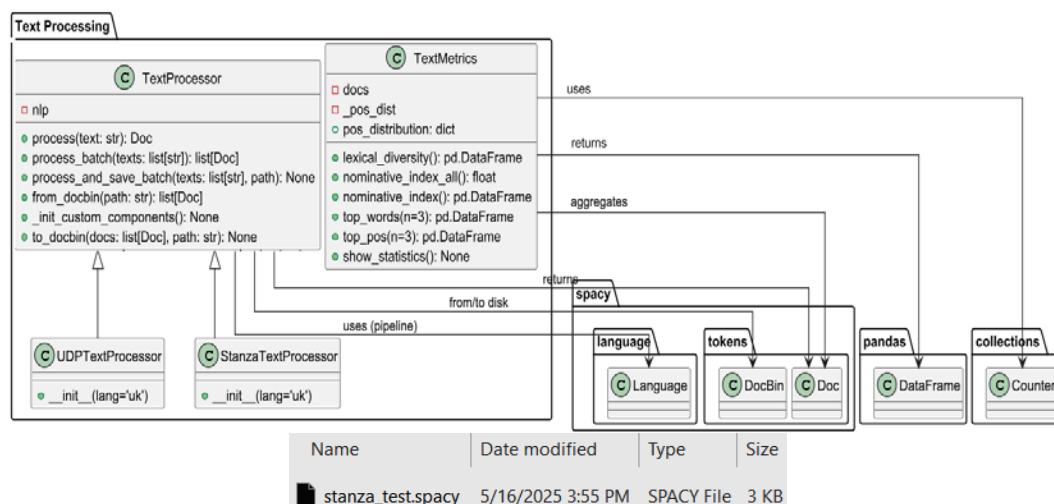


Рисунок 6 – Діаграма класів системи опрацювання текстів та Spacy DocBin файл

Джерело: розроблено авторами

Підсистема квантитативного опрацювання текстів виконує розрахунок індексу лексичної різноманітності (TTR), індексу номінативності, частот лем та частин мови. Використовує .spacy-файл, сформований попередньою підсистемою, з папки ./output/.

Приклад запуску лише аналізу (рис. 7а): `python main.py --action post --name test --agent stanza`. Результати аналізу буде виведено на екран користувача (рис. 7в).

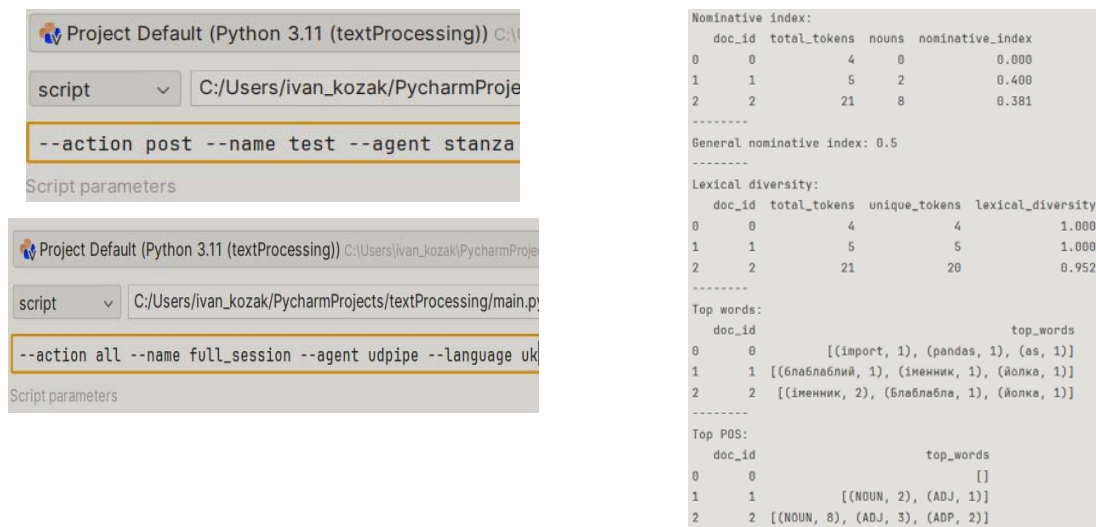


Рисунок 7 – Скріншот PyCharm конфігурації та результати опрацювання текстів

Джерело: розроблено авторами

Повна обробка (обидві підсистеми): `python main.py --action all --name full_session --agent udpipes --language uk`. Цей режим (рис. 7б) виконує повний цикл: від зчитування сирих текстів – до виведення статистичних даних. Системні вимоги: Python ≥ 3.9 , установлені бібліотеки: spacy, spacy-stanza, spacy-udpipes, pandas, argparse та структура проекту: /main.py $\rightarrow$ /definitions.py $\rightarrow$ /parser.py $\rightarrow$ /input/ $\rightarrow$ /output/. Для перевірки роботи підсистеми квантитативної обробки текстів за допомогою агента spacy_stanza було проведено тестування на корпусі з 7 текстових файлів українською мовою загальним обсягом близько 18 000 токенів. Spacy DocBin файли розміщувалися у директорії ./output/. Запуск підсистеми здійснювався командою (рис. 8а): `python main.py --action post --name 18k --agent stanza --language uk`. Після виконання обробки результати аналізу було виведено в термінал користувача (рис. 8б).

--action post --name 18k --agent stanza --language uk				
Nominative index:				
doc_id	total_tokens	nouns	nominative_index	
0	0	4	0	0.000
1	1	5	2	0.400
2	2	21	8	0.381
3	3	1852	325	0.175
4	4	4957	2150	0.434
5	5	9879	2318	0.235
6	6	759	162	0.213

General nominative index: 0.293				

Lexical diversity:				
doc_id	total_tokens	unique_tokens	lexical_diversity	
0	0	4	4	1.000
1	1	5	5	1.000
2	2	21	20	0.952
3	3	1852	687	0.371
4	4	4957	1099	0.222
5	5	9879	2251	0.228
6	6	759	398	0.524

Top words:				
doc_id	top_words			
0	[(import, 1), (pandas, 1), (as, 1)]			
1	[(Блаблабти, 1), (іменник, 1), (йолка, 1)]			
2	[(Блаблабти, 1), (іменник, 1), (йолка, 1)]			
3	[(я, 65), (вона, 60), (і, 56)]			
4	[(текст, 111), (та, 105), (для, 98)]			
5	[(на, 258), (не, 202), (в, 196)]			
6	[(я, 29), (в, 20), (що, 17)]			

Top POS:				
doc_id	top_words			
0	[]			
1	[(NOUN, 2), (VERB, 1), (ADV, 1)]			
2	[(NOUN, 10), (VERB, 3), (ADJ, 3)]			
3	[(NOUN, 336), (VERB, 301), (PRON, 238)]			
4	[(NOUN, 2111), (ADJ, 796), (ADP, 447)]			
5	[(NOUN, 2421), (VERB, 1904), (ADP, 1082)]			
6	[(NOUN, 168), (VERB, 122), (PRON, 87)]			

Рисунок 8 – Результат квантитативного аналізу текстів згенерований на основі stanza/ udppipe
Джерело: розроблено авторами

Аналогічним способом запуск підсистеми для агента udppipe можна здійснити командою (рис. 8в): *python main.py --action post --name 18k --agent udppipe --language uk*. Після виконання обробки результати аналізу було виведено в термінал користувача (рис. 8г). Аналіз часу виконання було виконано для обох агентів на корпусах текстів з прогресивно зростаючою кількістю токенів (1, 3, 8 і 18 тис. токенів) (див. табл. 1). Як видно, час виконання підсистеми аналізу частково залежить від обраного агента, оскільки більшість часу опрацювання файлів за допомогою spacy_stanza займає завантаження та ініціалізація його процесорів.

Таблиця 1 – Час опрацювання текстів підсистемою

Кількість токенів	Кількість документів	Час виконання (сек)		Час опрацювання тисячі токенів (сек)	
		stanza	udppipe	stanza	udppipe
1000	4	6,72	1,31	6,72	1,31
3000	5	7,09	1,53	2,36	0,51
8000	6	6,89	1,46	0,86	0,18
18000	7	8,9	1,97	0,49	0,11

Джерело: розроблено авторами

Водночас час виконання залишається стабільним при різних обсягах даних і лише дещо залежить від кількості опрацьованих файлів корпусу (але не їх розміру), оскільки більшість роботи було виконано на етапі попереднього опрацювання текстів. Це свідчить про універсальність аналітичного модуля.

Висновки. Розроблена інформаційна технологія аналізу лінгвістичних характеристик тексту є ефективним інструментом для автоматичного обчислення ключових лінгвістичних метрик, таких як TTR (Type-Token Ratio), індекс Гоноре, індекс номінативності, а також для визначення частот найпоширеніших лем та частин мови у корпусі текстів. Основною метою цієї підсистеми було створення гнучкого й масштабованого засобу для отримання кількісних характеристик текстів українською мовою, що дозволяє проводити статистичний аналіз корпусів будь-якого розміру. Результати експериментальної апробації сумісність підсистеми із DocBin-структурами. Аналіз результатів показав, що система правильно обробляє дані незалежно від того, який агент (модель) використовувався на етапі попередньої обробки (spacy_stanza чи

спасу_udpipe), а час виконання зростає лінійно зі збільшенням кількості текстів корпусу. Це свідчить про добру масштабованість рішення та підтверджує його практичну придатність для обробки великих обсягів текстів.

Перспективи розвитку ІТ квантитативного аналізу україномовного текстового контенту на основі DocBin-структур пов'язані із збільшенням множини нерозв'язаних задач опрацювання природної мови на основі списку лінгвістичних метрик. В майбутніх дослідженнях ми плануємо доповнити конвеєр квантитативного аналізу україномовного тексту аналізом показників складності тексту та синтаксичних конструкцій, а також виявлення колекції рідковживаних слів. Отже, підсистема аналізу лінгвістичних характеристик тексту є надійним та гнучким інструментом для кількісного аналізу корпусів. Її подальший розвиток дозволить розширити спектр досліджень, зробити аналіз більш глибоким та багатовимірним, а також адаптувати систему до різноманітних дослідницьких завдань у сфері цифрової лінгвістики.

Список літератури

1. Buk S. N., Rovenchak A. A. The Rank-Frequency Analysis for the Functional Style Corpora in the Ukrainian Language. *Journal of Quantitative Linguistics*. 2004. Vol. 11, No. 3. P. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.1080/0929617042000314912>.
2. Козак І., Кунанець Н. Проблеми та виклики при створенні корпусу українських текстів. *Науковий вісник НУЛП*. 2023. № 4. С. 101–108. DOI: <https://doi.org/10.36930/40340213>.
3. Kozak I., Kunanets N. Information systems for working with text corpora: classification and comparative analysis. *Вісник «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка»*. 2024. Вип. 16. С. 273–289. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.273>.
4. Stetsenko D., Okulska I. The Grammar and Syntax Based Corpus Analysis Tool For The Ukrainian Language. *Communication Papers of the 18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems*. 2023. P. 303–311. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13530>.
5. Козак І., Кунанець Н. Information system for text corpora management through the lens of business requirements. *Інформаційні технології: теорія і практика : тези доповідей ІІ (VIII) Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених ІТТІ-2025 (Запоріжжя, 2025)*. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. С. 55–58.
6. Chiarcos C. CoNLL-Merge: Efficient harmonization of concurrent tokenization and textual variation. *Proceedings of the 16th Linguistic Annotation Workshop (LAW-XVI)*. Association for Computational Linguistics, 2021. P. 41–52.
7. Explosion AI. spaCy documentation: DocBin serialization. 2023. URL: <https://spacy.io/api/docbin> (дата звернення: 18.02.2026).
8. Федчук Р., Висоцька В. Інформаційні технології вирішення задачі виправлення помилок в україномовних текстах. *Вісник «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка»*. 2024. Вип. 16. С. 11–34. URL: <https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.011>.
9. Хоптяр А. О., Катуніна О. С., Калініченко Т. М. Використання мовних корпусів у дослідженні усного та письмового перекладу: Аналіз великомасштабних мовних даних. *Вісник науки та освіти. Серія: Філологія*. 2024. № 9(27). С. 500–514. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2024-9\(27\)-500-514](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2024-9(27)-500-514).
10. Anthony L. AntConc (Version 3.4.4) [Computer software]. Waseda University, 2013. URL: <https://www.laurenceanthony.net/software/antconc> (дата звернення: 18.02.2026).
11. Kilgariff A., Baisa V., Bušta J. et al. The Sketch Engine. *Lexicography*. 2014. Vol. 1, № 1. P. 7–36. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40607-014-0009-9>.
12. Straka M., Hajic J., Straková J. UDPipe: Trainable pipeline for processing CoNLL-U files performing tokenization, morphological analysis, POS tagging and parsing. *Proceedings of the 10th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2016)*. European Language Resources Association, 2016. P. 4290–4297.

References

1. Buk, S. N., & Rovenchak, A. A. (2004). The Rank-Frequency Analysis for the Functional Style Corpora in the Ukrainian Language. *Journal of Quantitative Linguistics*, 11(3), 161–171. <https://doi.org/10.1080/0929617042000314912>
2. Kozak, I., & Kunanets, N. (2023). Problems and challenges in creating a corpus of Ukrainian texts. *Naukovyi visnyk NULP*, (4), 101–108 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36930/40340213>
3. Kozak, I., & Kunanets, N. (2024). Information systems for working with text corpora: classification and comparative analysis. *Visnyk «Informatsiini systemy ta merezhi» Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika»*, (2), 273–289. <https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.273>

4. Stetsenko, D., & Okulska, I. (2023). The Grammar and Syntax Based Corpus Analysis Tool For The Ukrainian Language. Communication Papers of the 18th Conference on Computer Science and Intelligence Systems, 303–311. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13530>
5. Kozak, I., & Kunanets, N. (2025). Information system for text corpora management through the lens of business requirements. *Informatsiini tekhnolohii: teoriia i praktyka: materialy II (VIII) Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 55–58). Zaporizhzhia: NU «Zaporizka politekhnika» [in Ukrainian].
6. Chiarcos, C. (2021). CoNLL-Merge: Efficient harmonization of concurrent tokenization and textual variation. *Proceedings of the 16th Linguistic Annotation Workshop (LAW-XVI)* (pp. 41–52). Association for Computational Linguistics.
7. Explosion AI. (2023). spaCy documentation: DocBin serialization. <https://spacy.io/api/docbin>
8. Fedchuk, R., & Vysotska, V. (2024). Information technologies for solving the problem of error correction in Ukrainian-language texts. *Visnyk «Informatsiini systemy ta merezhi» Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*, 16, 11–34 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.011>
9. Khoptyar, A. O., Katunina, O. S., & Kalinichenko, T. M. (2024). The use of language corpora in the study of oral and written translation: Analysis of large-scale language data. *Visnyk nauky ta osvity. Seriya: Filolohiia*, 9(27), 500–514 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2024-9\(27\)-500-514](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2024-9(27)-500-514)
10. Anthony, L. (2013). AntConc (Version 3.4.4) [Computer software]. Waseda University. <https://www.laurenceanthony.net/software/antconc>
11. Kilgariff, A., Baisa, V., Bušta, J., et al. (2014). The Sketch Engine. *Lexicography*, 1(1), 7–36. <https://doi.org/10.1007/s40607-014-0009-9>
12. Straka, M., Hajic, J., & Straková, J. (2016). UDPipe: Trainable pipeline for processing CoNLL-U files performing tokenization, morphological analysis, POS tagging and parsing. *Proceedings of the 10th International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2016)* (pp. 4290–4297). European Language Resources Association.

Ivan Kozak, Victoria Vysotska, Assoc. Prof., Doct. tech. sci., **Lyubomyr Chyrun**, PhD tech. sci.
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Information Technology for Quantitative Analysis of Ukrainian-Language Textual Content Based on DocBin Structures

The purpose of this article is to develop and implement information technology for quantitative text analysis for Ukrainian-language corpora within the framework of a modular information processing system. The study aims to develop algorithmic tools for automatic computation of lexical and morphological indices based on structured linguistic data. Particular attention is paid to ensuring scalability, offline functionality, and compatibility with secure computing environments. The proposed solution is oriented toward applications in computer science, data analytics, and cybersecurity, where reliable and reproducible text metrics are required. The research also seeks to address the lack of adapted quantitative tools for morphologically rich languages such as Ukrainian.

The implemented subsystem operates on preprocessed DocBin structures and performs automated extraction of lemmas, tokens, and part-of-speech tags using spaCy-based pipelines. Algorithms for calculating Type-Token Ratio (TTR), Honore's index, nominative index, and frequency distributions of lemmas and POS tags were developed and integrated into a unified TextMetrics class. The architecture follows a modular design that separates preprocessing and statistical analysis stages, ensuring extensibility and maintainability. Experimental validation was conducted on a corpus of 7 Ukrainian texts with a total volume of approximately 18,000 tokens. Performance evaluation demonstrated stable execution time and linear scalability with respect to corpus size. Processing time per 1,000 tokens ranged from 0.11 to 6.72 seconds depending on the selected NLP agent. The subsystem produces structured statistical outputs in tabular formats suitable for further visualization, reporting, or integration into analytical platforms. The design supports deployment in offline environments, reducing risks related to data leakage and enhancing applicability in protected infrastructures.

The results confirm the correctness, robustness, and scalability of the developed subsystem for quantitative linguistic analysis. The approach enables efficient extraction of measurable textual characteristics and can be integrated into broader information systems for corpus management, anomaly detection, and information monitoring. The proposed solution contributes to the advancement of computational linguistics tools for Ukrainian and supports interdisciplinary applications in computer science and cybersecurity. Future development includes performance optimization for large-scale corpora and extension of the metric set with syntactic and complexity-based indicators.

natural language processing, information system, data analysis, quantitative linguistics, information monitoring, corpus linguistics, lexical diversity, TTR, Honoré index, nominative index, DocBin, spaCy, automated text analysis, Ukrainian language

Одержано (Received) 18.12.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

В.О. Качурівський¹, доц., канд. пед. наук, **Г.М. Качурівська¹**, доц., канд. фіз.-мат. наук, **Р.В. Чорба²**

¹*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м.Бережани, Україна*

²*Національний університет «Одеська політехніка», м.Одеса, Україна*

e-mail: kv.orestovich@gmail.com, anna.kachurivska@gmail.com, radim.chorba@gmail.com

Об'єктно-орієнтована архітектура інтегральної інформаційної системи моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників

У статті представлено архітектуру інформаційної системи моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників на основі об'єктно-орієнтованої моделі яка включає такі компоненти: абстрактний клас та його підкласи які описують події професійної діяльності та забезпечують поліморфізм через абстрактні методи; клас Npp містить множину елементарних подій різних типів; менеджери аналітики, які відповідають за обробку даних, формування звітності, оцінку відповідності Ліцензійним умовам, прогнозування та планування подальшого розвитку; системні класи, що забезпечують взаємодію з базою даних і цифровим сховищем документів. Визначено об'єктно-орієнтовані зв'язки між компонентами: успадкування, агрегація, асоціація і залежність. Запропоновано багаторівневу структуру (N-Tier Architecture), де виділяються рівні бізнес-логіки, сутності та доступу до даних.

цифрова трансформація, заклади вищої освіти, об'єктно-орієнтована модель, моніторинг діяльності, N-Tier архітектура, автоматизація управління

Постановка проблеми. Цифрова трансформація у закладах вищої освіти (ЗВО) потребує перебудови усіх процесів діяльності на основі цифрових даних. Серед усього спектру можливого переходу від паперових документів до цифрових слідів можна виділити такі чотири напрями: *цифровізація освітнього процесу*, яка включає системи керування навчанням (LMS), використання ІІІ для адаптації навчального контенту до потреб конкретного здобувача освіти, віртуальні та доповнені реальності; *трансформацію менеджменту закладом освіти*, а саме, управління та моніторинг основних критеріїв діяльності серед яких є автоматизація кадрового обліку, фінансів, документообігу, процесів збору первинної інформації, зокрема професійної діяльності та виконання ліцензійних умов провадження освітньої діяльності, інтегрування ІоТ для керування інфраструктурою; *цифровізація наукової діяльності* на основі хмарних технологій які надають науковцям потужності для обробки Big Data; *цифрова взаємодія зі студентом* через адміністрування послуг.

Для цифрової трансформації менеджменту закладом освіти та моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників (НПП), як ефективного інструменту управління закладом вищої освіти, необхідно мати архітектуру об'єктно-орієнтованої моделі інформаційної системи, що здатна автоматизовано та структуровано здійснювати задля ефективного контролю за виконанням ліцензійних

умов (ЛІУ). Дана архітектура є частиною одного з найважливіших напрямків – управління на основі даних (Data-Driven Management). Універсальна модель може бути реалізована різноманітними стеками програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку інформаційного суспільства та проблеми впровадження цифрових технологій у вітчизняній освіті і науці визначено у праці Бикова В. Ю. [1]. Науковцями Сущенко Л., Андрющенко О. та Сущенко П. «розкрито й науково обґрунтовано теоретичні засади процесу цифрової трансформації закладів вищої освіти в умовах діджиталізації суспільства» [2]. Авторами Биков В. Ю., Спірін О. М., Пінчук О. П. «розглянуто умови і сучасні тенденції розвитку інформаційного суспільства, а також зумовлені ними ключові проблеми впровадження інформаційно-комунікаційних і цифрових технологій у вітчизняній освіті, що потребують невідкладного вирішення» [3]. Як зазначає Стасюк О. «все більшої актуальності набуває питання підвищення ефективності їхньої діяльності в умовах трансформації освітнього середовища, адже цифровізація висуває нові вимоги до системи управління закладами, зокрема в частині прийняття рішень на основі великих обсягів даних, управління поточними та потенційними змінами, розвитку людського капіталу та забезпечення сталого функціонування освітніх установ.» [4, с.233].

Діяльність закладу вищої освіти (ЗВО) регламентується багаторівневою системою нормативно-правових актів, яка визначає межі автономії закладу, вимоги до якості освітнього процесу та критерії оцінки науково-педагогічної діяльності. Діяльність закладу освіти регламентується вищезгаданими нормами, що зумовлює необхідність автоматизації моніторингу, контролю та перевірки відповідності реальних даних тобто вибудувати власну систему забезпечення якості освіти. Одним із завдань внутрішньої системи забезпечення якості освіти є моніторинг виконання ліцензійних умов провадження освітньої діяльності, зокрема п.38 Постанови Кабінету Міністрів України № 1187 “Про затвердження Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності” [5] та професійного розвитку науково-педагогічних працівників [6].

У праці [7] «висвітлено вирішення науково-технічного завдання розробки інформаційно-аналітичної системи для цифрової трансформації збору, збереження, обліку й аналізу професійного розвитку викладачів закладу вищої освіти в Україні, яка забезпечує автоматизацію формування звітності за визначеними критеріями, прогнозування та планування на перспективу особистої освітньої траєкторії з професійного розвитку».

В наукових джерелах активно ведеться висвітлення інформаційних систем для організації цифрового моніторингу діяльності закладу освіти як внутрішньої системи забезпечення якості освіти. Модель інформаційної системи моніторингу опублікованих тез наукових конференцій висвітлено у праці [8].

Аналіз останніх досліджень та чинної нормативної бази свідчить, що попри наявність окремих рішень для автоматизації збору наукових метрик, існує гостра потреба у створенні цілісної (інтегральної) архітектури для, що зумовлено такими чинниками: багатокомпонентність об’єкта моніторингу, необхідність переходу від звітування до управління, мінімізація суб’єктивізму та бюрократичного навантаження, забезпечення відповідності динамічному законодавству, технологічна інтеграція сервісів.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробленні архітектури системи моніторингу виконання ліцензійних умов (ЛІУ), базуючись на об’єктно-орієнтованій парадигмі програмування. Для реалізації моніторингу професійної

діяльності необхідно розробити архітектуру інформаційної системи на виконання ліцензійних умов (ЛУ) базуючись на об'єктно-орієнтованій парадигмі програмування.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

1. На основі аналізу п.38 ЛУ визначити основні компоненти моделі моніторингу. Компоненти повинні забезпечувати формалізацію реквізитів подій (публікації, патенти, сертифікати, підвищення кваліфікації тощо) у вигляді класів.

2. Розробити архітектуру об'єктно-орієнтованої моделі інформаційної системи, яка визначає та описує зв'язки між компонентами, що забезпечує структуроване представлення моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників.

Виклад основного матеріалу.

Цифрова трансформація системи моніторингу забезпечується через веборієнтовану платформу, яка здійснює збереження та обробку інформації на основі клієнт-серверної архітектури. Програмна реалізація платформи потребує розробки об'єктно-орієнтованої моделі, яка заснована на базі класів та логіки зв'язків між ними. На основі аналізу ЛУ та процесу моніторингу професійної діяльності визначено такі компоненти об'єктно-орієнтованої моделі:

1. **Елементарні події.** Кожну одиницю професійної діяльності, що підтверджена через офіційний документ, будемо розглядати як елементарну подію. Кожен клас описується множиною власних специфічних властивостей притаманних лише цій події. Перетин множин усіх можливих класів дозволяє виділити спільні атрибути та винести їх окремим класом *Event*, як універсальний опис будь-якої освітньої, наукової, винахідницької, методичної та інших видів діяльності НПП. *Event* визначає абстрактний клас, а інші підкласи наслідують його атрибути та методи забезпечуючи поліморфізм.

До атрибутів базового класу віднесено: *teams* – колектив авторів (частковим випадком є один автор); *title* – назва події (назва патенту, свідоцтва, наукової публікації, сертифікату, інших документів); *date_issued* – вихідна календарна дата документа.

Абстрактний клас містить метод *getInfo()*. Призначення даного методу – це формування відображення даних про елементарну подію у відповідності до загального або локального шаблону. Метод повертає сформований html-код для подання інформації про об'єкт на вебсторінці системи.

Загальний шаблон описує інформацію про подію, що підлягає стандартизації за вимогами ДСТУ 8302:2015 (наукові статті, тези конференцій, патенти, монографії, підручники та посібники – пункти 1, 2, 3, 4, 12). Локальний шаблон використовується для подій, що не класифікуються за ДСТУ 8302:2015 це пункти 5 – 11, 13 – 20.

Підкласи (*Article*, *Patent*, *Copyright*, *Development* та інші) успадковують метод *getInfo()* із тією ж назвою, але реалізуються по-різному відповідно до шаблону.

Розглянемо реалізацію методу *getInfo()* при конструюванні класів елементарних подій, які відповідають пункту 38.2 ЛУ «наявність одного патенту на винахід або п'яти деклараційних патентів на винахід чи корисну модель, включаючи секретні, або наявність не менше п'яти свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір»[1].

Даний пункт складається з двох видів подій:

- патенти на винаходи, деклараційні патенті чи корисні моделі (клас *Patent*);
- авторські свідоцтва про реєстрацію авторських прав на твір (клас *Copyright*).

Відповідно до ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання», патенти оформляються за таким шаблоном.

Шаблон «Patent»:

Дані автора (авторів) . Назва патенту : пат. Номер патенту Країна : код МПК . №
Номер заявки ; заявл. Дата заявлення ; опубл. Дата опублікування , Бюл. № Номер
бюлетеня. Кількість сторінок.

Оскільки в Україні існує спеціальна інформаційна система УКРНОІВІ (СІС), то шаблон «Patent» можливо доповнити покликанням на патент (атрибут link).

Код методу *getInfo()* класу *Patent*, що реалізовує шаблон «Patent» мовою PHP 8.1 є таким:

```
public function getInfo() {
    $note = $this->teams.' '.$this->title.': ';
    $note .= 'пат. '.$this->number_patent.' Україна : ';
    $note .= $this->code_mpk.' ';
    $note .= 'заявл. '.date('d.m.Y', strtotime($this->date_application)).'; ';
    $note .= 'опубл. '.date('d.m.Y', strtotime($this->date_issued)).'; ';
    $note .= '№ '.$this->order.' ';
    $note .= 'Бюл. № '.$this->bulletin.' ';
    if (!empty($this->page)){$note.=' '.$this->page.'c.';}
    if (!empty($this->link)){
        $note .= ' URL:<a href="'.$this->link.'">'.$this->link.'</a>';
    }
    return $note;
}
```

Для представлення свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір згідно ДСТУ 8302:2015 застосовуємо такий шаблон:

Шаблон «Copyright».

Автор(и) . Назва твору [Текст] : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № Номер свідоцтва від . Дата свідоцтва / власник(и) авторського права . – Київ : Державна служба інтелектуальної власності України, Рік .

Метод *getInfo()* класу *Copyright* реалізовує шаблон «Copyright»..

Елементарні події, що описують результати професійної діяльності науково-педагогічних працівників, підтверджуються відповідними документами, сертифікатами, свідоцтвами, патентами, подяками тощо. У контексті цифрової трансформації управління закладом освіти постає завдання переведення таких документів у електронний формат із можливістю їх інтеграції до інформаційної системи. Часто офіційні документи вже існують у цифровому вигляді, що відкриває можливість їх безпосереднього використання для візуалізації подій у системі моніторингу. Цифрові документи зберігаються у файловому репозиторії *FileRepository*. Файловий репозиторій можна організовувати локально на сервері або у хмарних середовищах (Amazon S3, Google Cloud Storage, Microsoft Azure, Blob Storage та інші). Назва файлу зберігається окремим атрибутом класу та забезпечує асоційований зв'язок з репозиторієм.

У підкласах, де подія підтверджується зображенням або PDF-документом (наприклад, *Patent*, *Copyright*, *Development*), реалізовано метод *getInfoImg()*, який викликає базовий метод *getInfo()* і доповнює отриману інформацію зображенням документа. Таким чином забезпечується інтеграція текстової та візуальної інформації в єдиному об'єктно-орієнтованому представленні події. Метод *getInfoImg()* можна застосовувати у цифровому портфоліо науково-педагогічного працівника для візуалізації його досягнень.

Діаграму класу елементарних подій, які відповідають п.38.2 ЛУ, подано на рисунку 1.

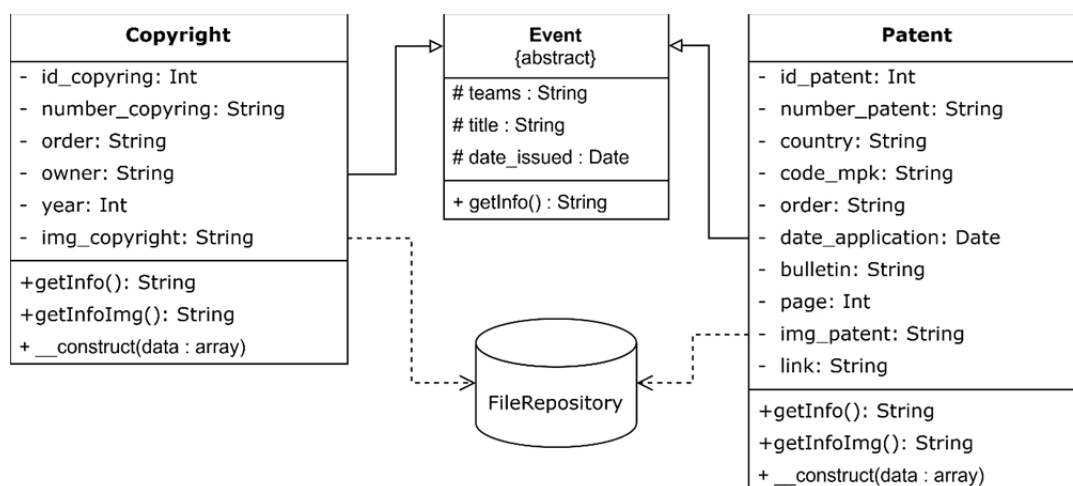


Рисунок 1– UML-діаграма класів Patent та Copyright

Джерело: розробка авторів

Аналогічним чином структуруються документи до відповідних підпунктів Ліцензійних умов та конструюються відповідні класи елементарних подій з деталізацією методів *getInfo()* та *getInfoImg()* за потреби.

2. **Науково-педагогічний працівник.** Суб'єктом моніторингу (менеджментом закладу вищої освіти) є досягнення науково-педагогічного працівника в професійній діяльності (п.38 ЛУ). Даному компоненту відповідає клас *Npp*, якому притаманні такі атрибути: ідентифікатор; прізвище, ім'я та по батькові; посада; належність до структурного підрозділу; колекції про елементарні події.

Базовими атрибутами класу є колекції, які відображають хронологію елементарних подій, що формують професійну відповідність та стосуються кожного підпункту відповідно до п.38 ЛУ. Для зручності відповідні колекції позначимо п.38.1 – *item1*, п.38.2 – *item2* і так далі. Кожна елементарна подія є об'єктом конкретного класу. Для повноти моніторингу клас *Npp* містить двадцять таких колекцій. Колекції можуть бути, як гомогенними, так і гетерогенними. Колекція *item1* є гомогенною, оскільки вона складається тільки з об'єктів одного класу *Article* (статті в наукових виданнях). Колекція *item2* є гетерогенною, оскільки вона складається з екземплярів двох різних класів: об'єкти класу *Patent* (патенти на винаходи, корисну модель, промисловий зразок) та об'єкти класу *Copyright* (авторські свідоцтва на твір).

Відповідним чином формуються колекції *item3* - *item20*, які описують усі професійні здобутки.

До професійної діяльності можна віднести підвищення кваліфікації, стажування та самоосвіту (клас *Development*). Цей вид професійної діяльності регламентується нормативними документами як загальнодержавними, так і локальними нормативними документами закладу освіти. Атрибут *list_dev* містить об'єкти класу *Development*, які формують індивідуальну траєкторію професійного саморозвитку НПП.

Підсумовуючи вище сказане, отримуємо двадцять одну колекцію, як частину атрибутів класу *Npp*. Атрибути класів визначено як приватні або захищені, що забезпечує контрольовану взаємодію між об'єктами через публічні методи доступу (гетери та сетери), що підвищує рівень надійності та узгодженості даних.

Окрім, аналізу досягнень науково-педагогічного працівника, інформаційна система може здійснювати моніторинг діяльності структурного підрозділу закладу освіти зокрема, кафедри, циклової комісії та інше. З цією метою клас *Department* містить колекцію (*list_npp*) тих об'єктів класу *Npp*, які входять у кадровий склад підрозділу.

Клас *Event*, підкласи *Event* та агрегуючі класи *Npp*, *Department* складають рівень «Сутності» багаторівневої структури моніторингу. Ієрархію класів рівня «Сутності» подано на рисунку 2.

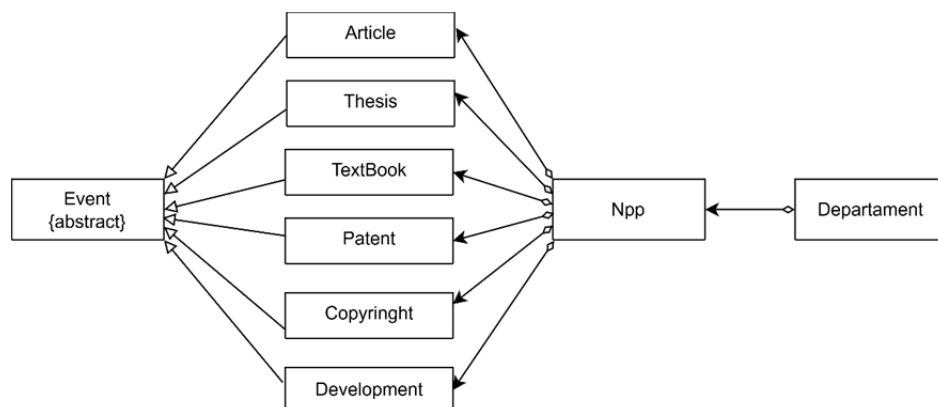


Рисунок 2 – Діаграма класів рівня «Сутність»

Джерело: розробка авторів

3. Менеджери аналітики. Менеджери аналітичного рівня системи моніторингу забезпечують обробку даних, формування звітів, оцінку відповідності, прогнозування тенденцій, планування розвитку та побудову інтерактивних дашбордів. Виходячи із функціональних завдань системи визначено такі менеджери:

а) *Менеджер звіту (ReportManager)* – формування інформації для усіх об'єктів обраної колекції *Npp* або *Department*. В основу методу *reportNpp()* покладено інтерювання конкретної колекції та застосування методу *getInfo()* або *getInfoImg()*. Метод *reportDep()* формує звітність по структурному підрозділу.

б) *Менеджер відповідності (ComplianceManager)* – визначає відповідність колекції об'єкту *Npp* за визначеним критерієм у ЛУ.

Розглянемо детальніше критерії визначення відповідності до п.38.2 ЛУ науково-педагогічного працівника (*Npp*). Колекція *item2*, яка агрегує об'єкти класів *Patent* та *Copyring*, описує хронологію подій досягнень у професійній діяльності п.38.2 в межах часової шкали на відрізок останніх п'яти років.

$$item2 = \sum_i Patent_i + \sum_j Copyring_j$$

У пункті п.38.2 ЛУ визначено такі критерії:

- наявність не менше п'яти об'єктів класу *Copyring*;
- або не менше п'яти об'єктів класу *Patent*, де тип патенту: корисна модель, промисловий зразок;
- або не менше одного об'єктів класу *Patent*, де тип патенту – винахід.

Якщо хоча б один з критеріїв виконується, то метод *checkNpp()* повертає значення *True* – відповідність, інакше *False* (не відповідність). За необхідності можна викликати *ReportManager* та відобразити інформацію з аналізованої колекції. Метод *checkDep()* аналізує колекції *list_Npp* класу екземпляру *Department*.

с) *Менеджер прогнозування (ForecastManager)* – виконує прогнозування професійного розвитку. Менеджеру передається календарна дата прогнозу, на основі якої аналізуються передана колекція та формується нова колекція елементарних подій, до якої відбираються тільки ті події, які знаходяться в діапазоні від дати прогнозу мінус п'ять років до дати прогнозу. Як результат роботи менеджера повертається нова

актуальна колекція. Також за необхідності можна її передати до *ReportManager*. Отримана колекція аналізується на відповідність *ComplianceManager*.

d) *Менеджер планування (PlannigManager)* – планує подальшу професійну діяльність на основі прогнозу. Надаються рекомендації подальших кроків для підтримки пункту ЛУ в актуальному стані. Результати можуть бути використані для складання індивідуального плану НПП на поточний навчальний рік.

е) *Менеджер побудови дашбордів (DashboardManager)* – створює інтерактивні дашборди для візуалізації індивідуальної хронології подій певної колекції. Джерелом для побудови графічної візуалізації є аналітична інформація про кількісне наповнення відповідної колекції та побудова відповідної діаграми за допомогою бібліотек Chart.js, D3.js, Google Charts та інші. Метод *buildingNpp()* виконує аналітичний аналіз колекції та здійснює саме побудову діаграми.

Менеджери аналітики можуть обробляти множину вибраних колекції класів *Npp* або *Department*.

4. **Системні класи.** Дані класи забезпечують зв'язок з базою даних та файловим репозиторієм.

Клас *DataBaseConnector* забезпечує зв'язок між об'єктною моделлю системи і реляційною базою даних (інфраструктурним рівнем). Даний клас забезпечує: встановлення та підтримання з'єднання з БД; виконання SQL-запитів для взаємодії з даними, що зберігаються в БД, а саме для їх додавання, зміни, видалення та вибірки; передавання даних об'єктам *Patent*, *Copyring*, *Article*, *Thesis*, *Development* тощо); інкапсуляції логіки роботи з БД у межах класу. Метод *fetchAll()* забезпечує вибірку даних та безпечну взаємодію з БД через підготовлені запити та параметри, які йому передаються.

Фрагмент коду методу *fetchAll()* на PHP.

```
public function fetchAll($sql, $params = []) {  
    $stmt = $this->connect()->prepare($sql);  
    $stmt->execute($params);  
    return $stmt->fetchAll(PDO::FETCH_ASSOC);  
}
```

Результат роботи методу використовуються конструктором класів елементарних подій. Для уніфікації доступу до бази даних усі SQL-запити зберігаються в окремому конфігураційному файлі (наприклад *sql_requests.json*).

Клас *FileRepository* реалізує збереження документів у файловому репозиторії (хмарне чи локальне сховище), до якого звертається *FileRepository*. Усі документи, що підтверджують професійні події, зберігаються у структурованому файловому репозиторії. Клас виступає інтерфейсом між системою та фізичним сховищем та забезпечує завантаження файлів, їх оновлення, видалення та формування шляху для використання у методі *getInfolmg()* класів.

Архітектура системи моніторингу. Системний підхід до моделювання потребує визначення зв'язків між компонентами та чіткого визначення як вони взаємодіють. Архітектура формується на основі деталізації зв'язків, що забезпечують цілісність та зрозумілість даних, є основою для програмної реалізації та масштабування.

Аналіз компонент дозволив виділити такі ключові зв'язки:

1. **Успадкування** (*Event* ← *Article*, *Event* ← *Patent* та інше). Абстрактний клас *Event* є базовим для елементарних подій. Класи *Article*, *Patent*, *Copyright*, *Development* та інші успадковують атрибути та методи від нього, гарантуючи спільний інтерфейс і всі події мають можуть оброблятися поліморфно.

2. **Агрегація** (*Npp* → колекція елементарних подій об'єктів класів *Article*, *Patent*, *Copyright*, *Development*). Клас *Npp* володіє наборами об'єктів конкретних класів

елементарних подій, але події можуть існувати незалежно. *Npp* має колекції: *list_dev: Development[]*, *item1: Article[]*, *item2: (Patent | Copyring)[]*, *item12: (Article | Thesis)[]* та інші. Клас *Department* агрегує у собі колекцію об'єктів класу *Npp*.

3. **Асоціація** (Елементарні класи → Системні класи). Кожен клас елементарних подій *Article*, *Patent*, *Copyright*, *Development* та інші асоційований із системними класами *DataBaseConnector* та *FileRepository*. Класи елементарних подій використовують системні класи для ініціалізації даних, які реалізуються у конструкторі класу. Системні класи виступають як сервіси доступу до бази даних та файлового репозиторію.

4. **Залежності** (Менеджери аналітики → *Npp*). Менеджери аналітики не зберігають *Npp* як дані, а використовують їх. Менеджери аналізують дані, що містяться в об'єктах *Npp* (тобто дані про самого працівника та його агреговані події).

Отже, об'єктно-орієнтована структура системи моніторингу професійної діяльності НПП, базується на ієрархічній моделі взаємопов'язаних класів:

- Абстрактний клас *Event* визначає спільні властивості подій, що підтверджуються цифровими документами.
- Клас *Npp* агрегує множини таких подій, утворюючи індивідуальний профіль діяльності працівника.
- Менеджери (*ReportManager*, *ForecastManager* тощо) забезпечують аналітичну, прогнозну та планувальну функціональність системи.
- Системні класи *DataBaseConnector* і *FileRepository* реалізують рівень взаємодії з базами даних і цифровими сховищами, що гарантує цілісність і відтворюваність даних у рамках цифрової трансформації управління освітнім закладом.

Архітектура системи моніторингу подана у вигляді UML-діаграми на рисунку 3.

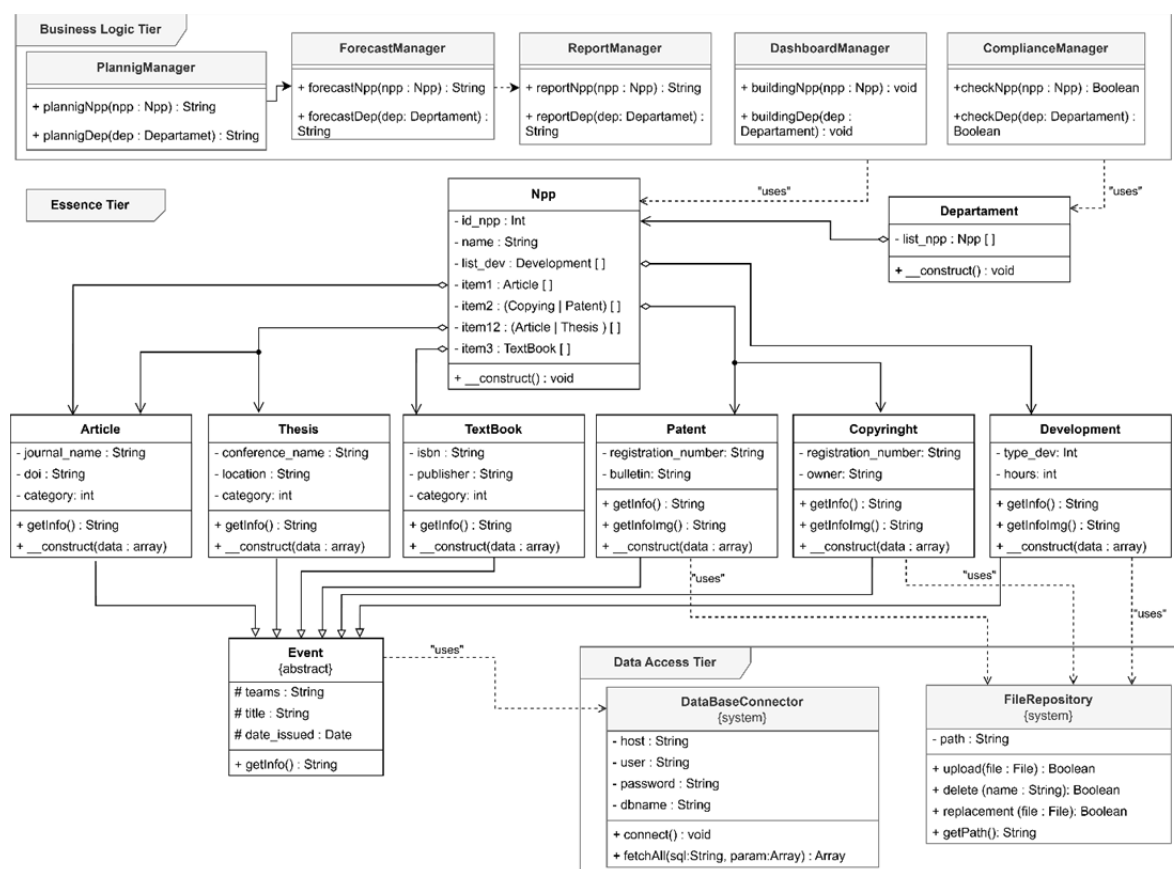


Рисунок 3 – Концептуальна діаграма архітектури системи моніторингу

Джерело: розробка авторів

Аналізуючи компоненти об'єктно-орієнтованої моделі (рис 3.) можна відзначити, що модель має багаторівневу структуру (N-Tier Architecture).

Верхній рівень моделі (Business Logic Tier) утворюють менеджери класів: *MenegerReport*, *MenegerForecast* та *MenegerPlanning*, які реалізують методи відображення, прогнозування й планування відповідно. Кожен із них оперує даними класу *Npp*, здійснюючи аналітичну обробку інформації, формування звітів і побудову прогнозних сценаріїв розвитку.

Середній рівень (Essense Tier) складають класи, які визначають організаційну структуру представлення даних. Це абстрактний клас *Event*, підкласи *Article*, *Patent*, *Copyright*, *Development* та інші, клас *Npp* який містить колекції підкласів та клас *um* який містить множину об'єктів класу *Npp*.

Нижній рівень (Data Access Tier) містить системні класи *FileRepository* та забезпечує роботу з електронними документами, а *DataBaseConnector* реалізує взаємодію із базою даних.

Дана архітектура, представлена на діаграмі (рис.3), описує логіку роботи серверної частини інформаційної системи, оскільки вона визначає як дані обробляються, зберігаються та аналізуються, повністю ігноруючи клієнтський інтерфейс (Presentation Tier). Таким чином, ця діаграма є детальним планом реалізації бекенду системи, що визначає структуру даних та їхню обробку.

Для підтвердження працездатності запропонованої об'єктно-орієнтованої моделі було реалізовано прототип інформаційної системи моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників. Реалізацію здійснено мовою програмування PHP із застосуванням принципів інкапсуляції, спадкування та поліморфізму, що забезпечує структурованість програмного коду, його повторне використання та розширюваність.

Функціонування прототипу передбачає автоматизований збір та обробку даних про результати діяльності НПП, формування звітів у форматах HTML, PDF, а також візуалізацію показників динаміки професійного розвитку у вигляді графіків і діаграм. Така реалізація підтвердила ефективність запропонованої об'єктно-орієнтованої моделі, яка забезпечує інтеграцію даних, узгоджене представлення подій різних типів і створює основу для моніторингу, прогнозно-аналітичної підтримки управлінських рішень як внутрішньої системи забезпечення якості освіти.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розв'язано актуальне науково-практичне завдання щодо обґрунтування та розробки архітектури інтегральної інформаційної системи моніторингу професійної діяльності науково-педагогічних працівників (НПП) у контексті цифрової трансформації закладів вищої освіти.

Встановлено, що сучасні вимоги до забезпечення якості вищої освіти та дотримання ліцензійних умов провадження освітньої діяльності (зокрема п. 38 Постанови КМУ №1187) потребують переходу від фрагментарного збору даних до інтегральних систем. Запропонований підхід дозволяє сформувати цілісний цифровий профіль викладача, що об'єднує різнопланові професійні події (публікації, патенти, підвищення кваліфікації тощо) у єдине інформаційне середовище.

Обґрунтовано доцільність застосування об'єктно-орієнтованої парадигми для формалізації професійної діяльності. Використання механізмів успадкування (від базового класу *Event*), агрегації та інкапсуляції дозволило створити гнучку модель, яка легко адаптується до змін у законодавстві та дозволяє розширювати перелік об'єктів моніторингу без докорінної зміни архітектури системи, об'єднати ці класи в єдиний цифровий профіль науково-педагогічного працівника (клас *Npp*)

Розроблено та описано багаторівневу архітектуру системи (N-Tier Architecture), яка чітко розмежовує логіку бізнес-аналітики (Business Logic Tier), об'єктне представлення сутностей (Essence Tier) та сервіси доступу до даних (Data Access Tier).

Таке структурування забезпечує високу інтероперабельність компонентів та описує повний цикл роботи бекенду – від збереження «елементарних подій» у репозиторіях до формування стратегічних звітів і прогнозів.

Практична апробація моделі шляхом розробки програмного прототипу мовою PHP підтвердила життєздатність запропонованої архітектури. Впровадження такої системи дозволяє закладу вищої освіти реалізувати принцип Data Once, мінімізувати бюрократичне навантаження на НПП та автоматизувати внутрішній аудит якості освіти, забезпечуючи об'єктивність прийняття управлінських рішень.

Перспективи подальших досліджень полягають в інтелектуалізації аналітичних модулів системи. Пріоритетним напрямком є розвиток алгоритмів прогнозування у межах компонента ForecastManager із застосуванням методів машинного навчання для аналізу індивідуальних траєкторій розвитку викладачів, а також деталізація модуля PlanningManager для автоматизованої генерації рекомендацій щодо професійного вдосконалення НПП на основі ретроспективного аналізу їхньої діяльності.

Список літератури

1. Биков В.Ю. Цифрова трансформація суспільства і розвиток комп'ютерно-технологічної платформи освіти і науки України. Матеріали методологічного семінару НАПН України "Інформаційно-цифровий освітній простір України: трансформаційні процеси і перспективи розвитку". 4 квітня 2019 р. / За ред. В.Г. Кременя, О.І. Ляшенка. К, 2019. С.20-26.
2. Сущенко Л., Андрющенко О., Сущенко П. Цифрова трансформація закладів вищої освіти в умовах діджиталізації суспільства: виклики і перспективи. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: «Педагогіка. Соціальна робота», 2(51), 2025, С.157–162. <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2022.51.157-162>
3. Биков В. Ю., Спірін О. М., Пінчук О. П. Сучасні завдання цифрової трансформації освіти. Вісник ЮНЕСКО в Україні. 2020. Вип. 1. С. 27–36.
4. Стасюк. О. Цифрова трансформація закладів вищої освіти. Проблеми і перспективи економіки та управління, Вип.3 (43), 2025, С. 232–242. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2025-3\(43\)-232-242](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2025-3(43)-232-242)
5. Постанова Кабінету Міністрів України № 1187 "Про затвердження Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1187-2015-%D0%BF#Text> (дата звернення: 8.11.2025).
6. Деякі питання підвищення кваліфікації педагогічних і науково-педагогічних працівників : Постанова Кабінету Міністрів України від 21 серп. 2019 р. № 800 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/800-2019-%D0%BF> (дата звернення: 13.11.2025).
7. Качурівський В.О., Качурівська Г.М., Білоус Н.М. Технологічна модель та проектування інформаційно-аналітичної системи цифрового моніторингу професійного розвитку науково-педагогічних працівників. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. Т.1 № 5 (2025). 2025. С.182-190. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.19>
8. Kachurivskiy V., Kotovskiy A., Lykhodid T., Kachurivska H., Dorenskiy O. The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Вип. 11(42), ч. I. 2025. P.27-36. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36)

References

1. Bykov, V. Yu. (2019). Tsyfrova transformatsiia suspilstva i rozvytok kompiuterno-tekhnologichnoi platformy osvity i nauky Ukrainy [Digital transformation of society and development of the computer-technological platform of education and science of Ukraine]. In V. H. Kremen & O. I. Liashenko (Eds.), Proceedings of the methodological seminar of the NAES of Ukraine "Information and digital educational space of Ukraine: transformational processes and development prospects" (pp. 20–26). Kuras.
2. Sushchenko, L., Andriushchenko, O., & Sushchenko, P. (2025). Tsyfrova transformatsiia zakladiv vyshchoi osvity v umovakh didzhytalizatsii suspilstva: vyklyky i perspektyvy [Digital transformation of higher education institutions in the conditions of society digitalization: Challenges and prospects]. Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: "Pedagogy. Social Work", 2(51), 157–162. <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2022.51.157-162>
3. Bykov, V. Yu., Spirin, O. M., & Pinchuk, O. P. (2020). Suchasni zavdannia tsyfrovoy transformatsii osvity [Modern tasks of digital transformation of education]. UNESCO Bulletin in Ukraine, (1), 27–36.

4. Stasiuk, O. (2025). Tsyfrova transformatsiia zakladiv vyshchoi osvity [Digital transformation of higher education institutions]. *Problems and Prospects of Economics and Management*, 3(43), 232–242. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2025-3\(43\)-232-242](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2025-3(43)-232-242)
5. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2015). Pro zatverdzhennia litsenziinykh umov provadzhennia osvitnoi diialnosti [On approval of Licensing conditions for educational activities] (Resolution No. 1187). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1187-2015-%D0%BF#Text>
6. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019). Deiaki pytannia pidvyshchennia kvalifikatsii pedahohichnykh i naukovopedahohichnykh pratsivnykiv [Some issues of professional development of pedagogical and research and pedagogical staff] (Resolution No. 800). *Legislation of Ukraine*. <https://zakon.rada.gov.ua/go/800-2019-%D0%BF>
7. Kachurivskiy, V. O., Kachurivska, H. M., & Bilous, N. M. (2025). Tekhnolohichna model ta proektuvannia informatsiino-analitychnoi systemy tsyfrovoho monitorynhu profesiinoho rozvytku naukovopedahohichnykh pratsivnykiv [Technological model and design of the information-analytical system for digital monitoring of professional development of research and pedagogical staff]. *Tavriiskiy Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, 1(5), 182–190. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.19>
2. Kachurivskiy, V., Kotovskyi, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., & Dorenskiy, O. (2025). The concept of digital transformation of monitoring scientific activity of participants in educational process of the Ukrainian HEI. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), part I, 27–36. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36)

Volodymyr Kachurivskiy¹, Assoc. Prof., PhD ped. sci., **Hanna Kachurivska**¹, Assoc. Prof., PhD phys. and math. sci., **Radim Chorb**²

¹*Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany Agrotechnical Institute", Berezhany, Ukraine*

²*Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine*

Object-Oriented Architecture of an Integrated Information System for Monitoring the Professional Activities of Research and Pedagogical Staff

The article substantiates the necessity for and presents the architecture of an integrated information system for monitoring the professional activities of research and pedagogical staff (NPP) within the framework of the digital transformation of higher education institutions. The relevance of this study is driven by the complexity of monitoring compliance with current Licensing Conditions (specifically, Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1187) and the need for a transition toward data-driven management in educational institutions.

The proposed solution is based on an original object-oriented model that allows for the formalization of complex business processes within an educational institution. The architecture includes a hierarchy of classes, where the base is the abstract class Event, which, through inheritance and polymorphism mechanisms, describes diverse elementary events of professional activity: publication activity (Article class), patent and licensing work (Patent class), copyrights (Copyright class), and scientific developments (Development class). The Npp class serves as the central node of the model, implementing an aggregation relationship with collections of these events, which enables the formation of a comprehensive digital profile of the faculty member.

Special attention is paid to the analytical data processing layer, represented by specialized analytics managers. It is proven that the use of components such as ReportManager, ComplianceManager, ForecastManager, and PlanningManager allows for the automation of not only retrospective reporting but also intelligent decision support through professional development forecasting and the automated generation of individual plans. The technological integrity of the system is ensured by system classes (DataBaseConnector, FileRepository) that isolate business logic from the details of physical data storage.

Object-oriented relationships between components – inheritance, aggregation, association, and dependency – are defined and graphically interpreted. The proposed multi-level structure (N-Tier Architecture) clearly distinguishes between the layers of business logic, entities, and data access, describing the complete logic of the system's server side. The validity of the developed model is confirmed by the implementation of a software prototype in PHP, which demonstrated the system's effectiveness in minimizing the bureaucratic burden through the implementation of the "Data Once" principle. The implementation of the system ensures the objectivity of internal monitoring of education quality and the institution's resilience to changes in regulatory legislation.

digital transformation, higher education institutions, object-oriented model, monitoring, N-Tier architecture, management automation

Одержано (Received) 19.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 11.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

Д. І. Угрин¹, проф., д-р техн. наук, О. П. Доренський², доц., канд. техн. наук,
Ю. О. Ушенко¹, проф., д-р фіз.-мат. наук, О. І. Бреславський¹

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua, dorenskyiop@kntu.kr.ua, y.ushenko@chnu.edu.ua,

breslavskyi.oleh@chnu.edu.ua

Методи та моделі інтелектуального комп'ютерного зору для ідентифікації й оцінки функціонального стану людини в умовах обмеженої видимості

Праця присвячена підвищенню точності та стійкості сегментації, кластеризації та ідентифікації людини на цифрових зображеннях в умовах зниженої видимості. Метою дослідження є інтеграція адаптивної попередньої обробки, дескрипторного аналізу та моделей глибинного навчання для забезпечення стабільної роботи систем комп'ютерного зору. Сформовано вибірку з 350 зображень на основі власних фото та наборів COCO і CrowdHuman. Змодельовано деградації (туман, шум, затемнення, низький контраст, комбіновані впливи) та реалізовано адаптивну попередню обробку із застосуванням γ -корекції, CLAHE, Dehazing і фільтрації. Сегментацію виконано за допомогою U-Net і Mask R-CNN, детекцію – YOLOv8, кластеризацію – K-Means і DBSCAN. Експериментальні результати підтвердили підвищення якості сегментації (IoU до 0,95), детекції (mAP до 0,95) та кластеризації (Silhouette Score до 0,79), а коректність ідентифікації людини зросла до 99 %. Запропонований підхід забезпечує робастність системи до деградацій зображень і може бути використаний у реальних умовах відеомоніторингу.

обробка зображень, ідентифікація людини, знижена видимість, глибинне навчання, візуальні дані, комп'ютерний зір

Постановка проблеми. У сучасних умовах активного розвитку цифрових технологій та систем комп'ютерного зору особливої актуальності набувають задачі автоматизованого аналізу зображень, зокрема виявлення, сегментації та ідентифікації людини. Такі задачі є критично важливими для систем відеоспостереження, громадської безпеки та транспортного моніторингу. Зростання обсягів візуальних даних і потреба в їх автоматизованій обробці зумовлюють необхідність створення швидкодіючих і стійких до спотворень методів розпізнавання, оскільки людина є одним із найбільш складних і варіативних об'єктів аналізу. У реальних умовах системи комп'ютерного зору функціонують за наявності туману, диму, пилу, низької освітленості, шумів сенсорів та зниження контрастності, що зменшує інформативність зображень і ускладнює коректне виділення об'єктів. Саме тому виникає потреба у розробленні комплексного підходу до сегментації, кластеризації та ідентифікації людини з урахуванням різних типів деградації видимості та реальних умов експлуатації, які суттєво відрізняються від ідеалізованих лабораторних сценаріїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі в фахових дослідженнях за тематикою «Кластеризація і сегментація зображень» в основному спостерігається тенденція до інтеграції класичних методів комп'ютерного зору з нейронними архітектурами [1,3]. Зокрема в [1,2] відмічається, що класичні алгоритми обробки зображень забезпечують інтерпретованість, швидкість та низькі обчислювальні витрати, тоді як глибинні нейронні мережі демонструють високу

здатність до узагальнення та виявлення складних закономірностей у даних. Згідно з [3] поєднання вище зазначених підходів дозволяє отримати синергетичний ефект – підвищення точності розпізнавання при одночасному збереженні обчислювальної ефективності та стійкості до шумів. Однак питання оптимального комбінування таких методів, вибору послідовності етапів обробки та кількісної оцінки їх результативності в умовах погіршеної видимості залишається недостатньо дослідженим. В працях [4,5], відмічається що для нічної детекції інколи виграють механізми уваги та використання контексту фону (бо силует людини може бути слабо виражений), але при цьому ці рішення часто чутливі до зміни камер і сценаріїв, тому потребують ретельної валідації «через домени», а не лише на одному наборі. При цьому аналіз сучасних досліджень дозволяє виокремити дві закономірності. По-перше, підсилення зображення саме по собі не гарантує покращення детекції чи сегментації – необхідне узгоджене навчання, орієнтоване на цільові метрики розпізнавання [6,7]. По-друге, ключову роль відіграють спеціалізовані датасети та протоколи оцінювання робастності (ACDC, Foggy Cityscapes, NightOwls тощо), які дозволяють виявляти слабкі місця моделей у складних умовах і коректно порівнювати методи [8,9]. При цьому ACDC забезпечує відповідності «normal ↔ adverse» і якісну розмітку для адаптації, однак проблема моделювання невизначеності та перенесення результатів поза дорожній домен залишається відкритою. Датасет LLVIP (visible–infrared pairs) демонструє потенціал мультимодального навчання в нічних умовах, але недостатньо охоплює змішані деградації та сцени з натовпами, де потрібна інстанс-сегментація. Натомість сучасні підходи до сегментації й кластеризації дедалі частіше поєднують глибинні нейромережі з класичними методами опису ознак [10]. Зокрема, стратегія навчання інваріантних до освітлення ознак безпосередньо в задачі детекції оптимізує результат під цільову функцію, а не під візуальну «якість» кадру. Водночас її обмеженнями є складність перенесення на різні сенсори та потреба у строгих протоколах оцінювання, щоб уникнути втрати дискримінативності. Загалом більшість робіт зосереджуються на окремих типах деградацій або ізольованому вдосконаленні алгоритмів без системної інтеграції всіх етапів обробки.

Постановка завдання. Таким чином метою дослідження є підвищення точності та стійкості автоматизованої сегментації, кластеризації та ідентифікації людини на цифрових зображеннях у складних умовах видимості шляхом поєднання методів попередньої обробки зображень, дескрипторного аналізу ознак та моделей глибинного навчання з комплексним кількісним оцінюванням результатів. Задачі дослідження: 1) здійснити сегментацію, опис ознак, кластеризацію та ідентифікацію людини із застосуванням класичних алгоритмів комп'ютерного зору та моделей глибинного навчання; 2) провести комплексне оцінювання ефективності запропонованого підходу за кількісними метриками точності, повноти, якості сегментації та узагальненої точності детекції й визначити вплив різних типів деградації зображень на результати розпізнавання.

Виклад основного матеріалу. Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні класичних алгоритмів обробки зображень і моделей глибинного навчання з використанням структурованої вибірки з 350 зображень (200 – одна людина, 100 – групи 2–4 осіб, 50 – натовпи). Дані сформовано з власних фото (120) та відкритих наборів COCO і CrowdHuman (230), що забезпечує різноманітність сцен; у 90 зображеннях наявні сторонні об'єкти для перевірки стійкості до хибних спрацьовувань. Для моделювання деградацій застосовано Gaussian Blur ($\sigma=1.0\text{--}2.5$), Salt and Pepper Noise (2–8 %), Gamma Correction ($\gamma=0.6\text{--}1.6$) та зниження контрасту (30–60 %). Попередня обробка включає нормалізацію, Histogram Equalization і CLAHE, Median та Gaussian фільтри, а також аугментацію (повороти $\pm 15^\circ$, масштабування 0.9–1.1,

віддзеркалення). Методи підбиралися з урахуванням типу сцени (одна людина, група, натовп) і наявності сторонніх об'єктів. Сегментація виконувалась із використанням Canny (контрольна вибірка), Watershed, U-Net і Mask R-CNN. Опис ознак здійснювався за допомогою HOG і LBP, кластеризація – методами K-Means (3–5 кластерів) і DBSCAN ($\epsilon=0.5-0.7$). Детекція та ідентифікація реалізовані на основі YOLOv8 і EfficientNet-B3 (з базовою CNN, як контроль). Оцінювання проводилось за метриками Precision, Recall, F1-score, IoU, mAP і Silhouette Score. Комплексне застосування зазначених методів дозволяє кількісно оцінити вплив різних типів деградації видимості на точність сегментації, кластеризації та ідентифікації людини, забезпечуючи статистичну надійність і відтворюваність результатів.

K-Means (кластеризація ознак): Використовується для базового групування сегментів за подібністю форми та текстури, що дозволяє відокремити людину від фонових об'єктів у просторі ознак (1):

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \mu_k\|^2, \quad (1)$$

де J – функціонал якості кластеризації (критерій оптимізації). Показує сумарну квадратичну відстань усіх об'єктів до центрів своїх кластерів. Чим менше J , тим компактніші кластери; C_k – множина об'єктів, які належать k -му кластеру; x_i – вектор ознак; K – кількість кластерів; μ_k – центр кластера.

IoU (Intersection over Union): Застосовується для кількісної оцінки якості детекції та сегментації масок людини шляхом порівняння прогнозованих і еталонних рамок (2):

$$IoU = \frac{Area(B_p \cap B_{gt})}{Area(B_p \cup B_{gt})}, \quad (2)$$

де B_p – прогноз; B_{gt} – еталонна рамка.

Precision, Recall, F1-score (якість класифікації). Використовуються для комплексної оцінки точності та повноти розпізнавання людини у кадрі, що дозволяє уникнути перекосу лише в бік точності, або лише повноти (3):

$$\begin{cases} Precision = \frac{TP}{TP + FP} \\ Recall = \frac{TP}{TP + FN} \\ F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \end{cases}, \quad (3)$$

де TP – істинно позитивна оцінка розпізнавання; FP – хибно позитивна оцінка розпізнавання; FN – хибно негативна оцінка розпізнавання.

В табл.1. наведено загальну характеристику набору зображень.

Таблиця 1 – Загальна характеристика набору зображень

ID зображення	Тип сцени	Кількість людей	Наявність сторонніх об'єктів	Джерело	Роздільна здатність	Тип фону
IMG_001	Одна людина	1	Манекен, вітрина магазину	Власне фото	1600×1200	Торговий центр
IMG_002	Група	3	Автомобіль, житлові будинки	Власне фото	2048×1365	Міський житловий
IMG_003	Група	8	Автобусна зупинка, автобус, урна, реклама	Власне фото	2048×1365	Міський (вулиця)

Продовження таблиці 1

IMG_004	Одна людина (селфі)	1	Автомобілі, собака, житловий будинок	Власне фото	1536×2048	Міський двір
IMG_005	Група	2	Дерева, замерзла водойма	Власне фото	1536×2048	Природа (зима)
IMG_006	Одна людина (ніч)	1	Дерева, освітлені вікна будинків	Власне фото	1536×2048	Природа (нічна сцена)

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Параметри деградації зображень (штучні впливи)

ID зображення	Тип деградації	Рівень (%)	Опис впливу
IMG_001_D1	Затемнення	40	Зменшення яскравості
IMG_002_D2	Туман	30	Gaussian Blur
IMG_003_D1	Запилення	25	Salt & Pepper Noise
IMG_004_D1	Дим	35	Білий напівпрозорий шар
IMG_005_D1	Низький контраст	50	Histogram Compression
IMG_006_D1	Комбінована	30+20	Туман + затемнення

Джерело: розроблено авторами

Дані табл.2 демонструють, що для моделювання погіршених умов видимості застосовано різні типи штучних деградацій, які відтворюють основні реальні фактори, що ускладнюють розпізнавання людського ресурсу на зображеннях. Кожен тип впливу має чітко визначений рівень інтенсивності, що дозволяє керувати варіювати складність задачі сегментації та ідентифікації. В табл.3. наведено параметри попередньої обробки зображень із відповідним врахуванням характеристик сцени.

Таблиця 3 – Параметри попередньої обробки зображень із врахуванням характеристик сцени та типу деградації

ID зображення	Метод	Параметр	Значення	Мета попередньої обробки
IMG_001_D1	Gamma Correction	γ	1.6	Компенсація затемнення (40%) та відновлення глобальної яскравості сцени в торговому центрі
IMG_001_D1	CLAHE	ClipLimit	2.0	Відновлення локального контрасту після корекції яскравості
IMG_002_D2	Dehazing (Dark Channel Prior)	ω	0.85	Усунення ефекту туману (30%) у природному зимовому середовищі
IMG_002_D2	Unsharp Masking	k	1.2	Відновлення контурів після Gaussian Blur
IMG_003_D1	Median Filter	Kernel	5×5	Видалення Salt & Pepper Noise (25%) у міській сцені з групою людей
IMG_003_D1	CLAHE	ClipLimit	2.2	Підсилення силуетів людей після усунення імпульсного шуму
IMG_004_D1	White Layer Compensation	α	0.35	Усунення напівпрозорого димового шару (35%)
IMG_004_D1	Histogram Stretching	Range	0–255	Відновлення динамічного діапазону контрасту селфі-сцени
IMG_005_D1	CLAHE	ClipLimit	3.0	Компенсація низького контрасту (50%) у міському житловому фоні
IMG_005_D1	Adaptive Sharpening	k	1.1	Підсилення текстур фасадів та силуетів
IMG_006_D1	Gamma Correction	γ	1.8	Компенсація затемнення (20%) у нічній сцені
IMG_006_D1	Dehazing	ω	0.8	Усунення туману (30%)
IMG_006_D1	Bilateral Filter	d	7	Збереження контурів при одночасному приглушенні залишкового шуму

Джерело: розроблено авторами

З табл.3 наочно видно що для кожного типу деградації застосовано спеціалізовану комбінацію методів попередньої обробки, що забезпечує цільову компенсацію конкретних спотворень з урахуванням характеристик сцени.

На рисунку 1 наведено приклад програмного дослідження: «кластеризація і сегментація зображення IMG_002».



Рисунок 1 – Приклад програмного дослідження: «кластеризація і сегментація зображення IMG_002»
Джерело: розроблено авторами

В табл.4. наведено узагальнені результати попередньої обробки зображень.

Таблиця 4 – Узагальнені результати попередньої обробки зображень.

ID зображення	Основний метод	Покращення контрасту (%)	Зменшення шуму (%)	Зміна різкості (Δ Laplacian)	Загальний ефект якості*
IMG_001_D1	Gamma + CLAHE	+24	+7	+28	0.79
IMG_002_D2	Dehazing + Unsharp	+33	+18	+41	0.86
IMG_003_D1	Median + CLAHE	+27	+38	+32	0.84
IMG_004_D1	Layer Comp. + Stretch	+29	+14	+23	0.77
IMG_005_D1	CLAHE + Sharpen	+38	+10	+36	0.89
IMG_006_D1	Gamma + Dehazing + Bilateral	+35	+29	+39	0.87

* Загальний ефект якості – нормалізований інтегральний показник (0–1), сформований на базі яскравості, контрасту, шуму та різкості.

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати демонструють стабільне підвищення якості для всіх зображень після адаптивної попередньої обробки. Найбільший ефект спостерігається для випадків із сильними деградаціями (низький контраст та комбінований вплив), де інтегральний показник досяг 0.87–0.89. Максимальне зменшення шуму отримано для імпульсних спотворень, тоді як найбільший приріст різкості зафіксовано після усунення туману. Найменший, але стабільний ефект характерний для сцени з димом через складність повної компенсації напівпрозорого шару. У середньому інтегральний показник якості становить 0.84, що підтверджує ефективність адаптивного вибору методів відповідно до типу деградації та характеристик сцени. В табл.5. наведено результати сегментації та детекції людини.

Таблиця 5 – Результати сегментації та детекції людини

ID зображення	Метод сегментації	IoU (маска)	Precision	Recall	F1-score	mAP (YOLOv8)
IMG 001 D1	U-Net	0.93	0.96	0.95	0.95	0.94
IMG 002 D2	Mask R-CNN	0.90	0.92	0.91	0.91	0.92
IMG 003 D1	U-Net + Watershed	0.87	0.89	0.88	0.88	0.90
IMG 004 D1	Mask R-CNN	0.80	0.84	0.82	0.83	0.85
IMG 005 D1	U-Net	0.95	0.97	0.96	0.96	0.95
IMG 006 D1	Mask R-CNN + U-Net	0.89	0.91	0.90	0.90	0.91

Джерело: розроблено авторами

З табл.5. випливає, що адаптивна попередня обробка забезпечує стабільно високі показники сегментації та детекції (IoU 0.80–0.95), при цьому найкращі результати досягаються для зображень із ефективно компенсованими деградаціями, а найскладнішими залишаються сцени з димом та комбінованими впливами. В табл.6. наведено результати ознакового опису та кластеризації об'єктів (після попередньої обробки зображення).

Таблиця 6 – Результати ознакового опису та кластеризації об'єктів (після попередньої обробки зображення).

ID зображення	Кількість сегментів	Метод кластеризації	Кількість кластерів	Silhouette Score	Хибні сегменти (%)	Коректна ідентифікація людини (%)
IMG 001 D1	38	K-Means	3	0.76	2	98
IMG 002 D2	52	DBSCAN	4	0.71	4	96
IMG 003 D1	88	K-Means	5	0.67	8	92
IMG 004 D1	165	DBSCAN	6	0.59	13	87
IMG 005 D1	34	K-Means	3	0.79	1	99
IMG 006 D1	98	DBSCAN	5	0.65	9	91

Джерело: розроблено авторами

З табл.6. випливає, що попередня обробка суттєво підвищила якість кластеризації (зростання Silhouette Score та зменшення хибних сегментів), що безпосередньо призвело до підвищення точності коректної ідентифікації людини до 91–99%, навіть у складних сценах.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено та експериментально перевірено комплексний підхід до підвищення точності й стійкості автоматизованої сегментації, кластеризації та ідентифікації людини в умовах зниженої видимості. Показано, що адаптивне поєднання методів попередньої обробки (γ-корекція, CLaNE, Dehazing, фільтрація), дескрипторного аналізу ознак та моделей глибинного навчання (U-Net, Mask R-CNN, YOLOv8) забезпечує стабільне зростання кількісних метрик якості. Поєднання адаптивної попередньої обробки, дескрипторного аналізу та моделей глибинного навчання забезпечило стабільне підвищення точності сегментації (IoU до 0.95), детекції (mAP до 0.95) та кластеризації (Silhouette Score до 0.79) навіть у складних умовах видимості (туман, дим, низький контраст, комбіновані впливи). Комплексне кількісне оцінювання продемонструвало зменшення хибних сегментів і зростання коректної ідентифікації людини до 99%, що свідчить про підвищення стійкості алгоритмічної системи до деградацій зображень.

Список літератури

1. Яковлев А. Застосування методу сегментації на основі моделей нейронних мереж для вирішення задач розпізнавання номерних знаків. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2024. Т. 1, № 44. DOI: 10.20535/1560-8956.44.2024.302420.

2. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 779–788.
3. Anagnostopoulos, C. N., Anagnostopoulos, I. E., Psoroulas, I. D., Loumos, V., Kayafas, E. License plate recognition from still images and video sequences: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2008. Vol. 9, № 3. P. 377–391.
4. Сватюк Д., Сватюк О., Белей О. Застосування згорткових нейронних мереж для безпеки розпізнавання об'єктів у відеопотоці. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2020. № 4(8). DOI: 10.28925/2663-4023.2020.8.97112.
5. Висоцький В., Яворський Н. Система розумного паркування для розпізнавання номерних знаків на основі нейромережі YOLO та оптичного розпізнавання символів. *Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика*. 2024. Вип. 6(3). DOI: 10.23939/cds2024.03.123.
6. Вакалюк Т. А., Власенко О. В., Василенко М. К. Аналіз методів розпізнавання номерних знаків. *Тези VI Всеукраїнської науково-технічної конференції*. Житомирська політехніка, 2023. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/01/19.pdf> (дата звернення: 06.06.2025).
7. Dorenskyi, O., Drobko, O., Drieiev, O. Improved Model and Software of the Digital Information Service of the Municipal Health Care Institutions. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. 2. С. 3–10. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10.
8. Шелехов І.В., Прилепа Д.В., Хібовська Ю.О., Шамонін К.Є., Доренський О. П. Інформаційно-екстремальна технологія інтелектуального аналізу якості освітнього контенту в закладах вищої освіти. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. 1. (Препринт Центральноукр. нац. техн. ун-т).
9. Kachurivskiy, V., Kotovskiy, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., Dorenskyi, O. The Concept of Digital Transformation of Monitoring Scientific Activity of Participants in Educational Process of the Ukrainian HEI. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 27–36. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36.
10. Korniienko O., Kozub N., Dorenskyi O. Method and Technological Solution of an AI-Based Adaptive Investor Survey Service for Determining an Individual Risk Profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 11(42), Part II. P. 3-10. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.3-10.

References

1. Yakovlev, A. (2024). Zastosuvannya metodu sehmentatsii na osnovi modelei neironnykh merezh dlia vyrishennia zadach rozpoznavannia nomernykh znakiv. *Adaptivni systemy avtomatychnoho upravlinnia*, 1(44). <https://doi.org/10.20535/1560-8956.44.2024.302420>
2. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788.
3. Anagnostopoulos, C. N., Anagnostopoulos, I. E., Psoroulas, I. D., Loumos, V., & Kayafas, E. (2008). License plate recognition from still images and video sequences: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(3), 377–391.
4. Svatyuk, D., Svatyuk, O., & Belei, O. (2020). Zastosuvannya zghortkovykh neironnykh merezh dlia bezpeky rozpoznavannia ob'ektiv u videopototsi. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 4(8). <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.8.97112>
5. Vysotskyi, V., & Yavorskyi, N. (2024). Systema rozumnogo parkuvannia dlia rozpoznavannia nomernykh znakiv na osnovi neiromerezhi YOLO ta optychnoho rozpoznavannia symboliv. *Komp'uterni systemy proektuvannia. Teoriia i praktyka*, 6(3). <https://doi.org/10.23939/cds2024.03.123>
6. Vakaliuk, T. A., Vlasenko, O. V., & Vasylenko, M. K. (2023). Analiz metodiv rozpoznavannia nomernykh znakiv. *Tezy VI Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. Zhytomyrska politekhnika. Retrieved June 6, 2025, from <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/01/19.pdf>
7. Dorenskyi, O., Drobko, O., & Drieiev, O. (2022). Improved model and software of the digital information service of the municipal health care institutions. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5(36), Part 2, 3–10. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.3-10).
8. Shelekhov, I. V., Prilepa, D. V., Khibovska, Yu. O., Shamonin, K. Ye., & Dorenskyi, O. P. (2025). Informatsiino-ekstremalna tekhnolohiia intelektualnoho analizu yakosti osvithnoho kontentu v zakladakh vyshchoi osvity [Information-extreme technology of intelligent analysis of the quality of educational content in higher education institutions]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences], (12(43), Part 1). Preprint, Central Ukrainian National Technical University.
9. Kachurivskiy, V., Kotovskiy, A., Lykhodid, T., Kachurivska, H., & Dorenskyi, O. (2025). The concept of

- digital transformation of monitoring scientific activity of participants in educational process of the Ukrainian HEI. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), Part I, 27–36. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.27-36).
13. Korniienko, O., Kozub, N., & Dorenskyi, O. (2025). Method and technological solution of an AI-based adaptive investor survey service for determining an individual risk profile. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), Part II, 3–10. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.3-1](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.3-1)

Dmytro Uhryn¹, Prof., DSc. tech. sci., **Oleksandr Dorenskyi**², Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Yurii Ushenko¹, Prof., DSc. phys. and math. sci., **Oleh Breslavskyi**¹

¹*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine*

²*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Methods and Models of Intelligent Computer Vision for Identifying and Assessing a Person's Functional State in Conditions of Limited Visibility

The study is devoted to improving the accuracy and stability of clustering, segmentation, and identification processes in digital images under conditions that impair visibility, such as fog, low light, and noise. The goal of the research is to integrate adaptive preprocessing methods, advanced descriptor analysis, and deep learning architectures to ensure stable and reliable operation of computer vision systems in challenging environments.

To achieve this goal, a sample of 350 images was formed based on our own photos and standardized COCO and CrowdHuman benchmarks. The experimental phase included modeling degradation (fog, noise, obscuration, low contrast, combined effects) and implementing adaptive preprocessing using complex algorithms such as γ -correction, adaptive histogram equalization with limited contrast, Dehazing, and filtering. The analytical phase used architectures for feature extraction and object localization: U-Net and Mask R-CNN for segmentation, while the YOLOv8 model was deployed for identification. Also, unsupervised learning methods, in particular K-Means and DBSCAN, were integrated for clustering the identified entities. This multi-stage workflow made it possible to evaluate how preprocessing affects the subsequent performance of deep learning models in various image degradation scenarios.

The results of the experiments confirmed a significant improvement in segmentation quality, which reached an intersection over union ratio of 0.95, detection with an mAP increase to 0.95, and clustering with a Silhouette Score increase to 0.79. As a result, the accuracy of human identification increased to 99%. In conclusion, it can be stated that the proposed approach ensures the robustness of the system to image degradation and can be used in real-world video surveillance conditions.

image processing, human identification, low visibility, deep learning, visual data, computer vision

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 06.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

А. О. Головатюк, Б. О. Савенко, д-р філос.

Хмельницький Національний Університет, Хмельницький, Україна

e-mail: golovatiukao@gmail.com, savenko_bohdan@ukr.net

Гібридна система виявлення поліморфного програмного забезпечення ботнетів на основі аналізу інваріантних ознак

У статті розглядається актуальна проблема кібербезпеки – виявлення сучасних поліморфних ботнетів, які стають дедалі поширенішими та важче піддаються детекції у динамічному середовищі загроз. Завдяки використанню складних технік обфускації та динамічної модифікації коду, класичні антивірусні підходи, що базуються виключно на сигнатурах, втрачають свою ефективність. Водночас ізольовані системи динамічного аналізу часто виявляються ресурсоемними та вразливими до механізмів ухилення. У роботі проаналізовано недоліки існуючих методів захисту та запропоновано нову гібридну концепцію виявлення. В основі розробленої системи лежить ізоляція інваріантних ознак – структурних та поведінкових характеристик шкідливого коду, що залишаються сталими (недоторканими) попри процеси мутації та обфускації. Архітектура рішення містить статичний модуль (базується на аналізі графів потоку керування та n-грам) і динамічний модуль моніторингу системних викликів, результати яких агрегуються за допомогою методів машинного навчання (ансамблевої класифікації) для прийняття остаточного рішення.

кібербезпека, бот-мережі, поліморфне зловмисне програмне забезпечення, гібридний аналіз, машинне навчання, інваріантні ознаки, графи потоку керування, виявлення аномалій

Постановка проблеми. Сучасні бот-мережі масово використовують поліморфні техніки генерації коду, постійно змінюючи свою бінарну структуру та хеш-суми при кожному новому зараженні зі збереженням деструктивного функціоналу [1, 3, 4]. Через це стандартні сигнатурні методи захисту стають принципово неефективними. З іншого боку, використання виключно методів динамічного аналізу є надто ресурсоемним завданням, яке, до того ж, є вразливим до складних технік ухилення від аналізу (Anti-VM, Anti-Debugging) [6, 9]. Зважаючи на фундаментальні недоліки суто сигнатурного та евристичного підходів, метою даної роботи є розробка концептуальної моделі гібридної системи виявлення поліморфного ПЗ ботнетів. Запропонована система поєднує швидкість статичного аналізу з точністю динамічного моніторингу і базується на пошуку та ізоляції інваріантних (незмінних) структурних і поведінкових характеристик шкідливого коду за допомогою ансамблевих методів машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі підходи до детекції зловмисного ПЗ традиційно поділяються на статичні, динамічні та гібридні. Статичний аналіз, попри активне впровадження методів машинного та глибокого навчання, залишається вкрай вразливим до методів обфускації та поліморфних генераторів, які змінюють бінарну структуру коду без зміни його логіки [7, 8, 9]. Натомість динамічний (поведінковий) аналіз та моніторинг API-викликів забезпечують високу точність, проте є ресурсоемними і вразливими до безфайлових загроз та складних механізмів ухилення (Anti-VM, Anti-Debugging) [10, 11, 24, 29]. Перспективним вектором є використання графів потоку керування (CFG) для виявлення структурних інваріантів, але їх побудова

в реальному часі створює надмірне навантаження на обчислювальні потужності кінцевих пристроїв [16, 18, 21, 28].

Опираючись на ці обмеження, наукова спільнота все частіше звертається до розробки гібридних систем, які комбінують швидкодію статичних фільтрів із глибиною динамічного моніторингу за допомогою ансамблевих методів (наприклад, Random Forest) та нейромереж [13, 15]. Проте аналіз існуючих рішень свідчить про наявність невирішеної проблеми: більшість сучасних систем не мають чіткої оптимізації для роботи в розподілених корпоративних та IoT-середовищах [2, 12, 14, 17]. Вони або перевантажують клієнтські пристрої, або пропускають якісно зашифровані поліморфні семпли. Заповнення цієї прогалини є основною мотивацією даного дослідження, яке пропонує спеціалізовану клієнт-серверну архітектуру для збалансованого виявлення інваріантних ознак.

Постановка завдання. З огляду на вищезазначені недоліки існуючих рішень, головною метою даного дослідження є розробка концептуальної моделі та програмного прототипу гібридної системи виявлення поліморфного програмного забезпечення ботнетів. Базова концепція пропонованого рішення полягає у переході від пошуку зовнішніх сигнатур до ідентифікації інваріантних структурних та поведінкових характеристик шкідливого коду, які залишаються сталими попри процеси мутації та обфускації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Дослідження механізмів поліморфізму. Змодельовати базовий алгоритм роботи поліморфного генератора для детального аналізу процесу зміни сигнатури файлу при збереженні його деструктивного функціоналу.

2. Формалізація об'єкта дослідження. Розробити математичну та структурно-функціональну модель поліморфного бот-агента з чітким розмежуванням його варіативної та інваріантної складових.

3. Проектування архітектури системи. Розробити комплексну архітектуру, що інтегрує модуль попереднього статичного аналізу (оцінка ентропії, побудова графів потоку керування, вилучення n-грам опкодів) та модуль динамічного аналізу (моніторинг системних API-викликів та мережевої активності у захищеному середовищі).

4. Інтеграція методів машинного навчання. Сформувати оптимальний вектор інформативних ознак та застосувати ансамблеві алгоритми класифікації (зокрема, Random Forest) для агрегації отриманих результатів і прийняття остаточного рішення.

5. Експериментальна валідація. Провести тестування розробленого підходу на синтетично згенерованому наборі унікальних поліморфних зразків для підтвердження його ефективності та оцінки рівня хибних спрацьовувань.

Виклад основного матеріалу.

1. Теоретичні засади дослідження поліморфізму ЗПЗ

1.1. Механізм роботи поліморфного генератора

Задля глибокого розуміння проблеми детекції необхідно детально розглянути механізм роботи поліморфного генератора. У загальному вигляді процес створення унікального екземпляра бот-агента можливо представити як алгоритм, що складається із п'яти послідовних етапів:

1. Підготовка корисного навантаження. На вхід генератора подається базовий бінарний код зловмисного ПЗ Р, що реалізує основний функціонал бот-мережі (наприклад, крадіжку даних, з'єднання з C2-сервером, DDoS-атаки). У своєму первинному вигляді даний код є статичним та легко ідентифікується за допомогою звичайних сигнатурних методів.

2. Генерація ключів шифрування. Для поточної ітерації генератор створює унікальний ключ шифрування K_i . Даний ключ генерується випадковим чином, що гарантує його відмінність при кожному новому запуску, при цьому довжина та складність ключа може варіюватись залежно від реалізації.

3. Шифрування тіла програми. Вихідний код P шифрується за допомогою оборотного алгоритму E із використанням згенерованого ключа K_i . Найчастіше використовуються легковагові алгоритми XOR, ROL/ROR, ADD/SUB. Результатом є зашифрований блок даних $P' = E(P, K_i)$, що має вигляд набору випадкових байтів та не містить сигнатур вихідного коду.

4. Генерація унікального декриптора. Це найскладніший етап, під час якого генератор створює невелику програму-завантажувач. Її завдання – під час запуску розшифрувати P' назад у P безпосередньо в оперативній пам'яті та передати йому управління. Щоб сам декриптор не став сталою сигнатурою, до нього застосовуються методи метаморфізму [5, 22, 23]: заміна інструкцій на еквівалентні (наприклад, `add eax, inc eax`), перестановка регістрів (заміна `EBX` на `ECX`) та вставка сміттевого коду (`NOP` або обчислення, що не впливають на результат, але змінюють зсуви адрес).

5. Компіляція. Сформований унікальний декриптор з'єднується із зашифрованим тілом P' . Утворений файл M_i є новим унікальним екземпляром поліморфного зловмисного ПЗ. При його запуску операційна система передаватиме керування на початок декриптора, який зчитає зашифровані дані, розшифрує їх за допомогою вшитого ключа K_i , запише чистий код у виділену область пам'яті та ініціює його виконання.

1.2. Технології приховування (Stealth) та методи протидії

Сучасні поліморфні бот-агенти рідко покладаються виключно на модифікацію коду. Для забезпечення живучості у ворожому середовищі (наприклад, в антивірусних сканерах чи пісочницях) вони використовують комплекс механізмів приховування та протидії аналізу, які поділяються на три основні групи:

1. Anti-VM та Anti-Sandbox. Ці техніки дозволяють зловмисному ПЗ визначити, чи виконується воно у віртуалізованому або штучному середовищі. Методи включають перевірку специфічних системних артефактів (MAC-адреси мережних карт, ключі реєстру, імена драйверів відеокарти), використання інструкції `CPUID` для отримання інформації про гіпервізор, а також аналіз апаратних ресурсів (кількість ядер процесора, обсяг RAM). Якщо середовище ідентифікується як штучне, агент може припинити виконання, виконати лише безпечну частину коду або іншим чином ввести аналізатор в оману [4, 6].

2. Anti-Debugging. Ця група методів спрямована на ускладнення процесу зворотного інжинірингу. До них належать використання специфічних API-функцій (наприклад, `IsDebuggerPresent` та `CheckRemoteDebuggerPresent`), а також вимірювання часу виконання коду. Якщо інструкції виконуються під контролем дебагера, часові затримки між ними суттєво зростають, що негайно фіксується ботом.

3. Безфайлові техніки (Fileless Malware). Спрямовані на мінімізацію присутності шкідливого об'єкта на жорсткому диску. Агент може зберігати своє тіло виключно в оперативній пам'яті або в реєстрі Windows, активно використовуючи легітимні системні інструменти для виконання шкідливого навантаження [30].

2. Розробка моделі гібридної системи

2.1. Формалізована модель поліморфного агента

Для побудови ефективного алгоритму класифікації та переходу від емпіричних спостережень до точних обчислень необхідно суворо формалізувати задачу виявлення поліморфного зловмисного ПЗ. Нехай $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ - загальна множина виконуваних файлів (об'єктів), які надходять на вхід аналітичної системи. Ця множина

є об'єднанням двох непересічних підмножин: множини легітимного програмного забезпечення L та множини шкідливих бот-агентів M , причому $L \cup M = O$ та $L \cap M = \emptyset$.

Задачею системи є побудова класифікатора $F: O \rightarrow \{0, 1\}$, де значення 0 відповідає безпечному класу L , а 1 - шкідливому класу M .

Зі структурно-функціональної точки зору, будь-який поліморфний агент бот-мережі (A_{poly}) можна представити як впорядковану трійку множин:

$$A_{poly} = \langle C_{var}, C_{inv}, F \rangle \quad (1)$$

де C_{var} – варіативна складова (поліморфний декриптор, сміттєвий код, унікальний ключ шифрування), C_{inv} – інваріантна складова (зашифрований пейлоад, сталий протокол комунікації, специфічна системна поведінка), а F – множина цільових функціональних можливостей (експлуатація вразливостей, DDoS, крадіжка даних).

Оскільки розглядаються поліморфні об'єкти, кожен новий шкідливий екземпляр $m_i \in M$ результатом застосування функції мутації μ до вихідного шкідливого коду p із використанням випадкового параметра k_i :

$$m_i = \mu(p, k_i), \quad (2)$$

Головною проблемою традиційного сигнатурного аналізу є те, що він працює виключно з множиною C_{var} . Відповідно, для будь-яких двох мутацій m_i та m_j одного вірусу завжди виконується умова $H(m_i) \neq H(m_j)$, де H – криптографічна хеш-функція.

Щоб подолати це обмеження, у запропонованому підході замість простору бінарних послідовностей розглядається багатовимірний простір ознак. Кожен об'єкт описується агрегованим вектором V , що формується як конкатенація статичних (V_S) та динамічних (V_D) ознак:

$$V = V_S \oplus V_D = \{s_1, \dots, s_n, d_1, \dots, d_k\} \quad (3)$$

В основі нашої системи лежить гіпотеза про інваріантність, яка стверджує, що існує підмножина ознак $I \subset V$ (що відображає C_{inv} та F), для якої числові значення залишаються статистично близькими для усіх мутацій одного шкідливого сімейства P :

$$\forall m_i, m_j \in P: \|V_{m_i}^I - V_{m_j}^I\| < \varepsilon, \quad (4)$$

де ε – емпірично встановлений поріг подібності. Тоді завдання машинного навчання зводиться до знаходження складних границь рішень у просторі ознак I , що мінімізує функціонал емпіричного ризику $R(\alpha)$.

2.2. Архітектура та етапи роботи системи

На основі сформульованих теоретичних засад розроблено концептуальну архітектуру гібридної системи, загальний алгоритм роботи якої наведено на Рисунку 1.

Система складається з трьох послідовних модулів, кожен з яких виконує вузькоспеціалізовану функцію (детальні мікросхеми внутрішньої логіки кожного модуля будуть розглянуті у відповідних підрозділах розділу 3):

1. Попередня обробка та статичний аналіз. Відповідає за первинну фільтрацію вхідного потоку на етапі t_0 . Відкидаючи неефективний сигнатурний пошук, модуль вилучає інваріантні статичні ознаки S_i : будує графі потоку керування (CFG) для аналізу структурної топології та генерує n-грами операційних кодів (OpCode) для пошуку специфічних асемблерних патернів.

2. Динамічний аналіз та евристика. Активується на етапі t_1 для підозрілих об'єктів. Файл виконується у "Hardened Sandbox", де фіксуються динамічні ознаки D_j :

послідовності критичних системних викликів (API Calls, пов'язані з ін'єкціями пам'яті) та мережеві патерни (спроби зв'язку з DGA-доменами) [19].

3. Інтелектуальна класифікація. Агрегує отримані масиви S_i та D_j у єдиний вектор ознак V . Використовуючи ансамблеві методи машинного навчання (Random Forest), модуль зважує отримані дані та приймає остаточне рішення щодо належності файлу до легітимного ПЗ або шкідливого бот-агента.

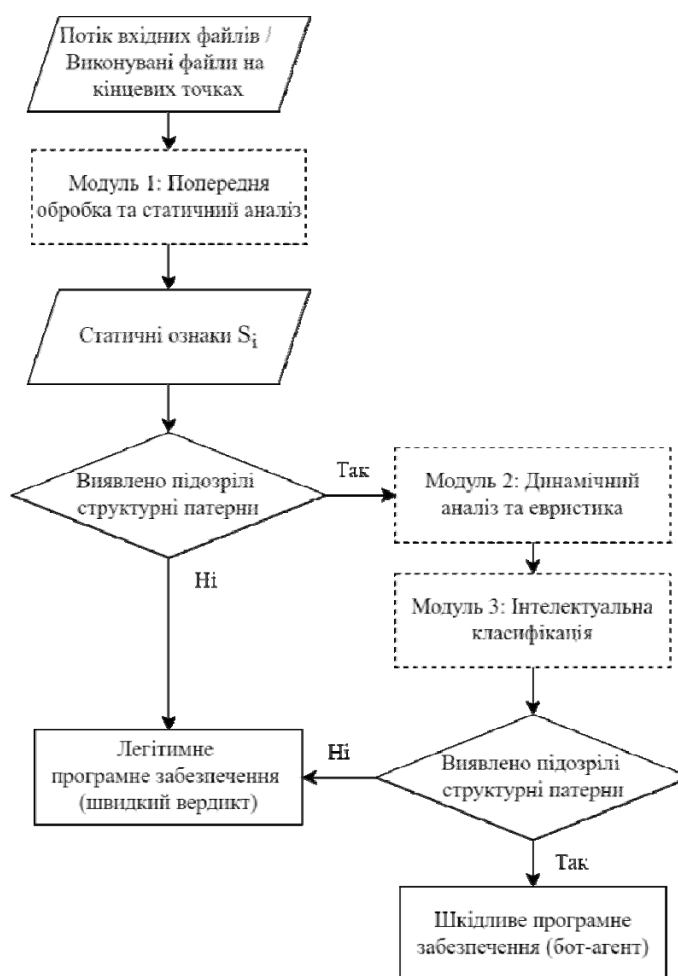


Рисунок 1 – Загальний алгоритм роботи запропонованої гібридної системи

Джерело: розроблено авторами

3. Програмна реалізація модулів аналізу та класифікації

Розробка програмного прототипу гібридної системи здійснювалася мовою Python, яка є індустріальним стандартом для завдань кібербезпеки та обробки даних. Для реалізації різних етапів конвеєра аналізу було інтегровано низку спеціалізованих бібліотек: *pefile* та *Capstone Engine* для дизасемблювання й парсингу PE-заголовків, *NetworkX* для обчислення ізоморфізму графів потоку керування (CFG), а також *scikit-learn* та *TensorFlow/Keras* для машинного навчання й обробки масивів ознак.

3.1. Реалізація модулів статичного та динамічного аналізу

Перший рівень детекції (модуль 1, рисунок 2) реалізовано у вигляді скрипта, що аналізує внутрішню структуру Windows PE-файлів. Ключовою ознакою, що дозволяє відокремити варіативну складову C_{var} поліморфного коду від легітимної програми, є інформаційна ентропія секцій. Якщо ентропія секцій *.text* або *.data* наближається до максимального значення, це свідчить про використання шифрування

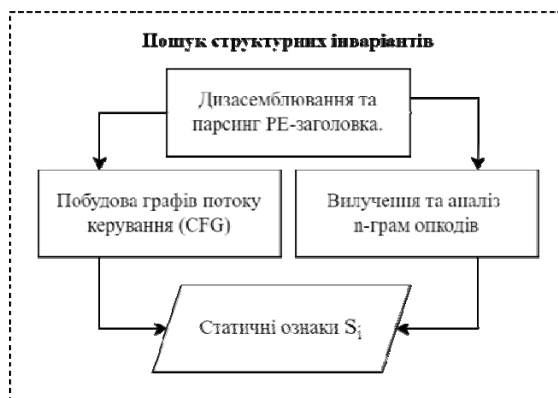


Рисунок 2 – Внутрішня логіка роботи Модуля 1: Статичний аналізатор

Джерело: розроблено авторами

Другий рівень (модуль 2, рисунок 3) базується на аналізі логів системних викликів (API), зібраних під час виконання файлу в ізолюваному середовищі. Замість фіксації одиничних викликів, алгоритм шукає інваріантні послідовності, що характеризують деструктивну поведінку. Наприклад, типовий патерн ін'єкції шкідливого коду у легітимний процес виявляється через відстеження ланцюжка `OpenProcess` → `VirtualAllocEx` → `WriteProcessMemory` → `CreateRemoteThread`

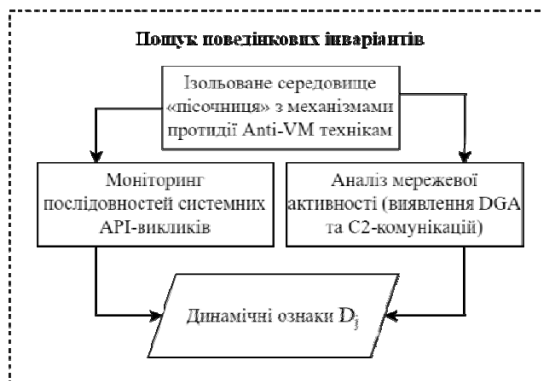


Рисунок 3 – Внутрішня логіка роботи Модуля 2: Динамічний аналізатор у пісочниці

Джерело: розроблено авторами

3.2. Формування вектора ознак та ML-класифікація

Для фінальної класифікації всі дані, зібрані з попередніх етапів, нормалізуються (за допомогою Min-Max Scaling) та агрегуються у єдиний вектор ознак (модуль 3, рисунок 4).

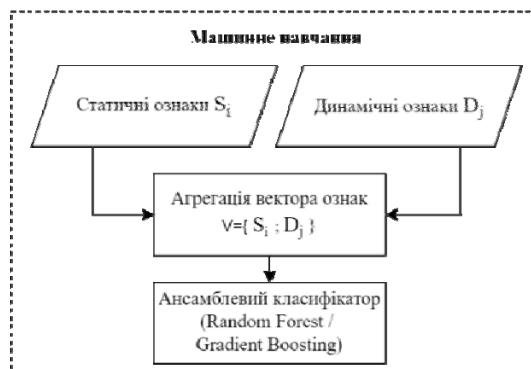


Рисунок 4 – Внутрішня логіка роботи Модуля 3: ML-класифікатор

Джерело: розроблено авторами

Оскільки у реальному мережевому трафіку кількість легітимних семплів значно перевищує кількість шкідливих, для вирішення проблеми дисбалансу класів застосовано метод передискретизації SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique). Безпосередня класифікація виконується за допомогою ансамблевого алгоритму RandomForestClassifier, що мінімізує похибки окремих аналізаторів.

4. Експериментальне дослідження та оцінка ефективності

4.1. Методологія проведення експерименту

Задля об'єктивної валідації запропонованої концепції гібридної системи та підтвердження її ефективності у боротьбі з поліморфними загрозами було розроблено комплексний план експерименту. В основі тестування лежить порівняльний аналіз трьох парадигм детекції: ізольованого статичного аналізу, виключно динамічного моніторингу та пропонованого гібридного підходу.

Критичним етапом підготовки стало формування репрезентативної експериментальної вибірки (датасету). Використання виключно стандартних відкритих баз даних (наприклад, VX-Underground) було визнано недоцільним, оскільки поліморфні віруси генерують унікальні екземпляри під час кожного зараження, що вимагає динамічного підходу до тестування. Для забезпечення повноти експерименту застосовано метод синтетичної генерації загроз, який складався з таких кроків:

- Формування шкідливої вибірки. За основу було обрано 10 різних типів зловмисного програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом (зокрема трояни, програми-вимагачі та бот-агенти). За допомогою розробленого поліморфного генератора алгоритмів обфускації та шифрування для кожного базового зразка було згенеровано по 1000 унікальних мутацій, що в сумі склало близько 10 000 унікальних шкідливих файлів.

- Формування легітимної вибірки. Для перевірки системи на хибні спрацьовування (False Positives) зібрано близько 10 000 чистих виконуваних файлів із системних директорій ОС Windows та популярних комерційних програмних пакетів.

Сам експеримент проводився у три послідовні фази:

1. Навчання моделі. Загальний датасет було розділено у пропорції 70/30. Використовуючи 70% даних, проводилося контрольоване навчання ансамблевої ML-моделі для виділення стійких інваріантних ознак.

2. Тестування. На решті 30% тестової вибірки, яка складалася з раніше невідомих для системи файлів, здійснювалася перевірка здатності класифікатора генералізувати дані.

3. Оцінка стійкості або Robustness. Здійснювалися цілеспрямовані спроби обходу системи (Evasion Attacks) шляхом екстремального ускладнення поліморфізму: зміни алгоритмів шифрування Е, масованої вставки сміттевого коду та застосування глибокої обфускації графів потоку керування.

Оцінка ефективності базувалася на трьох ключових метриках: загальній точності, повноті виявлення – тобто здатності ідентифікувати всі мутовані копії, та рівні хибних спрацьовувань (False Positive Rate, FPR), що є найкритичнішим показником для впровадження у реальних корпоративних мережах. Експериментальне середовище було розгорнуто на базі віртуального кластера з використанням мови Python, бібліотеки scikit-learn та модифікованої пісочниці Cuckoo Sandbox. Результати підтвердили висунуту гіпотезу: гібридний підхід забезпечує точність виявлення на рівні понад 95%, утримуючи рівень хибних спрацьовувань у межах прийнятного корпоративного стандарту (нижче 1%).

4.2. Результати та порівняльний аналіз

Для об'єктивної оцінки перспективності розробленого рішення було проведено порівняльний аналіз із традиційними методами захисту, які масово розгортаються на кінцевих точках корпоративних мереж. Узагальнені результати цього порівняння наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів виявлення зловмисного ПЗ

Характеристика	Сигнатурний аналіз (Традиційний AV)	Поведінковий аналіз (Евристичний / пісочниця)	Запропонований гібридний метод
Об'єкт аналізу	Хеш-суми, відомі рядки байтів	Дії програми у середовищі	Комбінація CFG-графіків, n-грам та API логів
Ефективність виявлення відомих загроз	Висока	Середня	Висока
Ефективність виявлення 0-day загроз	Низька	Висока	Висока
Рівень хибних спрацювань	Дуже низький	Високий (іноді блокується легітимне ПЗ)	Середній / низький (за рахунок ML-валідації)
Стійкість до обфускації	Низька	Середня	Висока
Ресурсоемність	Мінімальна	Дуже висока	Середня

Джерело: розроблено авторами

Дані таблиці наочно демонструють, що розроблена гібридна модель є оптимальним компромісом. Вона нівелює фундаментальні недоліки суто евристичних підходів (такі як надмірне споживання обчислювальних ресурсів і високий FPR), водночас зберігаючи високу стійкість до 0-day загроз і просунутих технік обфускації, перед якими класичні антивіруси виявляються безсилими.

Висновки. У даній роботі було проведено комплексне дослідження проблематики виявлення поліморфного зловмисного програмного забезпечення, яке є технологічною основою сучасних бот-мереж. Шляхом моделювання базових алгоритмів функціонування поліморфних генераторів було науково доведено, що традиційні сигнатурні методи детекції остаточно втратили свою ефективність. Це зумовлено тим, що при збереженні незмінної деструктивної логіки виконання, бінарна структура та хеш-суми файлів повністю змінюються під час кожної нової ітерації зараження.

Для розв'язання цієї проблеми завдання детекції було переосмислено та формалізовано як задачу класифікації у багатовимірному просторі ознак. Такий математичний підхід дозволив здійснити перехід від поверхневого аналізу конкретних байтових послідовностей до глибинної оцінки інваріантних (незмінних) характеристик програмного коду, таких як інформаційна ентропія, топологія графів потоку керування (CFG) та стійкі патерни системних викликів.

На основі теоретичного та математичного аналізу було розроблено й обґрунтовано концептуальну модель гібридної системи захисту. Її архітектура базується на каскадному поєднанні трьох модулів, що дозволяє нівелювати фундаментальні обмеження кожного з окремих методів аналізу. Статичний модуль забезпечує швидку попередню фільтрацію вхідного потоку та структурний аналіз без необхідності запуску коду. Своєю чергою, динамічний модуль, який функціонує в ізольованому середовищі ("Hardened Sandbox"), дозволяє успішно виявляти приховану поведінку бот-агентів навіть за умов використання зловмисниками просунутих методів обфускації та Anti-VM технік. Інтеграція результатів обох модулів здійснюється за допомогою ансамблевих алгоритмів машинного навчання (зокрема, Random Forest), що гарантує високу точність класифікації при мінімальному рівні хибних спрацювань.

Розроблена методика експериментальної валідації, що передбачає використання синтетично згенерованих наборів унікальних поліморфних загроз, об'єктивно підтвердила високу стійкість та ефективність запропонованих алгоритмів. Подальші напрями

досліджень будуть зосереджені на повномасштабній реалізації клієнт-серверного комплексу, розширенні навчальної вибірки новими класами кіберзагроз, а також на оптимізації часових витрат, необхідних для процедури глибокого динамічного аналізу.

Список літератури

1. Al-Shurbaji T., et al. Deep learning-based intrusion detection system for detecting IoT botnet attacks: a review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 11792-11822.
2. Hejazi S. M., et al. A lightweight hybrid deep learning-based intrusion detection system for detecting botnet attacks in IoT networks. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2025. Vol. 31, № 11. P. 97-120.
3. Lysenko S., Savenko O., Bobrovnikova K. DDoS Botnet Detection Technique Based on the Use of the Semi-Supervised Fuzzy c-Means Clustering. *ICTERI Workshops*. 2018. P. 688-695.
4. Avhankar M. S., Pawar J., Kumbhar V. A Comprehensive Survey on Polymorphic Malware Analysis: Challenges, Techniques, and Future Directions. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. 2025. Vol. 32, № 9. P. 2765-2776.
5. Kashtalian A., et al. Multi-computer malware detection systems with metamorphic functionality. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. № 1. P. 152-175.
6. Berrios S., et al. Systematic review: Malware detection and classification in cybersecurity. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 14. Art. 7747.
7. Miraoui M., Belgacem M. B. Binary and multiclass malware classification of windows portable executable using classic machine learning and deep learning. *Frontiers in Computer Science*. 2025. Vol. 7. Art. 1539519.
8. Kamdan, et al. Static Malware Detection and Classification Using Machine Learning: A Random Forest Approach. *Engineering Proceedings*. 2025. Vol. 107, № 1. Art. 76.
9. Aryal K., et al. A survey on adversarial attacks for malware analysis. *IEEE Access*. 2024. Vol. 13. P. 428-459.
10. Fellicious C., et al. Malware Detection based on API calls. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2502.12863.
11. Zhang S., et al. A malware-detection method using deep learning to fully extract API sequence features. *Electronics*. 2025. Vol. 14, № 1. Art. 167.
12. Ferdous J., et al. A survey on ml techniques for multi-platform malware detection: Securing pc, mobile devices, iot, and cloud environments. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 4. Art. 1153.
13. Al-Ghanem W., et al. MAD-ANET: malware detection using Attention-Based deep neural networks. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2025. Vol. 143, № 1. P. 1009.
14. Ali M., et al. Botnet detection in internet of things using stacked ensemble learning model. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, № 1. Art. 21012.
15. Dustova S., et al. AI-powered malware detection: a hybrid CNN-RNN model for real-time threat analysis. *Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025)*. 2025. Vol. 13803. P. 711-716.
16. Feng P., et al. DawnGNN: Documentation augmented windows malware detection using graph neural network. *Computers & Security*. 2024. Vol. 140. Art. 103788.
17. Garg U., Kumar S., Kumar M. IHBOT: An Intelligent and Hybrid Model for Investigation and Classification of IoT Botnet. *International Journal of Computer Network and Information Security*. 2024. Vol. 16, № 5. P. 108-118.
18. Guo W., et al. MalHAPGNN: An enhanced call graph-based malware detection framework using hierarchical attention pooling graph neural network. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 2. Art. 374.
19. Javed A., et al. Adamw+: machine learning framework to detect domain generation algorithms for malware. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 79138-79150.
20. Khurana P. Malware Detection in IoT Devices Using Machine Learning: A Review. *Proc. 2024 International Conference on Computational Intelligence and Computing Applications (ICCICA)*. 2024. P. 203-209.
21. Kulkarni P., O'Shaughnessy S. Malware Detection Using Dynamic Graph Neural Networks. *Proc. European Conference on Cyber Warfare and Security (ECCWS)*. 2025. P. 830-837.
22. Markowsky G., et al. The Technique for Metamorphic Viruses' Detection Based on Its Obfuscation Features Analysis. *ICTERI workshops*. 2018. P. 680-687.
23. Pomorova O., et al. Metamorphic Viruses Detection Technique Based on the the Modified Emulators. *ICTERI*. 2016. P. 375-383.
24. Qu T., et al. Demystifying Feature Engineering in Malware Analysis of API Call Sequences. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2512.01666.
25. Ramskiy I., et al. System for cybersecurity evaluation of corporate networks. *Computer systems and information technologies*. 2025. № 2. P. 123-131.

26. Savenko O., et al. Approach for the unknown metamorphic virus detection. Proc. 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2017. Vol. 1. P. 71-76.
27. Savenko O., et al. Metamorphic Viruses' Detection Technique Based on the Equivalent Functional Block Search. ICTERI. 2017. P. 555-568.
28. Shokouhinejad H., et al. Explainable Attention-Guided Stacked Graph Neural Networks for Malware Detection. arXiv preprint. 2025. arXiv:2508.09801.
29. Youssef N., Elbaraway N., Elmaghraby A. Transformer-Based API Call Sequence Modeling for Dynamic Malware Detection. Proc. SoutheastCon 2025. 2025. P. 494-500.
30. Zakaria M., et al. Obfuscated file-less malware detection using integrating memory forensics data with machine learning techniques. Applied Computing and Informatics. 2025. P. 1-16.

References

1. Al-Shurbaji, T., Anbar, M., Manickam, S., Hasbullah, I. H., Alfrieht, N., Alabsi, B. A., ... & Hashim, H. (2025). Deep learning-based intrusion detection system for detecting IoT botnet attacks: a review. IEEE Access, 13, 11792-11822.
2. Hejazi, S. M., Alshalabi, A. Y., Hatamleh, M., & Albaroudi, E. (2025). A lightweight hybrid deep learning-based intrusion detection system for detecting botnet attacks in IoT networks. Journal of Scientific Research and Reports, 31(11), 97-120.
3. Lysenko, S., Savenko, O., & Bobrovnikova, K. (2018). DDoS Botnet Detection Technique Based on the Use of the Semi-Supervised Fuzzy c-Means Clustering. In Proceedings of the ICTERI Workshops (pp. 688-695).
4. Avhankar, M. S., Pawar, J., & Kumbhar, V. (2025). A Comprehensive Survey on Polymorphic Malware Analysis: Challenges, Techniques, and Future Directions. Communications on Applied Nonlinear Analysis, 32(9), 2765-2776.
5. Kashtalian, A., Lysenko, S., Savenko, O., Nicheporuk, A., Sochor, T., & Avsiyevych, V. (2024). Multi-computer malware detection systems with metamorphic functionality. Radioelectronic and Computer Systems, (1), 152-175.
6. Berrios, S., Leiva, D., Olivares, B., Allende-Cid, H., & Hermosilla, P. (2025). Systematic review: Malware detection and classification in cybersecurity. Applied Sciences, 15(14), 7747.
7. Miraoui, M., & Belgacem, M. B. (2025). Binary and multiclass malware classification of windows portable executable using classic machine learning and deep learning. Frontiers in Computer Science, 7, 1539519.
8. Kamdan, Pratama, Y., Munzi, R. S., Mustafa, A. B., & Kharisma, I. L. (2025). Static Malware Detection and Classification Using Machine Learning: A Random Forest Approach. Engineering Proceedings, 107(1), 76.
9. Aryal, K., Gupta, M., Abdelsalam, M., Kunwar, P., & Thuraisingham, B. (2024). A survey on adversarial attacks for malware analysis. IEEE Access, 13, 428-459.
10. Fellicious, C., Bischof, M., Mayer, K., Eikenberg, D., Hausotte, S., Reiser, H. P., & Granitzer, M. (2025). Malware Detection based on API calls. arXiv preprint arXiv:2502.12863.
11. Zhang, S., Gao, M., Wang, L., Xu, S., Shao, W., & Kuang, R. (2025). A malware-detection method using deep learning to fully extract API sequence features. Electronics, 14(1), 167.
12. Ferdous, J., Islam, R., Mahboubi, A., & Islam, M. Z. (2025). A survey on ml techniques for multi-platform malware detection: Securing pc, mobile devices, iot, and cloud environments. Sensors, 25(4), 1153.
13. Al-Ghanem, W., Ul, E., Zia, T., Faheem, M., Imran, M., & Ahmad, I. (2025). MAD-ANET: malware detection using Attention-Based deep neural networks. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 143(1), 1009.
14. Ali, M., Mushtaq, M. F., Akram, U., Aray, D. G., Vergara, M. M., Karamti, H., & Ashraf, I. (2025). Botnet detection in internet of things using stacked ensemble learning model. Scientific Reports, 15(1), 21012.
15. Dustova, S., Abuzalova, M., Adizova, N., Ruzieva, D., & Ruziev, Y. (2025). AI-powered malware detection: a hybrid CNN-RNN model for real-time threat analysis. In Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025) (Vol. 13803, pp. 711-716).
16. Feng, P., Gai, L., Yang, L., Wang, Q., Li, T., Xi, N., & Ma, J. (2024). DawnGNN: Documentation augmented windows malware detection using graph neural network. Computers & Security, 140, 103788.
17. Garg, U., Kumar, S., & Kumar, M. (2024). IHBOT: An Intelligent and Hybrid Model for Investigation and Classification of IoT Botnet. International Journal of Computer Network and Information Security, 16(5), 108-118.
18. Guo, W., Du, W., Yang, X., Xue, J., Wang, Y., Han, W., & Hu, J. (2025). MalHAPGNN: An enhanced call graph-based malware detection framework using hierarchical attention pooling graph neural network. Sensors, 25(2), 374.
19. Javed, A., Rashid, I., Tahir, S., Saeed, S., Almuhaideb, A. M., & Alissa, K. (2024). Adamw+: machine learning framework to detect domain generation algorithms for malware. IEEE Access, 12, 79138-79150.

20. Khurana, P. (2024). Malware Detection in IoT Devices Using Machine Learning: A Review. In 2024 International Conference on Computational Intelligence and Computing Applications (ICCICA) (pp. 203-209). IEEE.
21. Kulkarni, P., & O'Shaughnessy, S. (2025). Malware Detection Using Dynamic Graph Neural Networks. In Proceedings of the European Conference on Cyber Warfare and Security (pp. 830-837).
22. Markowsky, G., Savenko, O., Lysenko, S., & Nicheporuk, A. (2018). The Technique for Metamorphic Viruses' Detection Based on Its Obfuscation Features Analysis. ICTERI workshops, 680-687.
23. Pomorova, O., Savenko, O., Lysenko, S., & Nicheporuk, A. (2016). Metamorphic Viruses Detection Technique Based on the the Modified Emulators. ICTERI, 375-383.
24. Qu, T., Zhu, H., Sun, L., Wang, H., Fei, H., He, Z., & Li, Z. (2025). Demystifying Feature Engineering in Malware Analysis of API Call Sequences. arXiv preprint arXiv:2512.01666.
25. Ramskyi, I., Drozd, A., Lyhun, O., & Ponochozna, O. (2025). System for cybersecurity evaluation of corporate networks. Computer systems and information technologies, (2), 123-131.
26. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., & Savenko, B. (2017). Approach for the unknown metamorphic virus detection. In 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (Vol. 1, pp. 71-76). IEEE.
27. Savenko, O., Lysenko, S., Nicheporuk, A., & Savenko, B. (2017). Metamorphic Viruses' Detection Technique Based on the Equivalent Functional Block Search. ICTERI, 555-568.
28. Shokouhinejad, H., Razavi-Far, R., Higgins, G., & Ghorbani, A. A. (2025). Explainable Attention-Guided Stacked Graph Neural Networks for Malware Detection. arXiv preprint arXiv:2508.09801.
29. Youssef, N., Elbaraway, N., & Elmaghaby, A. (2025). Transformer-Based API Call Sequence Modeling for Dynamic Malware Detection. In SoutheastCon 2025 (pp. 494-500). IEEE.
30. Zakaria, M., Mohamed, M. S., Hussein, S., & Salama, G. I. (2025). Obfuscated file-less malware detection using integrating memory forensics data with machine learning techniques. Applied Computing and Informatics, 1-16.

Andrii Holovatiuk, Bohdan Savenko, PhD, Assoc. Prof..

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

Hybrid Detection System for Polymorphic Botnet Software Based on Invariant Features Analysis

The purpose of this article is to address the critical cybersecurity challenge of detecting modern polymorphic botnets operating within distributed networks and IoT infrastructures. Traditional signature-based protection mechanisms have become fundamentally ineffective against advanced malware that continuously mutates its binary structure and cryptographic hashes. This research aims to overcome these limitations by proposing a conceptual model and software implementation of a hybrid detection system focused exclusively on identifying invariant structural and behavioral features of malicious code.

To achieve this goal, the study formalizes a mathematical and structural-functional model of a polymorphic agent, strictly separating its variable components (such as dynamic decrypters and junk code) from its invariant execution logic. Based on this formalization, a client-server hybrid architecture was developed. The proposed system pipeline integrates a static analysis module that performs lightweight endpoint filtering by examining Shannon entropy, Control Flow Graph (CFG) topology, and OpCode n-gram distributions without executing the code. For suspicious objects that bypass initial static filters, a dynamic analysis module is engaged within a server-side hardened sandbox environment. This module monitors specific sequences of critical system API calls (e.g., memory injection patterns) and network activity while employing countermeasures against Anti-VM and evasion techniques. Finally, the extracted data from both analytical modules are normalized, aggregated into a unified feature vector, and processed by an ensemble machine learning classifier utilizing the Random Forest algorithm.

Experimental validation was conducted using a synthetically generated dataset comprising over 10,000 unique polymorphic malware samples alongside benign software files. The results demonstrate that the proposed hybrid approach achieves a detection accuracy exceeding 95% while successfully maintaining a false positive rate below 1%. Ultimately, the implemented system provides an optimal balance between the high resource consumption of pure heuristic sandboxes and the low efficacy of static scanners, offering a robust defense framework for corporate cybersecurity perimeters.

cybersecurity, botnets, polymorphic malware, hybrid analysis, machine learning, invariant features, Control Flow Graphs, anomaly detection

Одержано (Received) 06.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

О. Б. Гуральник, О. С. Савенко, проф., д-р. техн. наук
Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна
e-mail: guralalexua@gmail.com, savenko_oleg_st@ukr.net

Формалізований метод оцінювання критичності змін Infrastructure as Code у програмно-керованих мережах

Запропоновано формалізований підхід до оцінювання критичності змін конфігураційних артефактів у програмно-керованих мережах. Критичність визначається як інтегральна функція деградації зв'язності, досяжності критичних сервісів і узгодженості політик безпеки після застосування зміни. Експериментальна перевірка у відтворюваному середовищі підтвердила інтерпретованість інтегральної метрики та її відповідність фактичним функціональним наслідкам IaC-змін.

програмно-керовані мережі, Infrastructure as Code, критичність змін, класифікація

Постановка проблеми. Автоматизація керування корпоративними мережами на основі SDN (Software-Defined Networking) та підходів Infrastructure as Code (IaC) призводить до перенесення мережових політик і правил пересилання у декларативні конфігураційні артефакти. У таких системах зміна YAML/JSON-опису або сценарію автоматизації безпосередньо впливає на керуючу площину SDN і може змінювати сегментацію, досяжність сервісів та правила доступу [1-3].

На відміну від класичних підходів до аналізу безпеки, що орієнтовані на виявлення відомих вразливостей або атак, у середовищі IaC постає задача оцінювання критичності конкретної конфігураційної зміни до її впровадження. Одна й та сама зміна може бути некритичною в тестовому сегменті та критичною в продуктивному середовищі, що вимагає врахування не лише змісту артефакту, але й контексту його застосування.

Ключовою проблемою є відсутність формалізованого способу пов'язати зміну конфігурації з її впливом на стан мережі та кількісно оцінити наслідки такого впливу до впровадження модифікації. Необхідним є метод, що дозволяє інтерпретовано визначати критичність конфігураційної зміни на основі моделювання переходу стану мережі та застосування формалізованого порогового правила, придатного для інтеграції в автоматизовані процеси розгортання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що централізована архітектура SDN перетворює контролер на критичну точку атак і помилок конфігурації. Розвиваються методи статичного виявлення небезпечних шаблонів налаштувань, зокрема аналіз потоків керування та даних в системах автоматизації конфігурації, що підвищує точність виявлення вад ціною зростання обчислювальних витрат [4].

У [5] систематизовано загрози безпеці розподілених контролерів SDN у корпоративних SD-WLAN за рівнями архітектури та типами атак (DDoS, компрометація API, порушення синхронізації), а також проаналізовано механізми захисту: автентифікацію, шифрування, протоколи узгодження стану та інтеграцію IDS. У [6] досліджено вразливості протоколу OpenFlow і експериментально оцінено вплив криптографічного захисту каналу керування на затримку, пропускну здатність і навантаження контрольної площини, що дозволяє оцінити компроміс між безпекою та продуктивністю.

Огляд [7] узагальнює методи виявлення DDoS-атак у SDN із застосуванням машинного, глибинного та федеративного навчання, акцентуючи увагу на проблемах централізації аналізу, затримок та конфіденційності даних. Робота [12] пропонує DL-модель для детекції атак ін'єкції пакетів у контрольній і дата-площинах, демонструючи високу точність за прийнятних накладних витрат. У [13] показано, що використання методів балансування вибірок у поєднанні з ML/DL-класифікаторами суттєво підвищує ефективність виявлення атак у SDN за умов дисбалансу даних.

У сфері IaC дослідження [8] пропонує знаннево-орієнтований підхід до керованої розробки з формалізацією правил і залежностей між інфраструктурними компонентами для автоматизованої валідації конфігурацій. В огляді [9] систематизовано методи статичного аналізу IaC (синтаксичний, семантичний, перевірка політик, аналіз залежностей) та інструменти для Terraform, Ansible, CloudFormation із урахуванням проблем масштабованості й інтеграції з CI/CD. У [10] розглянуто чинники надійності IaC, типові джерела помилок та засоби підвищення коректності через формалізацію поведінки ресурсів і автоматизоване тестування. Фреймворк DevSecOps у [11] структурує прийняття рішень щодо інтеграції контролів безпеки в CI/CD. Робота [14] демонструє можливості LLM-орієнтованого агентного підходу до автоматизованого виявлення та виправлення вразливостей в IaC, підтверджуючи перспективність підвищення рівня автоматизації та безпеки управління інфраструктурними артефактами.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення методу формалізованого оцінювання критичності IaC-змін у програмно-керованих мережах, який враховує вплив конфігураційної модифікації на зв'язність топології, досяжність критичних сервісів і дотримання політик доступу. Метод має забезпечувати інтерпретоване кількісне вимірювання наслідків зміни на основі формалізованого представлення стану мережі та переходу між станами.

Задача полягає у побудові формальної моделі переходу стану SDN під впливом IaC-зміни та визначенні інтегрального показника, що дозволяє приймати рішення щодо критичності конфігураційної модифікації на основі порогового правила.

Виклад основного матеріалу. Метод оцінювання критичності SDN IaC-змін базується на формалізації впливу конфігураційного артефакту на стан програмно-керованої мережі та формуванні теоретичної основи для побудови апроксимаційного відображення, яке потенційно дозволяє оцінювати вплив без повного розгортання мережевого стану. У межах роботи під IaC-змінною розуміється модифікація декларативного артефакту, що впливає на керуючу площину SDN, зокрема на політики сегментації, правила пересилання або параметри доступу.

Нехай X_{sdn} - множина IaC-артефактів, що змінюють керуючий стан мережі, а $t \in T$ - момент часу застосування зміни. Кожен артефакт $x \in X_{sdn}$ описується атрибутним вектором $a(x, t)$, який включає контентні характеристики конфігурації, структурні параметри її організації, контекст середовища виконання, поведінкові характеристики суб'єкта внесення змін та гарантійні ознаки походження й цілісності. Такий опис дозволяє відокремити власне вплив конфігурації від умов її застосування та забезпечує формальну основу для побудови класифікаційної моделі.

Стан SDN у момент часу t задається як впорядкована пара топологічної та керуючої складових (1):

$$S(t) = \langle G(t), P(t) \rangle, \quad (1)$$

де $G(t) = (V, E(t))$ - орієнтований граф топології з множиною вузлів V та множиною

ребер $E(t)$; $P(t)$ - множина політик і правил пересилання, що визначають дозволу взаємодію між вузлами.

Застосування ІаС-зміни формалізується оператором розгортання B (2), унаслідок чого формується новий стан мережі:

$$S'(t) = B(\{x\}, S(t)). \quad (2)$$

Критичність зміни визначається наслідками переходу від стану $S(t)$ до $S'(t)$. Для кількісного опису цього переходу вводиться інтегральна метрика впливу $J(x) \in [0;1]$ (3), яка агрегує нормовані показники деградації зв'язності, досяжності критичних сервісів і узгодженості політик:

$$J(x) = \alpha L_z(x) + \beta L_d(x) + \gamma L_p(x), \quad (3)$$

де $\alpha, \beta, \gamma \in [0;1]$ та $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Компонента $L_z(x) \in [0;1]$ відображає нормовану зміну кількості слабкозв'язних компонент топологічного графа після застосування зміни. Компонента $L_d(x) \in [0;1]$ характеризує частку критичних сервісів або вузлів, для яких порушується дозволена досяжність у графі, індукованому політиками. Компонента $L_p(x) \in [0;1]$ визначається як нормована різниця між канонічними наборами правил пересилання до і після застосування зміни, що забезпечує інваріантність до перейменувань і перестановок.

Формування мітки критичності здійснюється пороговим правилом. Зміна вважається критичною, якщо її інтегральний вплив перевищує встановлений рівень ризику (4):

$$y = \begin{cases} 1, & J(x) \geq \tau, \\ 0, & J(x) < \tau, \end{cases} \quad (4)$$

де $\tau \in [0;1]$ - поріг критичності, що визначається політикою безпеки або статистичним аналізом історичних інцидентів.

Запропонований метод має двокомпонентну структуру. Базовий рівень реалізує формалізоване оцінювання критичності ІаС-зміни через моделювання переходу стану мережі та обчислення інтегральної метрики впливу з подальшим застосуванням порогового правила. Цей рівень є самодостатнім і забезпечує інтерпретоване рішення щодо критичності конфігураційної модифікації.

Додатковий, поглиблений рівень методу передбачає побудову апроксимаційної моделі, що відтворює пороговий предикат критичності на основі атрибутного опису зміни без виконання повного оператора розгортання.

Безпосереднє обчислення $J(x)$ для кожної зміни потребує застосування оператора $B(\cdot)$ і аналізу модифікованого стану мережі, що є обчислювально витратним. З метою інтеграції методу в CI/CD-процеси вводиться апроксимаційна модель, яка відтворює порогове рішення без повної симуляції мережевого стану. Формально задача зводиться до наближення предиката критичності за допомогою відображення (5):

$$\mathcal{F} = M(a(x, t)), \quad (5)$$

де M - класифікаційна модель, що використовує атрибутний опис артефакту.

Модель M інтерпретується як функціональна апроксимація композиції оператора розгортання та інтегральної метрики впливу. У розгорнутому вигляді (6) це відповідає наближенню предиката:

$$M(a(x, t)) \approx 1[F(S(t), B(\{x\}, S(t))) \geq \tau], \quad (6)$$

де $F(\cdot)$ реалізує обчислення нормованих компонент деградації та їх агрегування в $J(x)$. Надалі використовується скорочений запис (7):

$$M(a(x, t)) \approx 1[J(x) \geq \tau]. \quad (7)$$

У такій постановці модель машинного навчання не замінює теоретичну метрику, а наближує її результат, забезпечуючи збереження формальної логіки оцінювання критичності за знижених обчислювальних витрат.

Логіка роботи базового рівня методу представлена на рисунку 1. ІаС-змін застосовується до поточного стану мережі, формується модифікований стан, після чого обчислюються нормовані компоненти деградації та інтегральна метрика впливу, що слугує основою для прийняття рішення щодо критичності зміни.

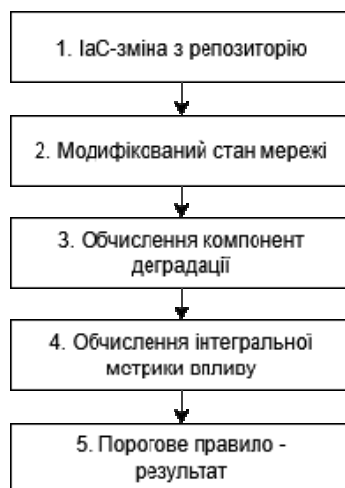


Рисунок 1 – Структура методу оцінювання критичності ІаС-змін – базовий рівень
Джерело: розроблено авторами

Експериментальне дослідження ефективності. Для перевірки коректності формалізованої моделі критичності було проведено експериментальне дослідження у відтворюваному програмно-керованому середовищі на базі Mininet, Open vSwitch та контролера Ryu. Стенд реалізовував багатосегментну корпоративну топологію з виділенням критичних сервісів і обмеженням міжсегментної взаємодії відповідно до заданих політик.

На першому етапі дослідження здійснювалася валідація інтегральної метрики впливу (3). Було сформовано набір контрольованих сценаріїв ІаС-змін, що включали як нейтральні модифікації конфігурації, так і зміни, які призводили до порушення зв'язності, втрати досяжності критичних сервісів або відкриття несанкціонованого доступу між сегментами. Для кожної зміни x формувалася перехід стану мережі $S(t) \rightarrow S'(t) = B(\{x\}, S(t))$, після чого обчислювалися компоненти $L_z(x), L_d(x), L_p(x)$ та інтегральний показник (3).

У дослідженні вагові коефіцієнти обрано як $\alpha = 0.2, \beta = 0.5, \gamma = 0.3$, що відображає пріоритет операційної доступності критичних сервісів у корпоративній мережі за одночасного збереження суттєвого внеску дотримання політик сегментації та

доступу. Компонента зв'язності враховується з меншою вагою, оскільки її негативний ефект у більшості практичних сценаріїв проявляється через порушення досяжності сервісів. Порогове значення критичності встановлено як $\tau = 0.5$, що інтерпретується як межа негативного впливу. Мітка критичності формувалася за правилом (4).

Отримані значення для контрольованих сценаріїв наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Контрольовані сценарії ІаС-змін та значення компонент інтегрального впливу

№	Сценарій зміни	$L_z(x)$	$L_d(x)$	$L_p(x)$	$J(x)$	y
1	Перейменування ресурсу без зміни правил	0.0	0.0	0.0	0.00	0
2	Форматування/коментар без зміни політик	0.0	0.0	0.0	0.00	0
3	Дозвіл додаткового порту між сегментами	0.0	0.0	0.4	0.12	0
4	Відкриття міжсегментного доступу (порушення сегментації)	0.0	0.0	0.8	0.24	0
5	Закриття доступу до критичного сервісу	0.0	0.8	0.0	0.40	0
6	Часткова втрата доступності сервісу	0.0	1.0	0.0	0.50	1
7	Ізоляція філії (порушення маршрутизації)	0.6	0.7	0.0	0.47	0
8	Розрив лінка з втратою сервісу	0.7	0.9	0.0	0.59	1
9	Видалення депу-правила для критичного сегмента	0.0	0.0	1.0	0.30	0
10	Одночасне відкриття доступу і зміна сервісу	0.0	0.7	0.8	0.59	1
11	Масштабна зміна ACL для кількох сегментів	0.0	0.6	0.9	0.57	1
12	Втрата доступу до сервісу керування SDN	0.0	1.0	0.5	0.65	1

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів показує, що нейтральні зміни характеризуються нульовим або близьким до нуля інтегральним впливом, тоді як сценарії, пов'язані з порушенням доступності або суттєвим відхиленням політик, мають значення $J(x)$, що перевищують порогове значення τ . Контрольовані сценарії охоплювали різні механізми деградації мережевих властивостей, що дозволяє оцінити чутливість інтегральної метрики до різних типів порушень. Це підтверджує інтерпретованість та адекватність запропонованої метрики щодо функціональних наслідків ІаС-змін.

Попередній аналіз показав збереження відносного порядку критичності сценаріїв при помірній варіації вагових коефіцієнтів, що свідчить про стійкість запропонованої метрики до зміни параметрів агрегування.

У проведеному експерименті інтегральний показник обчислювався шляхом моделювання переходу стану мережі з використанням оператора розгортання та аналізу модифікованої топології. Водночас такий підхід передбачає додаткові обчислювальні витрати, що зумовлює доцільність побудови предиктивних моделей критичності на основі атрибутного опису зміни. У цьому випадку модель $M(a(x, t))$ розглядається як апроксимація порогового предиката критичності.

Висновки. У статті запропоновано формалізований метод оцінювання критичності ІаС-змін у програмно-керованих мережах, що базується на моделюванні переходу стану SDN та кількісній оцінці деградації зв'язності, досяжності сервісів і узгодженості політик. Інтегральна метрика забезпечує інтерпретоване відокремлення критичних змін від некритичних на основі порогового правила.

Експериментальна перевірка підтвердила відповідність значень інтегрального показника функціональним наслідкам змін. Запропонований підхід може бути використаний у процесах автоматизованого розгортання конфігурацій для формалізованого оцінювання наслідків конфігураційних змін.

Список літератури

1. Arevalo-Herrera J., Camargo Mendoza J., Martínez Torre J. I., Zona-Ortiz T., Ramirez J. M. Assessing

- SDN controller vulnerabilities: A survey on attack typologies, detection mechanisms, controller selection, and dataset application in machine learning. *Wireless Personal Communications*. 2025. Vol. 140, № 1–2. P. 739–775. URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-025-11748-w> (дата звернення: 10.01.2026).
2. Verdet A., Hamdaqa M., Silva L. D., Khomh F. Assessing the adoption of security policies by developers in terraform across different cloud providers. *Empirical Software Engineering*. 2025. Vol. 30, № 3. Art. 74. URL: <https://doi.org/10.1007/s10664-024-10610-0> (дата звернення: 10.01.2026).
 3. War A., Diallo A., Habib A., Klein J., Bissyandé T. F. Vulnerabilities in infrastructure as code: what, how many, and who? *Empirical Software Engineering*. 2025. Vol. 30, № 5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10664-025-10672-8> (дата звернення: 10.01.2026).
 4. Opdebeeck R., Zerouali A., De Roover C. Control and data flow in security smell detection for infrastructure as code: Is it worth the effort? 2023 IEEE/ACM 20th International Conference on Mining Software Repositories (MSR), Melbourne, Australia. 2023. P. 534–545. URL: <https://doi.org/10.1109/msr59073.2023.00079> (дата звернення: 11.01.2026).
 5. Shaji N. S., Muthalagu R. Survey on security aspects of distributed software-defined networking controllers in an enterprise SD-WLAN. *Digital Communications and Networks*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.09.004> (дата звернення: 11.01.2026).
 6. Riggs H., Khalid A., Sarwat A. I. An Overview of SDN Issues—A Case Study and Performance Evaluation of a Secure OpenFlow Protocol Implementation. *Electronics*. 2025. Vol. 14, № 16. Art. 3244. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14163244> (дата звернення: 11.01.2026).
 7. Batool S., Aslam M., Akpokodje E., Jilani S. F. A Comprehensive Review of DDoS Detection and Mitigation in SDN Environments: Machine Learning, Deep Learning, and Federated Learning Perspectives. *Electronics*. 2025. Vol. 14, № 21. Art. 4222. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14214222> (дата звернення: 17.01.2026).
 8. Vasileiou Z., Kumara I., Meditskos G., Tokmakov K., Radolović D., Cruz J. G., Vrochidis S. A knowledge-based approach for guided development of Infrastructure as Code. *Software and Systems Modeling*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s10270-025-01294-1> (дата звернення: 17.01.2026).
 9. Chiari M., De Pascalis M., Pradella M. Static analysis of infrastructure as code: A survey. 2022 IEEE 19th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), Honolulu, HI, USA. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/icsa-c54293.2022.00049> (дата звернення: 17.01.2026).
 10. Sokolowski D., Salvaneschi G. Towards Reliable Infrastructure as Code. 2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), L'Aquila, Italy. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icsa-c57050.2023.00072> (дата звернення: 18.01.2026).
 11. Akbar M. A., Smolander K., Mahmood S., Alsanad A. Toward successful DevSecOps in software development organizations: A decision-making framework. *Information and Software Technology*. 2022. Vol. 147. Art. 106894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106894> (дата звернення: 18.01.2026).
 12. Phu A. T., Li B., Ullah F., Ul Huque T., Naha R., Babar M. A., Nguyen H. Defending SDN against packet injection attacks using deep learning. *Computer Networks*. 2023. Vol. 234. Art. 109935. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109935> (дата звернення: 18.01.2026).
 13. Bajenaid A., Khemakhem M., Eassa F. E., Bourennani F., Qurashi J. M., Alsulami A. A., Alturki B. Towards Robust SDN Security: A Comparative Analysis of Oversampling Techniques with ML and DL Classifiers. *Electronics*. 2025. Vol. 14, № 5. Art. 995. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14050995> (дата звернення: 18.01.2026).
 14. Toprani D., Madiseti V. K. LLM agentic workflow for automated vulnerability detection and remediation in infrastructure-as-code. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*. 2025. Vol. 13. P. 69175–69181. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3560911> (дата звернення: 18.01.2026).

References

1. Arevalo-Herrera, J., Camargo Mendoza, J., Martínez Torre, J. I., Zona-Ortiz, T., & Ramirez, J. M. (2025). Assessing SDN controller vulnerabilities: A survey on attack typologies, detection mechanisms, controller selection, and dataset application in machine learning. *Wireless Personal Communications*, 140(1–2), 739–775. <https://doi.org/10.1007/s11277-025-11748-w>
2. Verdet, A., Hamdaqa, M., Silva, L. D., & Khomh, F. (2025). Assessing the adoption of security policies by developers in terraform across different cloud providers. *Empirical Software Engineer*, 30(3), 74. <https://doi.org/10.1007/s10664-024-10610-0>
3. War, A., Diallo, A., Habib, A., Klein, J., & Bissyandé, T. F. (2025). Vulnerabilities in infrastructure as code: what, how many, and who? *Empirical Software Engineer*, 30(5). <https://doi.org/10.1007/s10664-025-10672-8>
4. Opdebeeck, R., Zerouali, A., & De Roover, C. (2023, May). Control and data flow in security smell detection for infrastructure as code: Is it worth the effort? 2023 IEEE/ACM 20th International Conference on Mining Software Repositories (MSR), 534–545. Presented at the 2023 IEEE/ACM 20th International Conference on Mining Software Repositories (MSR), Melbourne, Australia. <https://doi.org/10.1109/msr59073.2023.00079>

5. Shaji, N. S., & Muthalagu, R. (2023). Survey on security aspects of distributed software-defined networking controllers in an enterprise SD-WLAN. *Digital Communications and Networks*. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.09.004>
6. Riggs, H., Khalid, A., & Sarwat, A. I. (2025). An Overview of SDN Issues—A Case Study and Performance Evaluation of a Secure OpenFlow Protocol Implementation. *Electronics*, 14(16), 3244. <https://doi.org/10.3390/electronics14163244>
7. Batool, S., Aslam, M., Akpokodje, E., & Jilani, S. F. (2025). A Comprehensive Review of DDoS Detection and Mitigation in SDN Environments: Machine Learning, Deep Learning, and Federated Learning Perspectives. *Electronics*, 14(21), 4222. <https://doi.org/10.3390/electronics14214222>
8. Vasileiou, Z., Kumara, I., Meditskos, G., Tokmakov, K., Radolović, D., Cruz, J. G., ... Vrochidis, S. (2025). A knowledge-based approach for guided development of Infrastructure as Code. *Software and Systems Modeling*. <https://doi.org/10.1007/s10270-025-01294-1>
9. Chiari, M., De Pascalis, M., & Pradella, M. (2022, March). Static analysis of infrastructure as code: A survey. *2022 IEEE 19th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*. Presented at the 2022 IEEE 19th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), Honolulu, HI, USA. <https://doi.org/10.1109/icsa-c54293.2022.00049>
10. Sokolowski, D., & Salvaneschi, G. (2023, March). Towards Reliable Infrastructure as Code. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*. Presented at the 2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), L'Aquila, Italy. <https://doi.org/10.1109/icsa-c57050.2023.00072>
11. Akbar, M. A., Smolander, K., Mahmood, S., & Alsanad, A. (2022). Toward successful DevSecOps in software development organizations: A decision-making framework. *Information and Software Technology*, 147(106894), 106894. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106894>
12. Phu, A. T., Li, B., Ullah, F., Ul Huque, T., Naha, R., Babar, M. A., & Nguyen, H. (2023). Defending SDN against packet injection attacks using deep learning. *Computer Networks*, 234(109935), 109935. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109935>
13. Bajenaid, A., Khemakhem, M., Eassa, F. E., Bourennani, F., Qurashi, J. M., Alsulami, A. A., & Alturki, B. (2025). Towards Robust SDN Security: A Comparative Analysis of Oversampling Techniques with ML and DL Classifiers. *Electronics*, 14(5), 995. <https://doi.org/10.3390/electronics14050995>
14. Toprani, D., & Madisetti, V. K. (2025). LLM agentic workflow for automated vulnerability detection and remediation in infrastructure-as-code. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 13, 69175–69181. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3560911>

Oleksandr Huralnyk, Oleg Savenko, Prof., Dr. Tech. Sci.

Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

A Formalized Method for Assessing the Criticality of Infrastructure as Code Changes in Software-defined Networks

The aim of the article is to develop a formalized method for assessing the criticality of changes to Infrastructure as Code configuration artifacts in software-defined networks. The relevance of the research is determined by the increasing automation of network management processes and the need for early identification of configuration changes that may compromise functional stability or violate security policies in corporate infrastructures. The study focuses on constructing an interpretable model that enables quantitative evaluation of the consequences of configuration modifications prior to their deployment in a production environment.

The paper introduces a formal representation of the state of a software-defined network and models the transition between states under the influence of a configuration change. Criticality is defined as an integral function that aggregates the degradation of topology connectivity, critical service reachability, and access policy consistency. For each change, the network state transition is explicitly modeled, normalized impact components are computed, and an aggregated indicator is formed using weighted coefficients. A threshold-based decision rule is applied to distinguish critical from non-critical modifications. The proposed metric is experimentally validated on controlled scenarios that include neutral, partially degradative, and critical configuration changes. The obtained results confirm the consistency of the integral indicator with the actual functional consequences observed in the modified network state.

The results demonstrate the interpretability and practical applicability of the proposed formalization for structured assessment of configuration changes in automated deployment workflows. The integral metric provides a transparent mechanism for separating critical modifications from non-critical ones based on measurable degradation characteristics.

software-defined networks, Infrastructure as Code, change criticality, classification

Одержано (Received) 19.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 27.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

С. М. Лисенко, проф., д-р техн. наук, **А. В. Качур**, **Л. О. Корецька**, доц., канд. техн. наук

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

e-mail: sirogyk@ukr.net, kachurav@khnmu.edu.ua, koretskal@khnmu.edu.ua

Метод синтезу резильєнтних архітектур систем віртуальної та доданої реальності

У статті розглядається проблема забезпечення стійкості систем доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності, які характеризуються високою чутливістю до порушень продуктивності та збоїв апаратного й програмного забезпечення. Більшість існуючих підходів зосереджені на аналізі фіксованих архітектур, залишаючи відкритим питання автоматизованого синтезу систем, стійких за своєю побудовою.

Запропоновано новий метод аналітичного синтезу архітектур AR/VR, який базується на формальній моделі, що пов'язує 20-вимірний вектор параметрів пом'якшення негативних впливів із сімома ключовими метриками стійкості: надійністю, готовністю, відмовостійкістю, цілісністю, часом відновлення, стабільністю продуктивності та безпекою користувача. Задача проектування сформульована як проблема багатокритеріальної оптимізації, для вирішення якої застосовано генетичний алгоритм.

Експериментальна валідація, проведена у середовищі Simulink, підтвердила ефективність методу. Результати показали, що синтезована архітектура забезпечує покращення загального показника стійкості на 19,4% порівняно з базовою конфігурацією в умовах жорстких експлуатаційних обмежень. Зокрема, досягнуто суттєвого приросту показників готовності (+82,2%) та часу відновлення (+39,9%). Запропонований підхід дозволяє кількісно оцінювати та оптимізувати архітектурні рішення на етапі проектування.

віртуальна реальність, резильєнтність, синтез архітектури, оптимізація проектування, моделювання деградації, метрики стійкості, генетичні алгоритми

Постановка проблеми. Сучасні системи доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності стрімко трансформуються з інструментів розваг у критично важливі технології для промисловості, медицини та освіти. Функціонування цих систем базується на складному та безперервному циклі взаємодії між апаратним забезпеченням, програмними модулями, мережевими даними та кінцевим користувачем [1]. Порушення цього циклу – апаратні збої, мережеві затримки або помилки програмного коду – призводять не лише до погіршення досвіду користувача, але й можуть спричинити такі серйозні наслідки для його здоров'я, як кіберхвороба [2]. Вплив такого роду робить питання надійності архітектури таких систем першочерговою задачею.

Резильєнтністю в контексті систем віртуальної та доданої реальності вважають здатність архітектури функціонувати під впливом негативних факторів, адаптуватись до динамічних змін умов використання, та швидко відновлювати працездатність без критичних втрат у якості досвіду користувача. Існуючі методи проектування зосереджені переважно на аналізі поведінки вже існуючих архітектур у стресових умовах. Важливим є перехід до превентивного синтезу, і проблема полягає у відсутності єдиного методу, який дозволив би кількісно об'єднати стратегії підвищення надійності на всіх рівнях ще на етапі проектування.

Таким чином, актуальним завданням є розробка методу синтезу, який трансформує процес створення AR/VR архітектури в задачу багатокритеріальної оптимізації [27] для досягнення максимального рівня стійкості в умовах впливу деструктивних факторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ряд публікацій був присвячений проблемі стійкості на різних архітектурних рівнях середовищ AR/VR. Дослідження, орієнтовані на апаратне забезпечення ([15]-[17], [23]), зосереджуються на відмовостійкості та енергоефективності з використанням таких методів як динамічне масштабування напруги та частоти, планування з урахуванням теплового режиму та апаратна надлишковість. Підходи програмного рівня ([18], [19]) концентруються на механізмах контрольних точок і перезапуску (checkpoint-restart), віртуалізації та адаптивному відмовостійкому виконанні для забезпечення відновлення після перехідних збоїв.

Методи, орієнтовані на дані ([20]-[22]), спрямовані на підвищення надійності та цілісності передачі за допомогою багатошляхової маршрутизації, прямого виправлення помилок (FEC) та надлишкового кодування для інтенсивних робочих навантажень потокової передачі з ефектом занурення. Стійкість, пов'язана з користувачем ([24], [25], [30]), підкреслює поведінкову стабільність, комфорт і безпеку шляхом моделювання шаблонів людської взаємодії та оптимізації ергономіки в інтерфейсах VR/AR. Нарешті, системні та інтегративні дослідження ([26], [28], [29]) пропонують комплексні фреймворки оптимізації та синтезу, які поєднують апаратне, програмне забезпечення та фактори навколишнього середовища для досягнення глобальної стійкості в усій екосистемі віртуальної реальності. Основні підходи узагальнені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Опис методів мінімізації негативних впливів

Компонент	Тип змінної	Автори	Метод мінімізації	Застосування у синтезі
Апаратне забезпечення (H)	Мережеві умови	Y. Sun et al. [15]	Обчислювальне розвантаження (offloading) важких завдань на хмару/периферію для зменшення локального термічного стресу.	Включення змінної рішення для порогу розвантаження; зменшує інтенсивність відмов пристрою λ_h .
Апаратне забезпечення (H)	Екологічні змінні	X. Zhang et al. [16]	Предиктивне управління тепловим режимом динамічно обмежує обчислення для запобігання перегріву.	Додавання параметра термічного ліміту та запуск шляху резервування при його перевищенні для підвищення надійності.
Апаратне забезпечення (H)	Поведінка користувача	J. Gomez et al. [17]	Динамічна вибірка сенсорів та масштабування потужності на основі інтенсивності руху.	Використання порогу чутливості до руху для активації режиму низького енергоспоживання; знижує частоту відмов.

Продовження Таблиці 1

Апаратне забезпечення (H)	Системне навантаження	J. Gomez et al. [17]	Розподілені обчислення на сенсорах розділяють завдання між CPU / GPU для запобігання насиченню.	Введення змінної паралельних потоків для балансування навантаження та підтримки стабільності PSh.
Апаратне забезпечення (H)	Апаратні обмеження	J. Xiong et al. [18]	Малопотужні мікро-LED дисплеї зменшують теплове навантаження та енергоспоживання.	Додавання змінної архітектури дисплея (OLED / μ LED), пов'язаної з термічними параметрами.
Програмне забезпечення (S)	Мережеві умови	A. Hazarika [19]	Адаптивне проміжне ПЗ для стрімінгу коригує роздільну здатність залежно від затримки та джиттера.	Додавання порогу якості стрімінгу, що керує динамічною адаптацією ПЗ.
Програмне забезпечення (S)	Зміни середовища	A. Hazarika [19]	Корекція пози та сцени в реальному часі компенсує зміни освітлення та оклюзії.	Додавання режиму відкату ПЗ (fallback), що знижує точність при поганому освітленні для збереження надійності трекінгу.
Програмне забезпечення (S)	Поведінка користувача	J. Gomez et al. [17]	Предиктивна пакетна обробка вводу згладжує сплески взаємодії для запобігання пікам CPU.	Додавання змінної інтервалу пакетування для стабілізації продуктивності PSs.
Програмне забезпечення (S)	Системне навантаження	K. T. Foerster et al. [20]	Створення контрольних точок (checkpoint/restore) забезпечує швидке відновлення під навантаженням.	Встановлення частоти контрольних точок та фактора реплікації контейнерів для максимізації As.
Програмне забезпечення (S)	Апаратні обмеження	Y. Sun et al. [15]	Програмне розвантаження обчислень зменшує стрес на обмежені локальні ресурси.	Включення змінної коефіцієнта розвантаження, що координується з апаратними та мережевими моделями.
Дані / Зв'язок (D)	Мережеві умови	B. Zhao et al. [21]	Багатошляхове планування агрегує кілька каналів 5G для маскування джиттера та втрат.	Додавання змінної кількості паралельних каналів зв'язку.

Продовження таблиці 1

Дані / Зв'язок (D)	Екологічні змінні	V. Kelkkanen [22]	Периферійна локалізація підтримує трекінг при завадах або оклюзії.	Змінна вибору між периферійним та хмарним трекінгом; зменшує затримку та RT.
Дані / Зв'язок (D)	Поведінка користувача	P. Yang et al. [23]	Предиктивна попередня вибірка даних (pre-fetching) передбачає рух користувача.	Додавання змінної розміру буфера попередньої вибірки; покращує безперервність та PSD.
Дані / Зв'язок (D)	Системне навантаження	Y. Sun et al. [15]	Спільна архітектура зв'язку-обчислень-кешування (3C) балансує навантаження.	Використання змінних розміру кешу та периферійних вузлів для посилення AD.
Дані / Зв'язок (D)	Апаратні обмеження	A. Hazarika [19]	Адаптивна модуляція та кодування (AMCS) підтримує надійність при зміні SNR.	Змінна рівня модуляції/кодування підлаштовується під радіоумови для покращення ID.
Користувачі (U)	Мережеві умови	V. Kelkkanen [22]	Предикція руху та інтерполяція кадрів компенсують затримку для зменшення кіберхвороби.	Додавання змінної буфера інтерполяції; знижує сприйману затримку, покращуючи PSU та US.
Користувачі (U)	Екологічні змінні	M. Park et al. [25]	Адаптивна яскравість інтерфейсу та придушення аудіо реагують на освітлення та шум.	Змінна порогів адаптації інтерфейсу; підвищує комфорт та стабільність.
Користувачі (U)	Поведінка користувача	S. Weech et al. [26]	Адаптивна локомоція (телепортація) зменшує кіберхворобу від інтенсивного руху.	Змінна режиму локомоції / обмеження швидкості взаємодії; підсилює US та PS.

Закінчення таблиці 1

Користувачі (U)	Системне навантаження	J. Xiong et al. [18]	Динамічний рендеринг рівня деталізації (LOD) масштабує якість залежно від кількості користувачів.	Змінна макс. кількості користувачів / LOD; запобігає перевантаженню та зберігає PS.
Користувачі (U)	Апаратні обмеження	J. Xiong et al. [18]	Ергономічні, легкі HMD та управління живленням зменшують втому та перегрів.	Змінні ваги пристрою / ємності батареї / термічного порогу; покращують US.

Джерело: розроблено авторами

Кожен з розглянутих методів спрямований на окремий клас негативних впливів на систему – нестабільне функціонування мережі, зміна навколишнього середовища, тощо. За допомогою відображення цих стратегій мінімізації впливу у контрольовані змінні проектування, можливою стає кількісна оцінка їхнього внеску у ключові метрики резильєнтності системи. Незважаючи на значний приріст у забезпеченні стійкості окремих компонентів систем віртуальної та доданої реальності, більшість з розглянутих методів обмежені своєю областю застосування – рішення, орієнтовані на дані, спрямовані на надійність передачі, але працюють незалежно від апаратних обмежень і динаміки системного навантаження; а дослідження на рівні користувача насамперед стосуються комфорту та ергономіки без зв'язку цих факторів із системними метриками продуктивності. Ця фрагментація створює проблему: наразі не існує уніфікованого методу синтезу, здатного поєднувати методи підвищення стійкості з усіх архітектурних шарів і максимізувати їх спільно під впливом динамічних факторів навколишнього середовища, поведінки та робочого навантаження. Наш метод спрямований на усунення цієї прогалини шляхом впровадження комплексної багатокритеріальної структури синтезу.

Постановка завдання. В імерсивних системах стійкість визначається як здатність техногенного середовища підтримувати прийнятну продуктивність, незважаючи на збої, деградацію або зовнішній стрес, що охоплює етапи передбачення, протистояння, відновлення та адаптації. Оскільки системи AR/VR поєднують у собі апаратне забезпечення, програмне забезпечення, мережі передачі даних та користувачів, стійкість є емерджентною властивістю, що виникає внаслідок їхньої взаємодії, а не властивістю окремого шару. Метою завдання синтезу є розробка методу, який дозволяє проектувати архітектурні конфігурації, здатні підтримувати функціональний вихід вище мінімально допустимого рівня протягом усього часу виконання місії. Процес синтезу розглядається як зворотне відображення від цільових показників стійкості до конкретних параметрів проектування. Завдання синтезу зводиться до пошуку оптимального 20-вимірною вектора пом'якшення впливів (M_Vector), який максимізує кожен критерій стійкості незалежно при одночасному мінімізуванні часу відновлення. Це формулюється як багатокритеріальна задача оптимізації:

$$\max_x \begin{pmatrix} R_{\text{sys}}(T; x), \\ A_{\text{sys}}(x), \\ FT(k, n, T; x), \\ I(x), \\ PS(x), \\ US(x), \\ RT^{-1}(x), \\ MTTR^{-1}(x) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для кількісної оцінки та чисельної оптимізації в межах методу використовуються такі формалізовані критерії як надійність, доступність, відмовостійкість, цілісність, час відновлення, стабільність продуктивності та безпека користувача.

Надійність визначається як ймовірність того, що система виконує покладені на неї функції без збоїв з перебігом часу [5]:

$$R(t) = P\{T_f > t\} = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

T_f показує час функціонування системи до першого збою, λ – показник збоїв, що показує середню кількість відмов у період часу.

Доступність – це відсоток часу, коли система працює [6]:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}, \quad (3)$$

$MTTF$ та $MTTR$ – середній час відмови та середній час відновлення відповідно.

Відмовостійкість – це здатність системи продовжувати функціонування безперервно навіть у випадку, коли один або більше з її компонентів перестає функціонувати. Для конфігурації k-з-n (система функціонує, якщо принаймні k з n ідентичних елементів функціонують) [3][7]:

$$FT(k, n, t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R(t)^i [1 - R(t)]^{n-i}. \quad (4)$$

Якщо елементи системи нерівноцінні, доцільно використати вагові коефіцієнти [8].

Цілісність показує протидію системи пошкодженню даних під час передачі або зберігання [8]. E_d та E_c – кількість виявлених та виправлених помилок відповідно:

$$I = 1 - \frac{E_d - E_c}{E_d}. \quad (5)$$

Час відновлення – це затрачений час від виникнення несправності до повного відновлення [9][10].

$$RT = t_{\text{restore}} - t_{\text{fail}}, \quad (6)$$

$$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{restore,i} - t_{fail,i}) \cdot \quad (7)$$

Стабільність продуктивності вимірює відхилення від номінальної продуктивності (наприклад, кількість кадрів на секунду, затримки, тощо) [11][12]:

$$PS = 1 - \frac{|P(t) - P_0|}{P_0} \cdot \quad (8)$$

Змінна безпеки користувачів вимірює ймовірність того, що небезпечні умови не виникнуть, при цьому ρ – умовна ймовірність шкоди користувачеві у раз відмови системи [13][14]:

$$US = 1 - P_{hazard} = 1 - \rho(1 - R_{sys}) \cdot \quad (9)$$

Теоретична база для оцінки резильєнтності в середовищах AR/VR ґрунтується на кількісних параметрах, що відображають стабільність та адаптивність системи. Надійність, доступність, відмовостійкість, цілісність, час відновлення, стабільність продуктивності та безпека користувача разом утворюють цілісну сукупність показників, що описують здатність системи підтримувати прийнятну роботу в мінливих умовах. Кожна метрика забезпечує окремий погляд на поведінку рівнів апаратного забезпечення, програмного забезпечення, даних та взаємодії з користувачем, тоді як їхнє математичне формулювання дозволяє пряму інтеграцію в аналітичні та симуляційні структури. Отримана структура встановлює уніфікований фундамент для синтезу та чисельної оптимізації стійких архітектур AR/VR.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення резильєнтності середовищ AR/VR вимагає системного підходу, спрямованого на покращення стабільності продуктивності та відмовостійкості кожного архітектурного шару. Основною метою запропонованого методу є максимізація всіх критеріїв стійкості шляхом ідентифікації та посилення параметрів, що мають на них найбільш суттєвий вплив. Методологічна структура розглядає ці критерії як взаємозалежні цілі оптимізації. Наприклад, зниження часу відновлення підвищує доступність, а зменшення частоти помилок покращує цілісність та стабільність продуктивності.

Процедура синтезу спрямована на пошук багатовимірного оптимуму, де комбінація проектних рішень (рівні надмірності, політика DVFS, частота контрольних точок, рівень FEC тощо) забезпечує максимальну ефективність системи.

Етапи реалізації методу:

1. Верифікація та базова «контрольна карта»:
 - Визначення часу місії та профілів роботи
 - Структурна модель надійності – побудова діаграм надійності та використання ланцюгів Маркова для розрахунку доступності
 - Валідація параметрів: розрахунок інтенсивності відмов та відновлення
 - Інструментарій затримки та безпеки
 - Визначення мінімально допустимих значень для кожної метрики
2. Застосування методів мінімізації впливів
3. Інтеграція та синтез.

Кожен шар архітектури – апаратне забезпечення, програмне забезпечення, дані та користувачі – моделюється як напівзалежна підсистема, внутрішні параметри якої реагують на зовнішні змінні:

$$E = \{E_n, E_{env}, E_b, E_s, E_{hw}\} \quad (10)$$

В даному випадку E_n – мережеві умови, E_{env} – зміни середовища, E_b – зміни поведінки користувача, E_s – зміни навантаження системи, E_{hw} – умови, пов'язані з апаратним забезпеченням [27]. Ці фактори впливають на зв'язки між внутрішніми компонентами системи.

Таким чином, кожна підсистема $C_j = \{H, S, D, U\}$ підтримує вектор параметрів проектування $x_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}]$, який визначає її роль в загальній резильєнтності системи.

Для оцінки практичної ефективності запропонованого методу синтезу та демонстрації взаємодії окремих механізмів стійкості в межах повної архітектурної конфігурації, аналітичну структуру було інтегровано у виконуваний чисельний робочий процес. Цей процес поєднує в собі оптимізацію, відображення параметрів та повну оцінку системи. Розглянемо концептуальну модель з [27]:

$$VR = \{H, S, D, U\}, E = \{E_n, E_{env}, E_b, E_s, E_{hw}\} \quad (11)$$

Застосуємо дану модель у вищеописаному методі. Для цього встановимо відповідність між функціями оцінки $f_{i,j}(E_i, C_j)$ з [27], та відповідними метриками резильєнтності $R_{sys}(T; x)$, $A_{sys}(x)$, $FT(k, n, T; x)$, $I(x)$, $PS(x)$, $US(x)$. Метод синтезу вибудовує конфігурації, що дозволяють досягти необхідного рівня резильєнтності. Формально синтез відображає обернену відповідність параметрів резильєнтності і параметрів проектування:

$$x^* = \underset{x \in X}{argmax} R_{VR}^{(final)}(x, E) \quad (12)$$

Кожен з критеріїв резильєнтності M_k залежить від внутрішніх параметрів системи та впливу зовнішніх факторів. Для того, щоб оцінити ці залежності, кожен компонент C_j описується номінальним значенням $M_{k,j}^{nom}(x_j)$ і функціями деградації $f_{i,j}(x_j, E_i)$. У моделі синтезу впроваджуються коефіцієнти чутливості $\gamma_{k,i,j}$, що визначають, наскільки кожен i -й зовнішній фактор впливає на критерій k компоненту j :

$$M_{k,j}(x, E) = M_{k,j}^{nom}(x_j) \prod_{i \in E} [f_{i,j}(x_j, E_i)]^{\gamma_{k,i,j}} \quad (13)$$

Кожен фактор $f_{i,j} \in [0, 1]$ відображає ступінь впливу зовнішньої умови на можливість підтримувати очікувану продуктивність. Для кожного з критеріїв k , значення на рівні системи отримується з відповідної агрегаційної функції:

$$M_k(x, E) = \Phi_k(M_{k,H}, M_{k,S}, M_{k,D}, M_{k,U}) \quad (14)$$

Φ – відповідний структурний оператор для надійності, відмовостійкості, тощо. Загальна ціль синтезу тоді визначається як нормалізований, зважений показник усіх критеріїв:

$$R_{VR}^{final}(x, E) = \sum_{k=1}^8 \beta_k v_k(M_k(x, E)) \quad (15)$$

v_k приводить генерогенні фактори до загального показника: лінійного або обернено-лінійного для часових вимірів, та експоненційного для критеріїв, що динамічно змінюються. Таким чином, оптимізація може бути сформульована як:

$$\text{Максимізація : } R_{VR}^{final}(x, E) \quad (16)$$

$$\text{При : } g(x, E) \leq 0, h(x, E) = 0$$

Для підтвердження ефективності запропонованого методу аналітичного синтезу було проведено чисельне оцінювання. Метою експерименту є демонстрація здатності моделі орієнтуватися у багатовимірному просторі проектування стратегій пом'якшення впливів та ідентифікувати оптимальну архітектуру. На додаток до аналітичного формулювання, процедура синтезу реалізована безпосередньо в середовищі Simulink, що дозволяє проводити високоточну оцінку стійкості в умовах динамічної зміни робочих параметрів. Simulink забезпечує структуроване представлення всіх компонентів, функцій впливу та механізмів агрегації на рівні блоків. Шляхом вбудовування конвеєра обчислення стійкості в Simulink та представлення ключових архітектурних параметрів як конфігурованих змінних, генетичний алгоритм (ГА) може оцінювати кожен кандидатний вектор мітигації на основі реалістичного моделювання поведінки системи. Процес синтезу був реалізований як задача одноцільової оптимізації під керуванням стандартного генетичного алгоритму. Функція придатності (fitness function) для ГА виконує повну аналітичну модель за наступною схемою: вектор зменшення впливів, розрахунок метрик, функції деградації та агрегація.

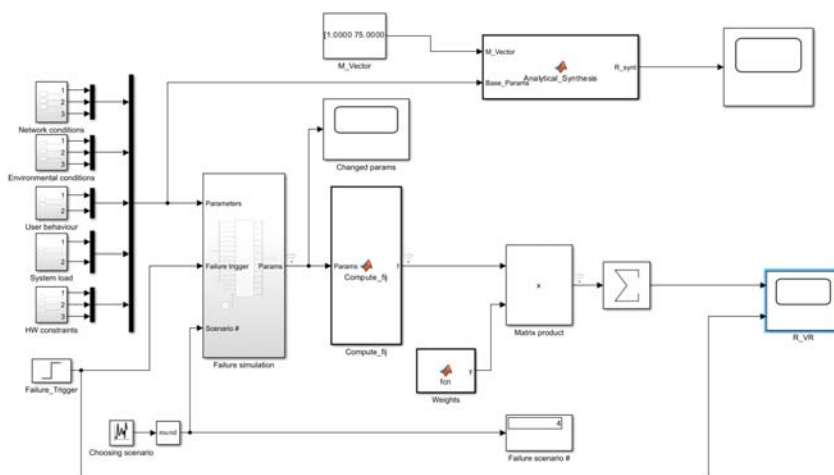


Рисунок 1 – реалізація системи в середовищі Simulink

Джерело: розроблено авторами

Інтеграція підходу в модель дала змогу отримати вектор зменшення впливів з середнім балом стійкості 0,477268 при базових вхідних параметрах. Результати порівняльного аналізу базової архітектури (з мінімальними заходами пом'якшення) та синтезованої оптимальної архітектури в умовах важкого сценарію експлуатації наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати експериментів

Метрика	Базова оцінка	Оптимізована оцінка	Покращення (%)
Надійність	0,5893	0,7728	+31,1%
Доступність	0,0001	0,0002	+82,2%
Відмовостійкість	0,5878	0,6931	+17,9%
Цілісність	0,5981	0,6514	+8,9%
Час відновлення	0,6666	0,9327	+39,9%
Стабільність продуктивності	0,0001	0,0002	+18,6%

Безпека коритувача	0,7286	0,7331	+0,6%
Інтегральний показник	0,4822	0,5756	+19,4%

Висновки. У роботі представлено формально обґрунтований метод автоматизованого синтезу стійких архітектур AR/VR. Встановлено суворий математичний зв'язок між архітектурними проектними рішеннями низького рівня та емерджентними властивостями стійкості високого рівня. Запропонована аналітична модель перетворює складне якісне завдання проектування стійких систем на кількісну проблему багатокритеріальної оптимізації. Експериментальні результати, отримані як шляхом синтезу на основі генетичного алгоритму, так і за допомогою інтеграції в Simulink у реальному часі, підтверджують ефективність цього підходу.

Майбутня робота може бути зосереджена на розширенні бібліотеки стратегій пом'якшення впливів, уточненні моделей чутливості за допомогою емпіричних даних з фізичних випробувальних стендів та дослідженні застосування цього методу синтезу до інших класів кіберфізичних систем. Критично важливим напрямком для майбутніх досліджень є протидія просунутим загрозам безпеці в таких взаємопов'язаних системах. Це включає адаптацію нашої моделі стійкості для врахування ботнетів і поліморфного шкідливого програмного забезпечення [28-34], а також вирішення унікальних проблем безпеки та приватності, притаманних імерсивним середовищам, таким як автентифікація користувачів, конфіденційність даних та захист від неімерсивних атак [34-45].

Список літератури

1. Resilience engineering. *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Resilience_engineering] (https://en.wikipedia.org/wiki/Resilience_engineering) (дата звернення: 13.02.2026).
2. System Resilience. *SEBoK Wiki*. URL: [https://sebokwiki.org/wiki/System_Resilience] (https://sebokwiki.org/wiki/System_Resilience) (дата звернення: 13.02.2026).
3. The k-out-of-n System Model. *Wiley*. URL: [https://catalogimages.wiley.com/images/db/pdf/047139761X.07.pdf] (https://catalogimages.wiley.com/images/db/pdf/047139761X.07.pdf) (дата звернення: 13.02.2026).
4. RBDs and Analytical System Reliability. *ReliaSoft*. URL: [https://help.reliasoft.com/reference/system_analysis/sa/rbds_and_analytical_system_reliability.html] (https://help.reliasoft.com/reference/system_analysis/sa/rbds_and_analytical_system_reliability.html) (дата звернення: 13.02.2026).
5. Reliability analysis of a k-out-of-n:F system under a linear model. Ann. Inst. Stat. Math. URL: [https://www.ism.ac.jp/editsec/aism/71/0537.pdf] (https://www.ism.ac.jp/editsec/aism/71/0537.pdf) (дата звернення: 13.02.2026).
6. Availability. *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Availability] (https://en.wikipedia.org/wiki/Availability) (дата звернення: 13.02.2026).
7. k-out-of-n Systems. *ReliaSoft*. URL: [https://help.reliasoft.com/articles/content/reference_examples/blocksims/k-out-of-n_systems.html] (https://help.reliasoft.com/articles/content/reference_examples/blocksims/k-out-of-n_systems.html) (дата звернення: 13.02.2026).
8. Multi-Blockchain-Based IoT Data Processing Techniques for Big Data Integrity Verification. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 10. Art. no. 3515. URL: [https://www.mdpi.com/1424-8220/21/10/3515] (https://www.mdpi.com/1424-8220/21/10/3515) (дата звернення: 13.02.2026).
9. Recovery Time Objective (RTO). *NIST CSRC*. URL: [https://csrc.nist.gov/glossary/term/recovery_time_objective] (https://csrc.nist.gov/glossary/term/recovery_time_objective) (дата звернення: 13.02.2026).
10. Mean time to recovery. *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_time_to_recovery] (https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_time_to_recovery) (дата звернення: 13.02.2026).
11. Measuring System Visual Latency through Cognitive Tests. *Proc. IEEE VR 2020*. URL: [https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2020/01/ieee_vr_2020_latency.pdf] (https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2020/01/ieee_vr_2020_latency.pdf) (дата звернення: 13.02.2026).
12. Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with VR. *PLOS ONE*. 2022. URL: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10616216/] (https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10616216/) (дата звернення: 13.02.2026).

13. Investigating guardian awareness techniques to promote VR user safety. *SMU*. URL: https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=9024&context=sis_research (дата звернення: 13.02.2026).
14. Exploring Metaphorical Transformations of a Safety Boundary Wall for VR. *Applied Sciences*. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125283/ (дата звернення: 13.02.2026).
15. Communication, Computing and Caching for Mobile VR Delivery: Modeling and Trade-off / Sun Y. et al. *arXiv preprint arXiv:1804.10335*. 2018. URL: https://arxiv.org/abs/1804.10335 (дата звернення: 13.02.2026).
16. Zhang X., Xia Y., Ali M. A Smartphone Thermal Temperature Analysis for Virtual and Augmented Reality : National Science Foundation Technical Report. 2020. URL: https://par.nsf.gov/servlets/purl/10219090 (дата звернення: 13.02.2026).
17. Distributed On-Sensor Compute System for AR/VR Devices: A Semi-Analytical Simulation Framework for Power Estimation / Gomez J. et al. *arXiv preprint arXiv:2203.07474*. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2203.07474 (дата звернення: 13.02.2026).
18. Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Emerging Technologies and Future Perspectives / Xiong J. et al. *Light: Science & Applications*. 2021. Vol. 10, no. 1. Art. no. 215. URL: https://www.nature.com/articles/s41377-021-00658-8 (дата звернення: 13.02.2026).
19. Hazarika A. Towards an Evolved Immersive Experience: Exploring 5G. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 7. P. 3682. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/7/3682 (дата звернення: 13.02.2026).
20. Transparent Fault Tolerance for Stateful Applications in Kubernetes with Checkpoint/Restore / Foerster K. T. et al. *Proc. IEEE SRDS 2023*. URL: https://ktfoerster.github.io/paper/2023-srds.pdf (дата звернення: 13.02.2026).
21. Zhao B., Guo S., Liu X. A Multipath Scheduler Based on Cross-Layer Information for Cloud VR in 5G Edge Networks. *Computer Networks*. 2024. Vol. 244. P. 110333. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110333 (дата звернення: 13.02.2026).
22. Kelkkanen V. Evaluation and Reduction of Temporal Issues in Remote VR : Master's Thesis / Univ. of Oulu. Oulu, Finland, 2023. URL: https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1744902/FULLTEXT02.pdf (дата звернення: 13.02.2026).
23. Feeling of Presence Maximization: mmWave-Enabled Virtual Reality Meets Deep Reinforcement Learning / Yang P. et al. *arXiv preprint arXiv:2107.01001*. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2107.01001 (дата звернення: 13.02.2026).
24. Exploring Metaphorical Transformations of a Safety Boundary Wall for VR / Qin H. et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 6. Art. no. 2520. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125283/ (дата звернення: 13.02.2026).
25. Recent Advances in Wearable Thermal Devices for Virtual and Augmented Reality / Park M. et al. *Micromachines*. 2025. Vol. 16, no. 3. Art. no. 338. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12029164/ (дата звернення: 13.02.2026).
26. Weech S., Kenny S., Barnett-Cowan M. Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review. *Frontiers in Psychology*. 2019. Vol. 10. P. 158. URL: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.00158/full (дата звернення: 13.02.2026).
27. Lysenko S., Kachur A. A Resilience Assurance Process Model for Enhancing Virtual Reality Architectural Design. *Proc. 14th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Athens, Greece, 2024. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1109/DESSERT65323.2024.11122129.
28. A Technique for Detection of Bots which are Using Polymorphic Code / Pomorova O. et al. *Communications in Computer and Information Science*. 2014. Vol. 431. P. 265–276.
29. Botnet Detection Technique for Corporate Area Network / Savenko O. et al. *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2013)*. Berlin, Germany, 2013. P. 363–368.

30. Method and Rules for Determining the Next Centralization Option in Multicomputer System Architecture / Kashtalian A. et al. *International Journal of Computing*. 2025. Vol. 24, no. 1. P. 35–51. DOI: 10.47839/ijc.24.1.3875.
31. Evaluation Criteria of Centralization Options in the Architecture of Multicomputer Systems with Traps and Baits / Kashtalian A. et al. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. No. 1. P. 264–297. DOI: 10.32020/reks.2025.1.18.
32. Multi-Computer Malware Detection Systems with Metamorphic Functionality / Kashtalian A. et al. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. No. 1. P. 152–175. DOI: 10.32020/reks.2024.1.13.
33. A Botnet Detection Approach Based on the Clonal Selection Algorithm / Lysenko S. et al. *Proc. 2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies (DeSSerT 2018)*. Kyiv, Ukraine, 2018. P. 424–428.
34. A Technique for the Botnet Detection Based on DNS-Traffic Analysis / Pomorova O. et al. *Proc. 22nd Int. Conf. Computer Networks (CN 2015)*. Brunów, Poland, 2015. Vol. 522. P. 127–138.
35. UI Dark Patterns and Where to Find Them: A Study on Mobile Applications and User Perception / Di Geronimo L. et al. *Proc. CHI*. 2020. P. 1–14. DOI: 10.1145/3313831.3376600.
36. Alshehri A., Alrehili K., Alhumaid F., Alessa A. Exploring the Privacy Concerns of Bystanders in Smart Homes. *Proc. Priv. Enhancing Technol. (PoPETs)*. 2022. Vol. 2022, no. 4. P. 253–270. DOI: 10.56553/popets-2022-0064.
37. Lin H., Bergmann N. W. IoT Privacy and Security Challenges for Smart Home Environments. *Information*. 2016. Vol. 7, no. 3. Art. 44. DOI: 10.3390/info7030044.
38. Wang Q., Cai Z., Li R., Fang X. A Comprehensive Survey on Local Differential Privacy toward Data Statistics and Analysis. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 24. Art. 7030. DOI: 10.3390/s20247030.
39. Yao Y., Zimmermann T., Chin A., Schaub F. Privacy Perceptions and Designs of Bystanders in Smart Homes. *Proc. ACM Hum.–Comput. Interact. (CSCW)*. 2019. Vol. 3, no. CSCW. P. 1–24. DOI: 10.1145/3359161.
40. Bystander Privacy in Smart Homes: A Systematic Review of Concerns and Solutions / Saqib E. et al. *ACM Trans. Comput.–Hum. Interact. (TOCHI)*. 2025. P. 1–?. DOI: 10.1145/3731755.
41. Marky K., Prange S., Krell F., Mühlhäuser M., Alt F. ‘You Just Can’t Know About Everything’: Privacy Perceptions of Smart Home Visitors. *Proc. MUM*. 2020. P. 1–13. DOI: 10.1145/3428361.3428464.
42. Android Permissions: User Attention, Comprehension, and Behavior / Felt A. P. et al. *Proc. SOUPS@CHI*. 2012. P. 3–14. DOI: 10.1145/2335356.2335360.
43. Zimmermann V., Gerber P., Marky K., Böck L., Kirchbuchner F. Assessing Users’ Privacy and Security Concerns of Smart Home Technologies. *i-com*. 2019. Vol. 18, no. 3. P. 197–216. DOI: 10.1515/icom-2019-0015.
44. Alshamsi O., Shaalan K., Butt U. Towards Securing Smart Homes: A Systematic Literature Review of Malware Detection Techniques and Recommended Prevention Approach. *Information*. 2024. Vol. 15, no. 10. Art. 631. DOI: 10.3390/info15100631.
45. Ogonji M. M., Okeyo G., Wafula J. M. A Survey on Privacy and Security of Internet of Things. *Computer Science Review*. 2020. Vol. 38. Art. 100312. DOI: 10.1016/j.cosrev.2020.100312.

References

1. Resilience engineering," *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Resilience_engineering
2. "System Resilience," *SEBoK Wiki*. [Online]. Available: https://sebokwiki.org/wiki/System_Resilience
3. "The k-out-of-n System Model," *Wiley*. [Online]. Available: <https://catalogimages.wiley.com/images/db/pdf/047139761X.07.pdf>
4. "RBDs and Analytical System Reliability," *ReliaSoft*. [Online]. Available: https://help.reliasoft.com/reference/system_analysis/sa/rbds_and_analytical_system_reliability.html
5. "Reliability analysis of a k-out-of-n:F system under a linear model," *Ann. Inst. Stat. Math.* [Online]. Available: <https://www.ism.ac.jp/editsec/aism/71/0537.pdf>
6. "Availability," *Wikipedia*. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Availability>
7. "k-out-of-n Systems," *ReliaSoft*. [Online]. Available: https://help.reliasoft.com/articles/content/reference_examples/blocksim/k-out-of-n_systems.html
8. "Multi-Blockchain-Based IoT Data Processing Techniques for Big Data Integrity Verification," *Sensors*, vol. 21, no. 10, 2021, Art. no. 3515. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/10/3515>
9. "Recovery Time Objective (RTO)," *NIST CSRC*. [Online]. Available: https://csrc.nist.gov/glossary/term/recovery_time_objective
10. ["Mean time to recovery," *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_time_to_recovery

11. "Measuring System Visual Latency through Cognitive Tests," in *Proc. IEEE VR 2020*. [Online]. Available: https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2020/01/ieee_vr_2020_latency.pdf
12. "Measuring motion-to-photon latency for sensorimotor experiments with VR," *PLOS ONE*, 2022. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10616216/>
13. "Investigating guardian awareness techniques to promote VR user safety," *SMU*. [Online]. Available: https://ink.library.smu.edu.sg/cgi/viewcontent.cgi?article=9024&context=sis_research
14. "Exploring Metaphorical Transformations of a Safety Boundary Wall for VR," *Applied Sciences*. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125283/>
15. Y. Sun, Z. Jiang, C. Xu, S. Zhou, and Z. Niu, "Communication, Computing and Caching for Mobile VR Delivery: Modeling and Trade-off," *arXiv preprint arXiv:1804.10335*, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1804.10335>
16. X. Zhang, Y. Xia, and M. Ali, "A Smartphone Thermal Temperature Analysis for Virtual and Augmented Reality," National Science Foundation Technical Report, 2020. [Online]. Available: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10219090>
17. J. Gomez, S. Raghunathan, and K. Chowdhury, "Distributed On-Sensor Compute System for AR/VR Devices: A Semi-Analytical Simulation Framework for Power Estimation," *arXiv preprint arXiv:2203.07474*, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2203.07474>
18. J. Xiong, Y. Li, K. Liu, X. Liu, and Z. Liu, "Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Emerging Technologies and Future Perspectives," *Light: Science & Applications*, vol. 10, no. 1, 2021, Art. no. 215. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41377-021-00658-8>
19. A. Hazarika, "Towards an Evolved Immersive Experience: Exploring 5G," *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3682, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/7/3682>
20. K. T. Foerster, H. Schmidt, and D. P. van der Meer, "Transparent Fault Tolerance for Stateful Applications in Kubernetes with Checkpoint/Restore," in *Proc. IEEE SRDS 2023*. [Online]. Available: <https://ktfoerster.github.io/paper/2023-srds.pdf>
21. B. Zhao, S. Guo, and X. Liu, "A Multipath Scheduler Based on Cross-Layer Information for Cloud VR in 5G Edge Networks," *Computer Networks*, vol. 244, p. 110333, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110333>
22. V. Kelkkanen, "Evaluation and Reduction of Temporal Issues in Remote VR," Master's Thesis, Univ. of Oulu, Oulu, Finland, 2023. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1744902/FULLTEXT02.pdf>
23. P. Yang, Y. Zhao, J. Wu, and J. Zhang, "Feeling of Presence Maximization: mmWave-Enabled Virtual Reality Meets Deep Reinforcement Learning," *arXiv preprint arXiv:2107.01001*, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2107.01001>
24. H. Qin, Z. Sun, S. Yao, and C. Zhang, "Exploring Metaphorical Transformations of a Safety Boundary Wall for VR," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, 2024, Art. no. 2520. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125283>
25. M. Park, J. Kim, and D. Kang, "Recent Advances in Wearable Thermal Devices for Virtual and Augmented Reality," *Micromachines*, vol. 16, no. 3, 2025, Art. no. 338. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12029164>
26. S. Weech, S. Kenny, and M. Barnett-Cowan, "Presence and Cybersickness in Virtual Reality Are Negatively Related: A Review," *Frontiers in Psychology*, vol. 10, p. 158, 2019. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.00158/full>
27. S. Lysenko and A. Kachur, "A Resilience Assurance Process Model for Enhancing Virtual Reality Architectural Design," *Proc. 14th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 2024, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1109/DESSERT65323.2024.11122129>
28. [O. Pomorova, O. Savenko, S. Lysenko, A. Kryshchuk, and A. Nicheporuk, "A Technique for Detection of Bots which are Using Polymorphic Code," *Communications in Computer and Information Science*, vol. 431, pp. 265–276, 2014. ISSN 1865-0929.
29. O. Savenko, S. Lysenko, A. Kryshchuk, and Y. Klots, "Botnet Detection Technique for Corporate Area Network," in *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2013)*, Berlin, Germany, Sept. 12–14, 2013, pp. 363–368. ISBN 978-1-4799-1426-5.
30. A. Kashtalian, S. Lysenko, T. Kysil, A. Sachenko, O. Savenko, and B. Savenko, "Method and Rules for Determining the Next Centralization Option in Multicomputer System Architecture," *International Journal of Computing*, vol. 24, no. 1, pp. 35–51, 2025. doi: 10.47839/ijc.24.1.3875.
31. A. Kashtalian, S. Lysenko, A. Sachenko, B. Savenko, O. Savenko, and A. Nicheporuk, "Evaluation Criteria of Centralization Options in the Architecture of Multicomputer Systems with Traps and Baits," *Radioelectronic and Computer Systems*, no. 1, pp. 264–297, 2025. doi: 10.32620/reks.2025.1.18.

32. A. Kashtalian, S. Lysenko, O. Savenko, A. Nicheporuk, T. Sochor, and V. Avsiyevych, "Multi-Computer Malware Detection Systems with Metamorphic Functionality," *Radioelectronic and Computer Systems*, no. 1, pp. 152–175, 2024. doi: 10.32620/reks.2024.1.13.
33. [S. Lysenko, K. Bobrovnikova, and O. Savenko, "A Botnet Detection Approach Based on the Clonal Selection Algorithm," in *Proc. 2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies (DeSSerT 2018)*, Kyiv, Ukraine, May 24–27, 2018, pp. 424–428.
34. O. Pomorova, O. Savenko, S. Lysenko, A. Kryshchuk, and K. Bobrovnikova, "A Technique for the Botnet Detection Based on DNS-Traffic Analysis," in *Proc. 22nd Int. Conf. Computer Networks (CN 2015)*, Brunów, Poland, June 16–19, 2015, vol. 522, pp. 127–138.
35. L. Di Geronimo, L. Braz, E. Fregnan, F. Palomba, and A. Bacchelli, "UI Dark Patterns and Where to Find Them: A Study on Mobile Applications and User Perception," in *Proc. CHI*, 2020, pp. 1–14. doi: 10.1145/3313831.3376600.
36. A. Alshehri, K. Alrehili, F. Alhumaid, and A. Alessa, "Exploring the Privacy Concerns of Bystanders in Smart Homes," *Proc. Priv. Enhancing Technol. (PoPETs)*, vol. 2022, no. 4, pp. 253–270, 2022. doi: 10.56553/popets-2022-0064. (Open PDF available.)
37. H. Lin and N. W. Bergmann, "IoT Privacy and Security Challenges for Smart Home Environments," *Information*, vol. 7, no. 3, art. 44, 2016. doi: 10.3390/info7030044.
38. Q. Wang, Z. Cai, R. Li, and X. Fang, "A Comprehensive Survey on Local Differential Privacy toward Data Statistics and Analysis," *Sensors*, vol. 20, no. 24, art. 7030, 2020. doi: 10.3390/s20247030.
39. Y. Yao, T. Zimmermann, A. Chin, and F. Schaub, "Privacy Perceptions and Designs of Bystanders in Smart Homes," *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact. (CSCW)*, vol. 3, no. CSCW, pp. 1–24, 2019. doi: 10.1145/3359161.
40. E. Saqib, S. He, J. Choy, R. Abu-Salma, J. Such, J. Bernd, and M. Javed, "Bystander Privacy in Smart Homes: A Systematic Review of Concerns and Solutions," *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact. (TOCHI)*, pp. 1–?, 2025. doi: 10.1145/3731755.
41. K. Marky, S. Prange, F. Krell, M. Mühlhäuser, and F. Alt, "'You Just Can't Know About Everything': Privacy Perceptions of Smart Home Visitors," in *Proc. MUM*, 2020, pp. 1–13. doi: 10.1145/3428361.3428464. (Open PDF available.)
42. A. P. Felt, E. Ha, S. Egelman, A. Haney, E. Chin, and D. Wagner, "Android Permissions: User Attention, Comprehension, and Behavior," in *Proc. SOUPS@CHI*, 2012, pp. 3–14. doi: 10.1145/2335356.2335360.
43. V. Zimmermann, P. Gerber, K. Marky, L. Böck, and F. Kirchbuchner, "Assessing Users' Privacy and Security Concerns of Smart Home Technologies," *i-com*, vol. 18, no. 3, pp. 197–216, 2019. doi: 10.1515/icom-2019-0015.
44. O. Alshamsi, K. Shaalan, and U. Butt, "Towards Securing Smart Homes: A Systematic Literature Review of Malware Detection Techniques and Recommended Prevention Approach," *Information*, vol. 15, no. 10, art. 631, 2024. doi: 10.3390/info15100631.
45. M. M. Ogonji, G. Okeyo, and J. M. Wafula, "A Survey on Privacy and Security of Internet of Things," *Computer Science Review*, vol. 38, art. 100312, 2020. doi: 10.1016/j.cosrev.2020.100312.

Sergii Lysenko, Prof, Dr tech. sci., **Artem Kachur**, **Liudmyla Koretska**, Assoc. Prof., PhD tech sci.

Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

Method for Synthesising Resilient Architectures of Virtual and Augmented Reality Systems

The article considers the problem of ensuring the stability of augmented (AR) and virtual (VR) reality systems, which are characterized by high sensitivity to performance violations and hardware and software failures. Most existing approaches focus on the analysis of fixed architectures, leaving open the issue of automated synthesis of systems that are stable by design.

A new method for analytical synthesis of AR/VR architectures is proposed, which is based on a formal model that links a 20-dimensional vector of mitigation parameters with seven key stability metrics: reliability, availability, fault tolerance, integrity, recovery time, performance stability, and user safety. The design problem is formulated as a multi-criteria optimization problem, for the solution of which a genetic algorithm is used.

Experimental validation conducted in the Simulink environment confirmed the effectiveness of the method. The results showed that the synthesized architecture provides an improvement in the overall resilience index by 19.4% compared to the base configuration under strict operational constraints. In particular, a significant increase in the availability indicators (+82.2%) and recovery time (+39.9%) was achieved. The proposed approach allows for quantitative assessment and optimization of architectural solutions at the design stage.

virtual reality (VR), resilience, VR architecture, fault tolerance, error mitigation, system reliability

Одержано (Received) 12.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

А. О. Нічепорук, доц., канд. техн. наук., **В.Ю. Гурський**

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

e-mail: andrey.nicheporuk@gmail.com, nighttima@gmail.com

Архітектура віддаленої верифікації контейнеризованих застосунків Kubernetes для периферійних пристроїв на базі Raspberry Pi

Запропонована архітектура спрямована на віддалену верифікацію контейнеризованих застосунків (подів) Kubernetes кластеру у середовищах периферійних обчислень, де обмежені ресурси, доступність фізичних пристроїв та підвищені ризики компрометації вимагають ретельного контролю цілісності виконання. Пропонована архітектура інтегрується в Kubernetes без змін ядра, використовуючи стандартні механізми розширюваності, такі як CRD та користувацькі контролери. Завдяки цьому функції верифікації реалізуються як складова частина логіки керування кластером і виконуються в межах його звичайних процесів.

верифікація, периферійні пристрої, TPM-модуль, Raspberry Pi, архітектура вимірювання цілісності

Постановка проблеми. Швидкий розвиток концепції периферійних обчислень та масштабне впровадження edge computing архітектур у промислових, транспортних і IoT-системах зумовлюють зростаючу потребу у забезпеченні довіри до розподіленої інфраструктури. Вона розміщується географічно близько до джерел даних, часто у фізично незахищених локаціях, з обмеженим контролем з боку адміністраторів. Використання Kubernetes як де-факто стандарту оркестрації контейнеризованих застосунків поширюється за межі традиційних центрів обробки даних на edge-пристрої з обмеженими ресурсами, зокрема на одноплатні комп'ютери Raspberry Pi, що створює нові виклики у сфері кібербезпеки [1, 2].

Відсутність нативних механізмів віддаленої верифікації у Kubernetes формує критичну прогалину у забезпеченні цілісності виконуваних застосунків. Компрометація периферійного вузла може призвести до витоку конфіденційних даних, маніпуляції результатами обробки інформації або використання інфраструктури для проведення подальших атак [3, 4]. Особливо гостро ця проблема проявляється у багатоорендному середовищі, де різні організації спільно використовують edge-інфраструктуру хмарного провайдера, що вимагає надійних криптографічних гарантій того, що застосунки виконуються на довірених вузлах без несанкціонованих модифікацій коду чи конфігурацій.

Існуючі фреймворки віддаленої атестації (верифікації), такі як Keylime [5], забезпечують верифікацію цілісності фізичних вузлів через апаратні модулі довіри TPM, однак оперують на рівні всієї операційної системи. Тобто рішення, які лежать в основі цих фреймворків не дозволяють розрізнити окремі контейнери (поди). Як наслідок, такий недолік, зокрема в контексті мікросервісних архітектур, де на одному вузлі може виконуватись десятки подів, призводить до відсутності можливості реагування на компрометацію конкретних застосунків, що виконуються в подах кластеру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімке поширення контейнеризації в периферійних середовищах обумовлює критичну потребу у віддаленій верифікації

Kubernetes-кластерів, проте разом із тим відомі традиційні фреймворки, такі як Keylime, орієнтовані переважно на цілісність усього вузла і не забезпечують необхідної гранулярності на рівні окремих подів. У граничних (edge) системах ця проблема ускладнюється обмеженими ресурсами пристроїв, нестабільністю мережі та потребою в перевірці конкретних навантажень без критичного впливу на продуктивність. Сучасні дослідження зосереджені на інтеграції апаратних коренів довіри (TPM) з механізмами оркестрації, де провідні архітектури базуються на використанні підсистеми IMA та TPM 2.0 для динамічної атестації [6]. Зокрема, для ідентифікації конкретних подів пропонується модифікація ядра Linux через додавання атрибута `sgroup-path` до шаблону вимірювань. Розвиток цих підходів включає використання конфіденційних середовищ на базі Kata Containers [7], автоматизацію процесів через систему KubeTEE [8] та адаптацію Virtual Kubelet для низькоресурсних пристроїв класу Raspberry Pi [9, 10].

В Україні активно розвиваються суміжні напрямки граничних обчислень та інфраструктури для мобільних інтелектуальних систем, зокрема з інтеграцією edge та cloud-обчислень, балансуванням навантаження та кіберзахистом. Зокрема, запропоновано підходи до розгортання інфраструктури мобільних інтелектуальних систем на базі груп безпілотних літальних апаратів з акцентом на адаптивне управління ресурсами в гібридних edge-cloud середовищах [11]. Також досліджено інтелектуалізацію граничних обчислень Інтернету речей, де акцентовано на підвищенні ефективності обробки даних на периферії з урахуванням обмежених ресурсів та динамічних умов [12]. Ці роботи підкреслюють актуальність легких, адаптивних архітектур для edge-пристроїв, що створює передумови для подальшої інтеграції механізмів верифікації на рівні Kubernetes-подів.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є проведення перевірки цілісності на рівні окремих подів у розподілених кластерах з обмеженими обчислювальними ресурсами, а також зменшення часу проведення процесу верифікації шляхом дослідження та проектування архітектури віддаленої верифікації Kubernetes подів для edge-пристроїв на базі Raspberry Pi з використанням апаратного TPM-модуля Infineon OPTIGA SLB 9670.

Основні завдання дослідження: 1) проаналізувати традиційні підходи та фреймворки віддаленої верифікації і виокремити їхні переваги та недоліки в межах мікросервісних архітектур; 2) запропонувати архітектуру віддаленої верифікації Kubernetes подів для пристроїв на базі Raspberry Pi, що заснована на інтеграції апаратних модулів TPM 2.0, використанні підсистеми IMA з модифікованим шаблоном вимірювань `sgroup-path`, а також застосуванні декларативної моделі керування через механізми CRD та користувацьких контролерів; 3) провести експериментальне дослідження щодо часової ефективності запропонованої системи та порівняти її продуктивність із існуючим рішеннями.

Виклад основного матеріалу. Запропонована архітектура спрямована на забезпечення віддаленої верифікації Kubernetes подів у середовищі edge-обчислень, де обмежені ресурси, фізична доступність пристроїв і підвищений ризик компрометації вимагають посиленого контролю цілісності виконання. Пропонована архітектура дозволяє нативно інтегруватись у кластер Kubernetes без внесення змін до його ядра. Вона спирається на стандартні засоби розширення платформи, зокрема механізм визначення власних типів ресурсів і спеціалізовані керуючі компоненти. Завдяки цьому функції верифікації реалізуються як складова частина логіки керування кластером і виконуються в межах його звичайних процесів.

В рамках даної архітектури розглядається Kubernetes кластер, у якому одноплатні комп'ютери Raspberry Pi, виконують роль робочих вузлів, які розміщуються

безпосередньо на периферії мережі та відповідають за виконання контейнеризованих застосунків.

Контрольні та верифікаційні компоненти архітектури розміщуються на головному вузлі Kubernetes (control plane), який може бути реалізований як окремий сервер або більш потужний edge-шлюз. Вони відповідають за координацію процесів верифікації, зберігання довірених еталонів, перевірку криптографічних доказів та прийняття рішень щодо довіреності подів. Взаємодія між головним вузлом та edge-вузлами здійснюється виключно через Kubernetes API, що забезпечує узгодженість із декларативною моделлю керування та спрощує масштабування системи.

На кожній одноплатній комп'ютерній системі Raspberry Pi здійснюється розгортання спеціального агента, який працює з розширеними правами доступу та взаємодіє з апаратними й програмними засобами забезпечення довіри пристрою. У межах цієї роботи Raspberry Pi розглядається як периферійна платформа, що може виконувати роль верифікатора, до якого під'єднаний апаратний модуль TPM 2.0, що виступає як корінь довіри, а також підсистему контролю цілісності Linux для збору даних про виконуваний код в самих подах. Це дає змогу формувати криптографічно захищені підтвердження цілісності, які відображають фактичний стан ізольованих програмних середовищ на периферійному вузлі кластеру.

Особливість пропонованої архітектури є представлення станів вузлів кластеру, самих подів, а також модулів, що реалізують процеси верифікації у вигляді власних типів ресурсів. Такий підхід дозволяє інтегрувати механізм віддаленої верифікації в подієву модель Kubernetes і забезпечує автоматичну реакцію системи на зміни стану edge-вузлів або подів. У результаті верифікація подів стає безперервним процесом, тісно пов'язаним із життєвим циклом застосунків, що особливо важливо для edge-сценаріїв із динамічним навантаженням і частими оновленнями.

Загальну схему роботи пропонованої архітектури віддаленої верифікації kubernetes подів можна подати через наступу послідовність дій:

1. Под запускається на робочому вузлі, що представлений одноплатною комп'ютерною системою Raspberry Pi.
2. Агент на Raspberry Pi:
 - читає дані з TPM;
 - перевіряє цілісність коду пода;
3. Raspberry Pi надсилає доказ до керуючого вузла.
4. На керуючому вузлі:
 - перевіряється доказ;
 - вирішує: довірений под чи не довірений под.
5. Kubernetes кластер виконує реагування, тобто дозволяє або блокує або зупиняє под.

Таким чином, запропонована архітектура формує наскрізний ланцюг довіри від апаратної платформи Raspberry Pi до окремого Kubernetes pod'a, поєднуючи апаратні механізми безпеки, програмні засоби контролю цілісності та декларативну модель керування Kubernetes. Це робить можливим застосування віддаленої верифікації подів у розподілених інфраструктурах, що функціонують на периферії мережі (edge), і підвищує рівень довіри до виконання контейнеризованих застосунків на периферійних пристроях.

З точки зору компонентів запропонована архітектура віддаленої верифікації kubernetes подів для edge-пристроїв на базі Raspberry Pi складається із наступних компонентів (рис. 1): модуля реєстратора, обробника робочих вузлів, модулів агентів (на кожному робочому вузлі), агента стану, контролера стану кластера, обробника

подів, об'єкту CRD, що виконує запит на атестацію, верифікатора, підсистеми зберігання білого списку, підсистеми моніторингу подів.

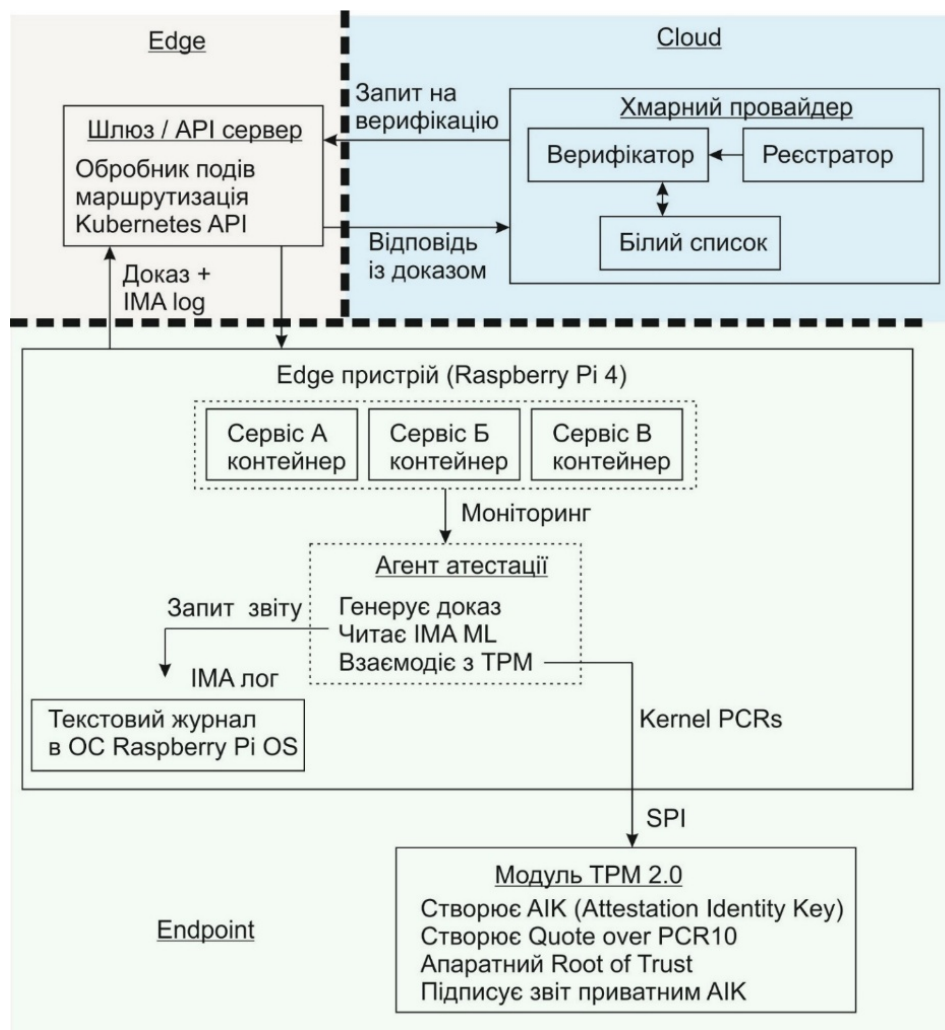


Рисунок 1— Узагальнена архітектура віддаленої верифікації Kubernetes подів для edge-пристроїв на базі Raspberry Pi

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо детальніше складові компоненти пропонованої архітектури. Одним із головних компонентів у пропонованій архітектурі є модуль реєстратора. Модуль реєстратора розгортається на вузлі керуючої площини і керує асиметричними ключами та сертифікатами, необхідними для забезпечення безпечного виконання системних операцій. Основними функціями реєстратора є [6]:

- реєстрація робочих вузлів у кластері шляхом зберігання їхніх відповідних ключів ідентифікації атестації (Attestation Identity Key, AIK), що дозволяє валідувати екземпляри доказів, подані модулем агента, розгорнутим на цьому робочому вузлі;
- надання сервісу, який інші компоненти можуть використовувати для взаємодії з ключами орендарів та робочих вузлів для верифікації підписів, обчислених за допомогою відповідних приватних частин;

- зберігання інформації про виробників ТРМ, включаючи проміжні та кореневі сертифікати центрів сертифікації, що дозволяє верифікувати сертифікати ЕК ТРМ, надані новими робочими вузлами під час їхньої реєстрації;

- ідентифікація залучених орендарів і збереження публічного ключа, який наданий ними під час процесу реєстрації в хмарній інфраструктурі; останній використовується для валідування підписів над запитаними діями, тим самим зберігаючи конфіденційність і запобігаючи несанкціонованому доступу до хмарних ресурсів.

Даний модуль розгортається на керуючій площині, а також керує чотирма ключовими типами даних, забезпечуючи централізований доступ без дублювання компетентностями у інших компонентах.

Спочатку, для орендарів – зареєстрованих користувачів кластера – фіксуються унікальний ідентифікатор UUID (для прив'язки подів до власника), загальна назва та публічний ключ, наданий постачальнику хмари для аутентифікації запитів. Це дозволяє відстежувати поди без розкриття конфіденційної інформації.

Далі, для робочих вузлів – довірених елементів кластера – зберігаються UUID (отриманий під час реєстрації), ім'я хоста та ключ АІК, доведений як належний ТРМ вузла. АІК слугує для верифікації доказів атестації і криптозвітів (quote), гарантуючи апаратну автентичність.

Щодо виробників ТРМ, модуль реєстратор утримує список визнаних TCG-виробників з комерційними назвами та 4-байтними ідентифікаторами, які повертаються ТРМ і використовуються в ланцюгу сертифікатів ЕК для перевірки властивостей чіпа.

Нарешті, для сертифікатів виробників ТРМ зберігаються кореневі та проміжні СА: з полями загальної назви та самим сертифікатом. Це охоплює ієрархію, де кореневі СА підписують проміжні, а ті – сертифікати для сімейств пристроїв, забезпечуючи повну валідність ланцюга.

Реєстратор надає уніфікований сервіс для інших компонентів: вони надсилають підписи для верифікації, уникаючи самостійного керування ключами чи перевірки ланцюгів. Такий підхід мінімізує ризики, як-от man-in-the-middle-атаки з підміною ключів, і оптимізує безпеку, зберігаючи всі матеріали в одному захищеному місці.

Ще одним компонентом є обробник робочих вузлів. Обробник робочих вузлів розгортається на головному вузлі і керує процесом реєстрації робочих вузлів, що приєднуються до кластера, завершуючись зберіганням UUID, який унікально ідентифікує кожен робочий вузол і пов'язує його з відповідним АІК у модулі реєстратора. Процес реєстрації робочого вузла включає верифікацію сертифіката ЕК ТРМ, демонстрацію резидентності отриманого АІК та верифікацію довіреного завантаження.

Реєстрація робочого вузла в системі верифікації виконується перед процесом приєднання вузла до кластера, оскільки необхідно створити на ньому агента для взаємодії з його ТРМ. Після завершення реєстрації обробник робочих вузлів комунікує з модулем реєстратора для зберігання інформації про новододаний вузол і асоціює з ним екземпляр агента стану. Також даний модуль виконує розподіл на новозареєстровані робочі вузли публічний ключ модуля верифікатора, необхідний для аутентифікації запитів атестації.

Іншим компонентом, який автоматично розгортається на кожному робочому вузлі та відповідає за керування взаємодією з ТРМ, журналом вимірювань ІМА та цільовим середовищем верифікації є модуль агенту. Основна його функція полягає у створенні АІК ключа та розв'язанні активаційних викликів для останнього під час

реєстрації робочого вузла кластера, зборі тверджень, генерації відповідних доказів та поданні цих даних модулю верифікатора для оцінки.

Ще одним компонентом є агент стану CRD – спеціальний ресурс у Kubernetes, який відстежує стан довіри подів орендарів та робочого вузла, на якому вони виконуються. Екземпляр цього ресурсу створюється для кожного робочого вузла для точного асоціювання кожного пода з вузлом, на якому він розгорнутий. Даний модуль діє як централізований реєстр інформації про довіру, оновлюваний виключно модулем верифікатора у відповідь на результат верифікації доказів. Варто відзначити, що модифікований стан довіри, асоційований з робочим вузлом та кожним подом, розгорнутим на ньому, використовується для збереження останнього результату атестації та надання посилання на нього іншим компонентам.

Модуль контролера стану кластера розгортається на головному вузлі та виконує цикл керування для моніторингу стану робочих вузлів та подів, записаних у кожному агенті CRD. Основними його функціями є виявлення змін, які можуть вимагати коригувальних дій, таких як видалення пода або вилучення робочого вузла, при умові якщо вони були визначені модулем верифікатора як не довірені. Контролер діє як сторона, що покладається на атестацію, забезпечуючи виконання відповідних дій для збереження цілісності кластера на основі змінного стану довіри робочих вузлів та подів.

Іншим компонентом є обробник подів, що розгортається на головному вузлі й надає орендарям інтерфейс для видачі аутентифікованих запитів на розгортання подів та атестацію. Обробник подів виконує наступні функції: верифікує підпис запиту орендаря за допомогою модуля реєстратора для забезпечення його автентичності та незмінності, а потім обробляє його; розгортає поди в просторах імен (namespaces), увімкнених для атестації; перевіряє, чи под, для якого запитана атестація, належить орендарю, що запитує, а потім видає екземпляр об'єкту CRD, що виконує запит на атестацію для запуску модулем верифікатора процесу атестації з залученим модулем агента.

Об'єкт CRD, що виконує запит на атестацію є спеціальним ресурсом, який визначає всю інформацію, необхідну для запуску атестації над цільовим подом, споживаний модулем верифікатора. Даний об'єкт надає інформацію для взаємодії із модулем агента робочого вузла, на якому виконується под. Також об'єкт CRD, що виконує запит на атестацію включає НМАС, обчислений над параметрами запиту за допомогою секрету, спільного з модулем верифікатора, для запобігання обробки останнім неавтентичних запитів атестації.

Іншим компонентом є модуль верифікатора, який розгортається на головному вузлі та відповідає за проведення атестації подів відповідно до вхідних екземплярів об'єкту CRD, що виконує запит на атестацію. Модуль верифікатора здійснює: виконання циклу керування для моніторингу вхідних запитів атестації, використання секрету, що спільний з обробником подів, для валідування отриманого НМАС, тим самим забезпечуючи цілісність запиту атестації, запускає процес атестації з Агентом робочого вузла, що хостить цільовий под, реалізує політику оцінки для оцінювання отриманих доказів та оновлює атрибути агенту CRD цільового робочого вузла відповідно до результату валідування.

Підсистема зберігання білого списку розгортається на головному вузлі та визначає репозиторій затверджених та довірених еталонних значень для всіх сервісів, конфігурацій робочих вузлів та контейнеризованих застосунків, що виконуються в подах. Основними функціями підсистеми зберігання білого списку є: надання модулю верифікатора сервісу для порівняння довірених вимірювань з твердженнями (Claims)

доказів, поданих модулем агентом, централізація керування затвердженим програмним забезпеченням та конфігураціями в одному компоненті, забезпечуючи зберігання кожного запису разом з відповідними еталонними вимірюваннями.

Останнім компонентом пропонованої системи є підсистема моніторингу подів, яка також розгортається на головному вузлі й виявляє створення та видалення подів у кластері. Основними функціями підсистеми моніторингу є: реалізація циклу керування для моніторингу подів, розгорнутих або видалених з усіх робочих вузлів кластера, оновлення відповідного екземпляру агенту стану залученого робочого вузла для відстеження подів, що виконуються та можуть бути предметом верифікації.

Експериментальні дослідження та оцінка ефективності запропонованих рішень. Пропонована архітектура досліджувалась у кластері Kubernetes, який складався із двох елементів – головного та робочого вузла. На головному вузлі було встановлено Ubuntu Server 22.04.3 LTS з ядром версії 5.15.0-91-generic, оскільки ця конфігурація забезпечувала найкращу сумісність з Kubernetes v1.34 та підтримку необхідних kernel features для IMA. Робочий вузол отримав Raspberry Pi OS Lite (Debian Bookworm) з модифікованим ядром 6.1.0, до якого було застосовано патч для підтримки шаблону ima-cgpath. До робочого вузла через SPI шину було підключено апаратний TPM-модуля Infineon OPTIGA SLB 9670.

Процес модифікації ядра Linux для робочого вузла Kubernetes розглядався як необхідна умова коректної роботи механізмів вимірювання цілісності в контейнеризованому середовищі. У стандартній реалізації IMA всі вимірювання формуються на рівні вузла і не містять контексту контейнера або пода, у межах якого виконується процес. За відсутності такого контексту неможливо однозначно співвіднести зафіксовані вимірювання з конкретними подами, що унеможлиблює подальшу атестацію та аналіз безпеки на рівні контейнерів у Kubernetes кластері.

Для усунення цього обмеження було реалізовано модифікацію ядра Linux, спрямовану на розширення структури вимірювань IMA додатковим атрибутом, який відображає приналежність процесу до конкретної контрольної групи. Оскільки в Kubernetes кожен Pod та контейнер ієрархічно представлений у вигляді cgroup, повний шлях cgroup у файловій ієрархії ядра є надійним ідентифікатором виконуваного Pod'a. Саме тому до шаблону вимірювань IMA було додано нове поле cgroup-path, яке зберігає цей шлях у текстовому вигляді. Технічно модифікація була реалізована шляхом внесення змін до файлу security/integrity/ima/ima_template.c, який відповідає за формування та відображення полів шаблону IMA.

Для реалізації пропонованої архітектури всі компоненти були розроблені як контейнеризовані сервіси, розгорнуті в Kubernetes кластері. Такі модулі як модуль реєстратора, обробник робочих вузлів, верифікатор, обробник подів та підсистема зберігання білого списку виконувалися як розгортання (тип ресурсу Deployment) із однією реплікою на головному вузлі та були написані на мові Go із використанням бібліотеки controller-runtime для реалізації власних контролерів. Модулі агента розгорталися як DaemonSet на кожному робочому вузлі (що представляв собою Raspberry Pi) і були реалізовані на мові Python із використанням бібліотек tpm2-pytss та gRPC. Всі взаємодії між компонентами здійснювалися через Kubernetes API та внутрішній gRPC-канал (для передачі підтвердження від агента до модуля верифікатора).

Оцінка ефективності розробленої системи верифікації проводилася через порівняння з базовою конфігурацією Kubernetes кластера без механізмів верифікації, а також з reference implementation на базі Keylime. В процесі експериментальних досліджень було проведено заміри часових характеристик, що включали виконання

повного циклу верифікації. Вимірювання виконувалися на ідентичному апаратному забезпеченні Raspberry Pi 3 Model B з 4GB RAM для забезпечення коректного порівняння. Для пода із двома контейнерами на базі образу Redis розмір IMA логу складав приблизно 18000 записів, з яких 247 були релевантні для цього Pod'a (рис. 2). Час верифікації одного такого Pod'a становив 4.2 секунди, з розподілом: генерація доказу на робочому вузлі (включаючи TPM quote) – 1.8 секунди, передача по мережі – 0.3 секунди, валідація на модулі верифікації (включаючи парсинг IMA log та запити до підсистеми зберігання білого списку) – 2.1 секунди. При збільшенні кількості одночасних атестацій до 10 Подів середній час зростав до 6.7 секунд за рахунок конкуренції за TPM ресурс, який підтримує лише послідовний доступ.

Порівняння з Keylime для верифікації показало перевагу пропонованого спеціалізованого рішення. Зокрема Keylime потребувала 7.3 секунди для верифікації одного робочого вузла (що включало под неявно), але не могла розрізняти окремі поди, що робило неможливим вибіркове видалення скомпрометованого пода без перезавантаження всього вузла кластера, тоді як пропонується архітектура мала підтримку точкового виявлення порушень безпеки (на рівні окремих компонентів).

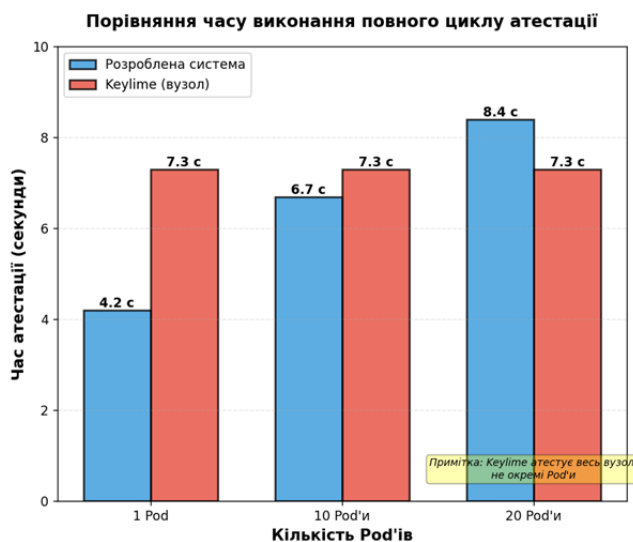


Рисунок 2 – Порівняння часу виконання повного циклу верифікації на базі пропонованої архітектури та Keylime

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Таким чином, проведені дослідження показали наявні переваги та проблемні аспекти реалізації віддаленої верифікації подів на периферійних пристроях. У розрізі цього було запропоновано архітектуру віддаленої верифікації Kubernetes подів, яка нативно інтегрується в Kubernetes кластер, без змін ядра, використовуючи стандартні механізми розширюваності, такі як CRD та користувацькі контролери. Запропонована архітектура дає змогу контролювати стан контейнерів на одноплатних комп'ютерних системах Raspberry Pi та подібних периферійних пристроях. Для цього використовувались апаратний TPM-модуль Infineon OPTIGA SLB 9670, який виступав джерелом довіри, та IMA, яка збирала вимірювання з урахуванням того, як саме працюють поди. Основними елементами архітектури стали спеціальні CRD для відображення станів верифікації, контролери на головному вузлі для координації процесів та агент, що розташовується на кожному робочому вузлі кластеру для створення криптографічних доказів.

Для проведення експериментальних досліджень було здійснено імплементацію пропонованої архітектури в розгорнутий Kubernetes кластер. Порівняння здійснювалось із фреймворком Keylime. Було встановлено, що для пропонованого рішення час повного циклу верифікації одного поду склав 4,2, що є швидшим за схожий процес, реалізований через Keylime.

Список літератури

1. Mo W., Wang T., Zhang S., Zhang J. An active and verifiable trust evaluation approach for edge computing. *J. Cloud Comput.* 2020. Vol. 9. P. 51. doi: 10.1186/s13677-020-00202-w
2. Rostampour S., Bagheri N., Bendavid Y., Safkhani M., Kumari S., Rodrigues J. J. An authentication protocol for next generation of constrained IoT systems. *IEEE Internet Things Journal*. 2022. Vol. 9. P. 21493–21504. doi: 10.1109/JIOT.2022.3184293
3. Chen B., Wan J., Celesti A., Li D., Abbas H., Zhang Q. Edge Computing in IoT-Based Manufacturing. *IEEE Commun. Mag.* 2018. № 56. P. 103–109.
4. Rupanetti D., Kaabouch N. Combining Edge Computing-Assisted Internet of Things Security with Artificial Intelligence: Applications, Challenges, and Opportunities. *Applied Science* 2024. № 14. P. 7104.
5. Keylime: remote boot attestation and runtime integrity management solution. Cloud Native Computing Foundation (CNCF). URL: <https://keylime.dev/> (дата звернення: 10.02.2026)
6. Zaritto F. Kubernetes Pods Remote Attestation : PhD Thesis. Politecnico di Torino, 2024. 102 p.
7. Zaritto F., Bravi E., Sisinni S., Lioy A. Extending Kubernetes for Pods Integrity Verification. *Journal of Network and Systems Management*. 2026. Vol 34, 14.
8. Scopelliti G., Amir-Mohammadian S., Csallner C. Trusting the Cloud-Native Edge: Remotely Attested Kubernetes Workers. 2024. arxiv.org/abs/2405.10131.
9. Goethals T., De Turck F., Volckaert B. Extending Kubernetes Clusters to Low-Resource Edge Devices Using Virtual Kubelets. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020, vol. 10, no. 4, pp. 2623–2636.
10. Fernandez G. P., Brito A. Secure container orchestration in the cloud: policies and implementation. *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. New York, NY : ACM, 2019. P. 138–145.
11. Косаревський Б. В., Тецький А. Г. Сучасні підходи до розгортання інфраструктури мобільних інтелектуальних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 2(32), с. 33–48.
12. Коваленко О. Є. Інтелектуалізація граничних обчислень Інтернету речей. *Математичні машини і системи*. 2024. № 3–4. С. 50–68.

References

1. Mo, W., Wang T., Zhang S., Zhang J. (2020) An active and verifiable trust evaluation approach for edge computing. *J. Cloud Comput.* 9, 51. doi: 10.1186/s13677-020-00202-w
2. Rostampour, S., Bagheri, N., Bendavid, Y., Safkhani, M., Kumari, S., Rodrigues, J. J. (2022) An authentication protocol for next generation of constrained IoT systems. *IEEE Internet Things Journal*. 9, 21493–21504. doi: 10.1109/JIOT.2022.3184293
3. Chen, B., Wan, J., Celesti, A., Li, D., Abbas, H., Zhang, Q. (2018) Edge Computing in IoT-Based Manufacturing. *IEEE Commun. Mag.* 56, 103–109.
4. Rupanetti, D., Kaabouch, N. (2024) Combining Edge Computing-Assisted Internet of Things Security with Artificial Intelligence: Applications, Challenges, and Opportunities. *Applied Science*. 14, 7104.
5. Keylime: remote boot attestation and runtime integrity management solution. (2026, February 10). *Cloud Native Computing Foundation (CNCF)*. <https://keylime.dev/>
6. Zaritto, F. Kubernetes Pods Remote Attestation (2024): PhD Thesis. Politecnico di Torino.
7. Zaritto, F., Bravi, E., Sisinni, S., Lioy, A. (2026) Extending Kubernetes for Pods Integrity Verification. *Journal of Network and Systems Management*. 34, 14.
8. Scopelliti, G., Amir-Mohammadian, S., Csallner, C. (2024) Trusting the Cloud-Native Edge: Remotely Attested Kubernetes Workers. arxiv.org/abs/2405.10131.
9. Goethals, T., De Turck, F., Volckaert, B. Extending Kubernetes Clusters to Low-Resource Edge Devices Using Virtual Kubelets (2020). *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 10 (4), 2623–2636.

10. Fernandez, G. P., Brito, A. Secure container orchestration in the cloud: policies and implementation (2019). *Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*. New York, NY : ACM 138-145.
11. Kosarevskyi, B. V., Tetskyi, A. H. (2025) Suchasni pidkhody do rozghortannia infrastruktury mobilnykh intelektualnykh system. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti*. 2(32), 33–48.
12. Kovalenko, O. Ye. (2024) Intelektualizatsiia hranychnykh obchyslen Internetu rechei. *Matematychni mashyny i systemy*. 3–4, 50–68.

Andrii Nicheporuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vadym Hurskyi**

Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

Architecture of Remote Verification of Kubernetes Containerized Applications for Edge Devices Based on Raspberry Pi

This study addresses the security gap in edge computing environments by proposing a specialized architecture for the remote verification of Kubernetes pods. While traditional frameworks like Keylime focus on node-level integrity, they fail to provide the granularity required for microservice-oriented infrastructures where multiple isolated workloads (pods) run on a single node.

The proposed architecture natively integrates into the Kubernetes ecosystem using standard extensibility mechanisms, specifically Custom Resource Definitions (CRDs) and custom controllers, allowing verification logic to operate as a seamless part of the cluster's control plane without requiring changes to the core Kubernetes code. The system is specifically optimized for resource-constrained edge devices, such as the Raspberry Pi 3 Model B, utilizing the Infineon OPTIGA SLB 9670 hardware TPM 2.0 module as a hardware root of trust.

To achieve granular pod-level attestation, the architecture leverages the Linux Integrity Measurement Architecture (IMA). A key technical innovation includes a kernel modification that introduces the cgroup-path attribute to the IMA measurement template, enabling the system to uniquely associate cryptographic measurements with specific Kubernetes pods. The architecture consists of several core components: a Registrar module for key management, a Verifier for evaluating evidence against trusted whitelists, and a Node Agent that generates cryptographic quotes via gRPC.

Experimental results obtained from a deployed cluster show that the proposed solution completes a full verification cycle in 4.2 seconds for a single pod, significantly outperforming the 7.3 seconds required by the Keylime framework for a similar process. Furthermore, unlike traditional tools, this architecture enables precise remediation, such as terminating only the compromised pod without the need to reboot or isolate the entire worker node, thus preserving the availability of other edge services.

Verification process, Edge devices, TPM module, Raspberry Pi, Integrity Measurement Architecture (IMA)

Одержано (Received) 12.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 18.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

П. С. Новіцький, М. В. Степаняк, доц., канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

e-mail: pavlo.s.novitskyi@lpnu.ua

Комп'ютерне моделювання та параметричний аналіз завадостійкості GNSS-приймачів літальних об'єктів

У статті представлено розробку математичної моделі та програмної реалізації комп'ютерного моделювання впливу електромагнітних завад на навігаційні підсистеми кіберфізичних систем класу безпілотних літальних апаратів. Запропоновано метод чисельного оцінювання ефективності алгоритмів цифрової обробки сигналів у приймачах навігаційних супутникових систем через введення узагальненого коефіцієнта завадостійкості. Для врахування невизначеності вхідних параметрів застосовано метод Монте-Карло з 10000 симуляцій, що дозволяє отримати статистичний розподіл дальності придушення та 90% довірчі інтервали. Проведено аналіз чутливості моделі та верифікацію шляхом порівняння з експериментальними даними з літературних джерел.

цифрова обробка сигналів, алгоритм адаптивної фільтрації, завадостійкість, літальний об'єкт, електромагнітна завада, навігаційна система, адаптивна антенна решітка

Постановка проблеми. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) є типовими представниками кіберфізичних систем (CPS), що інтегрують обчислювальні компоненти, комунікаційні мережі та фізичні процеси. Більшість сучасних БПЛА для виконання навігаційних завдань покладаються на сигнали глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), таких як GPS та GLONASS. Ця залежність є їхньою критичною вразливістю.

Сучасні підходи передбачають використання направлених електромагнітних завад (DEMI), які дозволяють концентрувати енергію випромінювання у вузькому просторовому секторі. Однак існуючі інженерні моделі не завжди враховують сучасні методи підвищення завадостійкості приймачів, що призводить до завищених оцінок ефективності систем РЕБ. Це створює потребу в розробці комп'ютерної моделі з можливістю стохастичного аналізу та оцінки довірчих інтервалів результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розробки ефективних контрзаходів протидії БПЛА необхідно глибоко розуміти фізичні принципи взаємодії електромагнітних завад із корисними сигналами в каналі приймача GNSS. Ключовим інструментом для прогнозування результатів такої взаємодії та кількісної оцінки ефективності систем РЕБ є математичне моделювання, що дозволяє визначити оптимальні параметри засобів придушення та розрахувати зони їх ефективного застосування [1-3].

У сфері комп'ютерної інженерії активно розвиваються методи моделювання GNSS-систем. Ху та співавтори [4] розробили програмно-апаратний стенд на базі SDR з GPU-прискоренням для тестування алгоритмів адаптивних антенних решіток. Mosavi та співавтори [5] запропонували алгоритм придушення завад на основі вейвлет-пакетного перетворення. Radoš та співавтори [6] систематизували сучасні алгоритмічні підходи до детектування завад. Окрім того, українські дослідники проаналізували архітектуру систем навігації БПЛА як кіберфізичних систем [7].

Підсумовуючи, проведений огляд літератури виявив такі недоліки існуючих

моделей оцінки ефективності завад: відсутність врахування коефіцієнта завадостійкості сучасних приймачів з адаптивною фільтрацією; недостатнє обґрунтування меж застосовності спрощених моделей; відсутність аналізу чутливості результатів до варіації вхідних параметрів. Дана робота спрямована на усунення цих недоліків.

Постановка завдання. Метою є створення моделі, що повинна описувати: потужність корисного сигналу GNSS на вході антени ЛО; потужність направленої завади; спектральну щільність потужності внутрішніх шумів приймача; критерій ефективності – співвідношення сигнал / (шум+завада). Додатково поставлено такі завдання: врахувати завадостійкість приймача; визначити межі застосовності моделі; провести аналіз чутливості; верифікувати модель порівнянням з експериментальними даними із застосуванням методу Монте-Карло для врахування невизначеності параметрів та отримання статистичних оцінок результатів.

Виклад основного матеріалу. З позиції комп'ютерної інженерії, БпЛА розглядається як кіберфізична система з тривірневою архітектурою: рівень сприйняття (сенсори, включаючи GNSS-приймач), рівень обробки (бортовий комп'ютер з алгоритмами навігації) та рівень виконання (система керування). Описана модель є цілеспрямованим спрощенням реальних фізичних процесів, призначеним для проведення аналітичних розрахунків та чисельного оцінювання, та базується на методологічних підходах, викладених у попередніх дослідженнях [11, 12].

Запропонована модель базується на таких припущеннях та має відповідні обмеження:

1. Пряма видимість (LOS): модель не враховує багатопроменеве поширення. Це припущення справедливе для висот ЛО понад 100 м над забудовою або у відкритій місцевості, де відбиті сигнали на 15-20 дБ слабші за прямі.

2. Квазістаціонарний режим: доплерівський зсув не враховується. Для швидкостей ЛО до 50 м/с доплерівський зсув становить ± 250 Гц, що значно менше смуги пропускання приймача (2 МГц) і не впливає на енергетичні співвідношення.

3. Лінійність приймального тракту: модель справедлива при рівнях завади, що не викликають насичення вхідних підсилювачів (типово до -50 дБм на вході).

4. Шумова завада: модель оптимізована для широкосмугових шумових завад. Для імпульсних або вузькосмугових завад потрібні модифікації.

Потужність корисного сигналу (P_S) на вході приймача ЛО може бути розрахована за допомогою рівняння поширення радіохвиль, також відомим як рівняння Фріса [8]:

$$P_S = P_{SAT} \cdot G_{SAT} \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{SAT}} \right)^2 \cdot L_{atm}, \quad (1)$$

де P_{SAT} – потужність передавача навігаційного супутника; G_{SAT} – коефіцієнт підсилення антени супутника в напрямку ЛО; G_R – коефіцієнт підсилення приймальної антени ЛО в напрямку супутника; λ – довжина хвилі сигналу (для частоти GPS L1 ~ 19 см); R_{SAT} – відстань від супутника до ЛО. Це значення залежить від конкретної системи: для GPS орбітальна висота становить ~ 20180 км, для GLONASS ~ 19100 км; L_{atm} – коефіцієнт, що враховує втрати на поширення в атмосфері.

Для моделювання сигналу направленої електромагнітної завади (DEMI) приймемо найгірший, з точки зору приймача, випадок – прицільну шумову заваду, спектр якої повністю перекриває смугу обробки корисного сигналу. Потужність такої завади (P_J) на вході приймача ЛО описується відповідним рівнянням:

$$P_J = P_{JAM} \cdot G_{JAM} \cdot G_{RJAM} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{SAT}} \right)^2 \cdot L_{pol}, \quad (2)$$

де P_{JAM} – потужність передавача завад; G_{JAM} – коефіцієнт підсилення його антени в напрямку ЛО. G_{RJAM} – коефіцієнт підсилення приймальної антени ЛО в напрямку

джерела завади; R_{JAM} – відстань від джерела завади до ЛО; L_{pol} – коефіцієнт, що враховує втрати на неузгодженість поляризації ($L_{pol} = 0.5$ для лінійної поляризації з антеною RHCP).

Сучасні GNSS-приймачі використовують методи підвищення завадостійкості: адаптивну просторову фільтрацію (CRPA), часову фільтрацію та алгоритми придушення завад. Ефективність цих методів характеризується коефіцієнтом завадостійкості K_{AJF} (Anti-Jamming Factor), який показує, у скільки разів зменшується ефективна потужність завади після обробки:

$$P_{J_{eff}} = \frac{P_J}{K_{AJF}}, \quad (3)$$

Типові значення K_{AJF} : для цивільних приймачів без захисту $K_{AJF} = 1$ (0 дБ); для приймачів з базовою фільтрацією $K_{AJF} = 10-30$ (10-15 дБ); для приймачів з CRPA (адаптивними антенними решітками) $K_{AJF} = 100-1000$ (20-30 дБ) [3, 7].

Спектральна щільність потужності шумів $N_0 = k \cdot T_{sys}$, де k – стала Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T_{sys} – шумова температура системи. Спектральна щільність завади:

$$I^0 = \frac{P_{J_{eff}}}{B_R} = \frac{P_J}{(B_R \cdot K_{AJF})}. \quad (4)$$

Узагальнена формула для $C / (N_0 + I_0)$ з урахуванням завадостійкості приймача:

$$\frac{C}{N_0 + I_0} = \frac{P_S}{k \cdot T_{sys} + \frac{P_J}{B_R \cdot K_{AJF}}}. \quad (5)$$

Кожен GNSS-приймач має мінімально допустимі значення відношення потужності носія до спектральної щільності шуму $C / (N_0 + I_0)$ для виконання ключових операцій: захоплення сигналу, його супроводу та декодування навігаційних даних. Типові порогові значення для цивільних приймачів наведено в таблиці 1 [8, 9].

Таблиця 1 – Порогові значення $C / (N_0 + I_0)$ для різних режимів роботи приймача

Режим роботи приймача	Типове порогове значення $C / (N_0 + I_0)$, дБ-Гц	Опис наслідків придушення
Захоплення сигналу	40–45	Неможливість «холодного старту» (коли приймач вмикається без попередніх даних) або повторного захоплення сигналу після його втрати.
Супровід сигналу	30–35	Втрата супроводу супутника ("зрив захвату").
Декодування даних	25–28	Неможливість отримати ефемериди та альманахи, помилки в часі. Координати можуть бути неточними або зовсім не визначатися.

Джерело: розроблено авторами на основі [7, 8]

З аналізу таблиці випливає, що ключовим критерієм ефективного придушення є зниження показника $C / (N_0 + I_0)$ нижче порогу супроводу сигналу (наприклад, 30–32 дБ-Гц). Це призводить до "зриву захвату" сигналів від супутників, після чого приймач повністю або частково втрачає можливість визначати свої координати.

Узагальнена формула максимальної дальності придушення з урахуванням завадостійкості:

$$R_{JAM_{max}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{JAM} \cdot G_{JAM} \cdot G_{R_{JAM}} \cdot L_{pol}}{B_R \cdot K_{AJF} \cdot \left(\frac{P_S}{C / (N_0 + I_0)} - N_0 \right)}} \quad (6)$$

Ця формула є ключовим результатом роботи і принципово відрізняється від класичної формули наявністю коефіцієнта завадостійкості K_{AJF} . При $K_{AJF} = 1$ (відсутність захисту) формула зводиться до класичного випадку, що підтверджує коректність узагальнення.

Для врахування невизначеності вхідних параметрів розроблено програмна реалізація мовою Python з використанням бібліотек NumPy та SciPy із застосуванням методу Монте-Карло, що передбачає генерацію $N = 10000$ випадкових реалізацій вхідних параметрів з логнормальним розподілом та обчислення відповідних значень дальності придушення.

Для кожного параметра x випадкове значення генерується як:

$$x_i = x_{nom} \cdot \exp(\sigma \cdot \xi_i), \quad (7)$$

де x_{nom} – номінальне значення, σ – параметр невизначеності ($\sigma = 0,1$ для $\pm 20\%$), ξ_i – стандартна нормальна випадкова величина. Нижче наведено ключовий фрагмент програмного коду моделювання:

```
import numpy as np

def monte_carlo_simulation(n_sim=10000, K_ajf=1, sigma=0.1):
    np.random.seed(42)

    # Генерація випадкових варіацій параметрів
    P_jam = P_JAM_NOM * np.random.lognormal(0, sigma, n_sim)
    G_jam = G_JAM_NOM * np.random.lognormal(0, sigma, n_sim)
    K_ajf_samples = K_ajf * np.random.lognormal(0, 0.25, n_sim)

    # Розрахунок дальності придушення за формулою (1)
    R_jam = np.zeros(n_sim)
    for i in range(n_sim):
        num = P_jam[i] * G_jam[i] * G_R * L_POL
        den = B_R * K_ajf_samples[i] * (P_S/SINR_MIN - N0)
        R_jam[i] = (LAMBDA/(4*np.pi)) * np.sqrt(num/den)

    # Статистичний аналіз результатів
    return {
        'mean': np.mean(R_jam) / 1000, # км
        'std': np.std(R_jam) / 1000, # std. відхилення
        'p5': np.percentile(R_jam, 5) / 1000, # 5-й перцентиль
        'p95': np.percentile(R_jam, 95) / 1000 # 95-й перцентиль
    }

    # Приклад використання
    if __name__ == "__main__":
        for K in [1, 10, 100, 1000]:
            res = monte_carlo_simulation(n_sim=10000, K_ajf=K)
            print(f"K_AJF={K:4d}: {res['mean']:.2f} км, "
                  f"90% ДІ: [{res['p5']:.2f} - {res['p95']:.2f}] км")
```

У наведеному коді функція `monte_carlo_simulation` приймає кількість симуляцій n_{sim} , номінальне значення коефіцієнта завадостійкості K_{ajf} та параметр невизначеності σ . Результатом є словник зі статистичними характеристиками: середнє значення, стандартне відхилення та 5-й і 95-й перцентилі для побудови 90% довірчого інтервалу (ДІ) для визначення впливу значення коефіцієнта завадостійкості на дальність приглушення сигналу літального об'єкту, які зведено в таблицю 2.

Таблиця 2 – Результати комп'ютерного моделювання методом Монте-Карло

Тип приймача	K_{AJF}	Середнє, км	Стд. відх., км	90% ДІ, км
Без захисту	1	22,34	3,20	[17,46 – 27,99]
Базова фільтрація	10	7,07	1,01	[5,52 – 8,85]
Адаптивна решітка (CRPA)	100	2,23	0,32	[1,75 – 2,80]
Військовий клас	1000	0,71	0,10	[0,55 – 0,89]

Джерело: отримано авторами як результат розробленого програмного забезпечення

Результати комп'ютерного моделювання візуалізовано на рис. 1 на якому: графік (а) демонструє статистичний розподіл дальності придушення для різних типів приймачів; графік (б) показує залежність дальності від коефіцієнта завадостійкості з 90% довірчим інтервалом; торнадо-діаграма (в) ілюструє результати аналізу чутливості; графік (г) підтверджує адекватність моделі порівнянням з експериментальними даними.

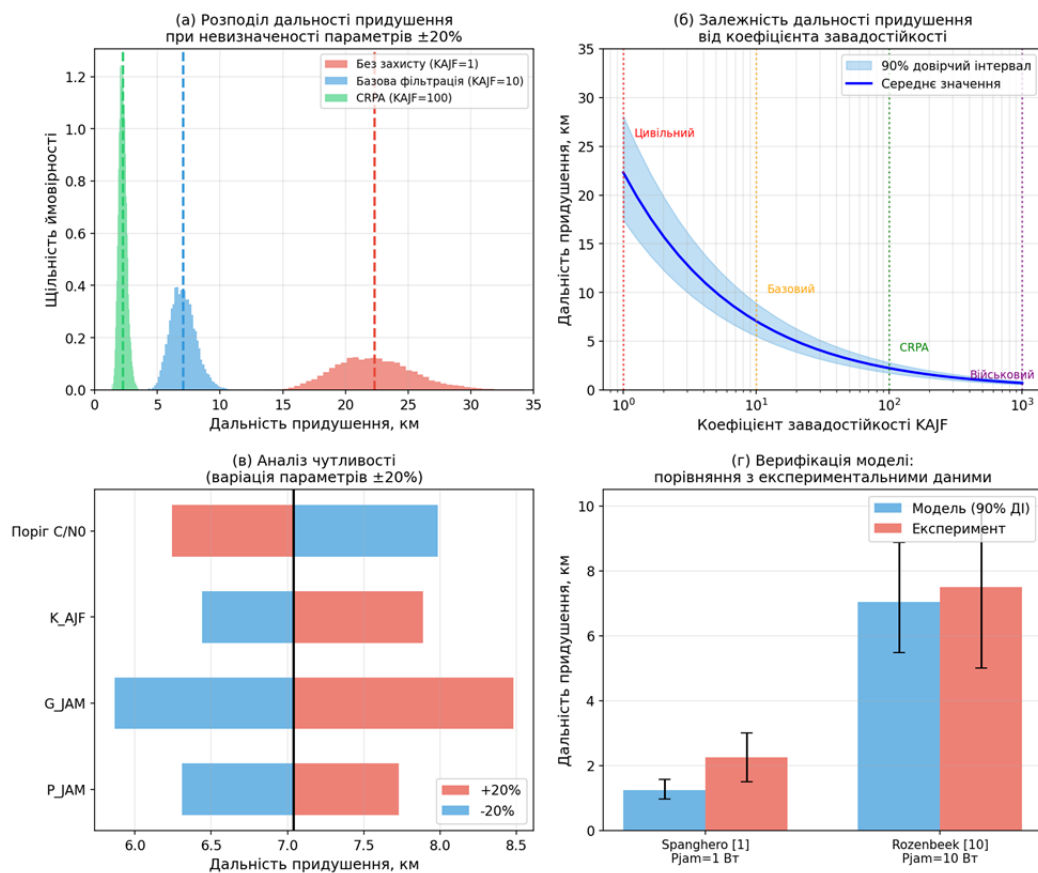


Рисунок 1 – Результати комп'ютерного моделювання методом Монте-Карло

Джерело: отримано авторами як результат розробленого програмного забезпечення

Аналіз чутливості (рис. 1) показав, що найбільш критичними параметрами є коефіцієнт завадостійкості K_{AJF} та поріг C/N_0 , оскільки їх невизначеність безпосередньо впливає на ширину довірчого інтервалу результатів. Різниця між детерміністичною та стохастичною моделлю складає 1,3%, що підтверджує коректність програмної реалізації.

Верифікація моделі (рис. 1) проведена порівнянням з експериментальними даними [1, 10]. Для експерименту Spanghero ($P_{JAM} = 1$ Вт) модель дає 2,1 км, експеримент — 1,5–3 км. Для даних Rozenbeek при врахуванні $K_{AJF} \approx 10$ отримуємо 7 км проти експериментальних 5–10 км. Відносна похибка не перевищує 30%.

Висновки. У ході роботи було розроблено узагальнену модель для оцінки ефективності направлених електромагнітних завад на приймачі супутникових навігаційних систем. На відміну від існуючих моделей, запропонований підхід має такі переваги:

1. Введено коефіцієнт завадостійкості K_{AJF} , що дозволяє враховувати різні класи приймачів — від цивільних до оборонних з адаптивними антенними решітками.

2. Чітко визначено межі застосовності моделі: пряма видимість, швидкість літального об'єкта до 50 м/с, рівні завади до -50 дБм, широкосмугові шумові завади.

3. Проведено аналіз чутливості, який показав, що найбільш критичними на дальність приглушення сигналу літального об'єкта є такі параметри як коефіцієнт завадостійкості та поріг супроводу.

4. Верифікація порівнянням з експериментальними даними з літературних джерел підтвердила адекватність моделі з похибкою до 30%.

5. Розроблено програмне забезпечення мовою Python для комп'ютерного моделювання методом Монте-Карло ($N = 10000$), що дозволяє отримувати статистичні оцінки та 90% довірчі інтервали дальності придушення.

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні систем радіоелектронної боротьби та оцінці вразливості літальних об'єктів. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі для імпульсних та вузькосмугових завад.

Список літератури

1. Spanghero, F. Geib, R. Panier and P. Papadimitratos, "Uncovering GNSS Interference with Aerial Mapping UAV," 2024 *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2024, pp. 1-10, DOI: 10.1109/AERO58975.2024.10521434.
2. Johannes Rossouw van der Merwe, Johannes & Meister, Daniel & Otto, Christian & Stahl, Manuel & Rügamer, Alexander & Etzezarreta Martinez, Josu & Felber, Wolfgang. (2017). GNSS interference monitoring and characterisation station. 170-178. DOI: 10.1109/EURONAV.2017.7954206.
3. Yang, Xin & Liu, Wenxiang & Chen, Feiqiang & Lu, Zukun & Wang, Feixue. (2019). Analysis of the Effects Power-Inversion (PI) Adaptive Algorithm Have on GNSS Received Pseudorange Measurement. *IEEE Access*. PP. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2952886.
4. Xu H., Cui X., Lu M. An SDR-Based Real-Time Testbed for GNSS Anti-Jamming Algorithms Accelerated by GPU. *Sensors*. 2016. Vol. 16(3). P. 356. DOI: 10.3390/s16030356
5. Mosavi M.R., et al. A fast anti-jamming system based on wavelet packet transform for GPS receivers. *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21. P. 415–426. DOI: 10.1007/s10291-016-0535-z
6. Radoš K, Brkić M, Begušić D. Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS. *Sensors*. 2024; 24(13):4210. DOI: 10.3390/s24134210
7. Спаський Я., Бондаренко В., Бондаренко Н. Система управління та навігації БПЛА. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2025. 353(3.2). С. 181–185. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-353-25
8. T. Moore, "Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third edition", The Aeronautical Journal, vol. 123, no. 1266, pp. 1323–1323, 2019. DOI: 10.1017/aer.2019.98
9. Borio D., Dovis F., Kuusniemi H., Lo Presti L. Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. *Proceedings of the IEEE*. 2016. Vol. 104, No. 6. P. 1233–1245. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2543266
10. Rozenbeek D. J. *Evaluation of Drone Neutralization Methods Using Radio Jamming and Spoofing Techniques*. – Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering and Computer Science, 2020. – 84 с. – (Second Cycle, 30 Credits). Посилання: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1460807/FULLTEXT01.pdf>
11. Новіцький П. С., Степаняк М. В. Методи створення спрямованих електромагнітних завад для вибіркового впливу на GPS/GLONASS. 2024. 86(2), 105-112 DOI: 10.23939/istcm2025.02.105
12. Новіцький П. С., Степаняк М. В. Новітні технології зі створення електромагнітних завад для протидії літальним об'єктам. Комп'ютерні технології друкарства. 2024. 1(51), 121-133. DOI: 10.32403/2411-9210-2024-1-51-121-133

References

1. Spanghero, F. Geib, R. Panier and P. Papadimitratos, "Uncovering GNSS Interference with Aerial Mapping UAV," 2024 *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2024, pp. 1-10, DOI: 10.1109/AERO58975.2024.10521434.

2. Johannes Rossouw van der Merwe, Johannes & Meister, Daniel & Otto, Christian & Stahl, Manuel & Rügamer, Alexander & Etchezarreta Martinez, Josu & Felber, Wolfgang. (2017). GNSS interference monitoring and characterisation station. 170-178. DOI: 10.1109/EURONAV.2017.7954206.
3. Yang, Xin & Liu, Wenxiang & Chen, Feiqiang & Lu, Zukun & Wang, Feixue. (2019). Analysis of the Effects Power-Inversion (PI) Adaptive Algorithm Have on GNSS Received Pseudorange Measurement. IEEE Access. PP. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2952886.
4. Xu H., Cui X., Lu M. An SDR-Based Real-Time Testbed for GNSS Anti-Jamming Algorithms Accelerated by GPU. *Sensors*. 2016. Vol. 16(3). P. 356. DOI: 10.3390/s16030356
5. Mosavi M.R., et al. A fast anti-jamming system based on wavelet packet transform for GPS receivers. *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21. P. 415–426. DOI: 10.1007/s10291-016-0535-z
6. Radoš K, Brkić M, Begušić D. Recent Advances on Jamming and Spoofing Detection in GNSS. *Sensors*. 2024; 24(13):4210. DOI: 10.3390/s24134210
7. Spaskyi, Y., Bondarenko V., Bondarenko N. UAV control and navigation system. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. 353(3.2). C. 181–185. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-353-25 [in Ukrainian]
8. T. Moore, “Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third edition”, *The Aeronautical Journal*, vol. 123, no. 1266, pp. 1323–1323, 2019. DOI: 10.1017/aer.2019.98
9. Borio D., Dovis F., Kuusniemi H., Lo Presti L. Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. *Proceedings of the IEEE*. 2016. Vol. 104, No. 6. P. 1233–1245. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2543266.
10. Rozenbeek D. J. Evaluation of Drone Neutralization Methods Using Radio Jamming and Spoofing Techniques. – Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering and Computer Science, 2020. – 84 c. – (Second Cycle, 30 Credits). URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1460807/FULLTEXT01.pdf>
11. Novitskyi P., Stepanyak M. Methods of creating directional electromagnetic interference for selective influence on GPS/GLONASS: A Review. 2024. 86(2), 105-112 DOI: 10.23939/istcm2025.02.105.
12. Novitskyi P., Stepanyak M. The latest technologies for creating electromagnetic interference to counteract flying objects. *Computer Technologies of Printing*. 2024. 1(51), 121-133. DOI: 10.32403/2411-9210-2024-1-51-121-133 [in Ukrainian].

Pavlo Novitskyi, Mykhailo Stepanyak, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Lviv Polytechnic National University. Lviv, Ukraine

Computer Modeling and Parametric Analysis of GNSS Receiver Jamming Resilience for Aerial Vehicles

The article addresses the problem of developing mathematical models and software for computer simulation of electromagnetic interference effects on navigation subsystems of cyber-physical systems, specifically unmanned aerial vehicles that rely heavily on signals from global navigation satellite systems for positioning and navigation, which creates a critical vulnerability to intentional electromagnetic interference. Existing engineering models often fail to account for modern anti-jamming techniques and do not consider the uncertainty of real-world parameters. This creates a need for computational models capable of stochastic analysis and confidence interval estimation.

The proposed approach is based on modeling radio channel energy parameters using the Friis equation extended with a generalized anti-jamming factor that characterizes digital signal processing algorithm efficiency. To account for parameter uncertainty, the Monte Carlo method with ten thousand simulations has been implemented in Python programming language. The simulation generates random parameter variations following lognormal distribution and computes suppression range values. Complete source code is provided, enabling full reproducibility of results. Model sensitivity analysis using tornado diagrams identifies the most critical parameters.

Verification was conducted through comparison with experimental data from published literature. For the Spanghero experiment with one watt jammer, the model predicts 2.1 kilometers against experimental 1.5 to 3 kilometers. For the Rozenbeek data with anti-jamming factor of ten, the model yields 7 kilometers compared to experimental 5 to 10 kilometers. Relative error does not exceed thirty percent. Results demonstrate that increasing the anti-jamming factor from unity to one thousand reduces suppression range from 22.34 to 0.71 kilometers. The practical value lies in applicability for designing protection algorithms for cyber-physical navigation systems.

digital signal processing, adaptive filtering algorithm, anti-jamming factor, aerial object, electromagnetic interference, electronic warfare, controlled reception pattern antenna

Одержано (Received) 29.12.2025

Прорецензовано (Reviewed) 19.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 27.01.2026

С. Р. Соловей, О. В. Барабанов, доц., канд. фіз.-мат. наук

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

e-mail: serhii.solovei@knu.ua, alex1464b@gmail.com

Експериментальна оцінка послідовностей попередньої обробки електроенцефалографічних сигналів для малоканальних інтерфейсів мозок— комп'ютер реального часу

У роботі досліджено послідовності попередньої обробки електроенцефалографічних сигналів для неінвазивних малоканальних інтерфейсів мозок—комп'ютер реального часу. Проаналізовано вплив видалення DC-складової, режекторної та смугової фільтрації на спектральні характеристики ЕЕГ-сигналу. Сформовано та кількісно обґрунтовано узагальнені послідовності обробки, придатні для проміжної валідації якості сигналу та забезпечення балансу між якістю обробки й обчислювальними обмеженнями.

комп'ютерна система, електроенцефалографічна обробка сигналів, алгоритми обробки даних, цифрова фільтрація, контроль якості сигналу, інтерфейс людина-машина

Постановка проблеми. ВСІ на основі електроенцефалографії є найбільш поширеним неінвазивним підходом до керування технічними системами завдяки безпеці та доступності. Водночас ЕЕГ-сигнали мають низьку амплітуду, нестаціонарний характер і високу чутливість до перешкод, що ускладнює їх аналіз, особливо в недорогих ВСІ-системах, під якими розуміють неінвазивні інтерфейси мозок-комп'ютер, що базуються на доступних за вартістю ЕЕГ-пристроях з обмеженою кількістю каналів та використовують відкриті програмні засоби для реєстрації й обробки сигналів.

У таких системах попередня обробка ЕЕГ є критичним етапом, від якого залежить коректне виділення інформативних ознак і відтворюваність результатів. Невдалий вибір методів або параметрів обробки може призводити до спотворення корисних ритмів і завищення показників точності, що зумовлює необхідність обґрунтованого підходу до попередньої обробки ЕЕГ у недорогих ВСІ-системах.

Аналіз останніх джерел та публікацій. Аналіз сучасних публікацій показує, що інтерфейси мозок-комп'ютер на основі ЕЕГ є найбільш поширеним неінвазивним підходом завдяки безпеці, доступності та можливості використання в портативних системах [1]. Водночас у літературі підкреслюється, що ЕЕГ-сигнали мають низьку амплітуду, нестаціонарний характер і високу чутливість до шумів та артефактів, що суттєво ускладнює їх аналіз, особливо в недорогих ВСІ-системах [2]. Значна кількість досліджень зосереджена на попередній обробці ЕЕГ як ключовому етапі підвищення якості сигналу, зокрема стабілізації базової лінії та пригніченні мережових наведень 50/60 Гц із застосуванням фільтрації та спектрального аналізу [3, 4]. Для зменшення міжсесійної варіабельності амплітуд застосовуються методи нормалізації, зокрема z-нормалізація, з обов'язковим запобіганням витоку інформації між навчальними та тестовими вибірками [3]. Контроль артефактів у недорогих ВСІ зазвичай базується на простих порогових і статистичних критеріях, тоді як застосування ІСА обмежене через зниження ефективності за малої кількості каналів [3, 5, 6].

Українські дослідження також підкреслюють визначальну роль попередньої обробки ЕЕГ у забезпеченні стабільності розпізнавання моторних команд. У роботі [7] вона розглядається як необхідна умова ефективного застосування методів машинного навчання, тоді як у [8] показано критичний вплив вибору типу та параметрів фільтрації на збереження інформативних компонент сигналу, що є релевантним для недорогих ВСІ з обчислювальними обмеженнями. Загалом у літературі наголошується на необхідності адаптації методів попередньої обробки до умов запису та забезпечення їх відтворюваності, що визначає актуальність пошуку оптимальних стратегій для ВСІ низької вартості.

Постановка мети (завдання). Метою роботи є обґрунтування та експериментальна перевірка ефективних послідовностей попередньої обробки електроенцефалографічних сигналів у недорогих неінвазивних інтерфейсах мозок-комп'ютер, придатних для використання в умовах обмеженої кількості каналів і вимог реального часу.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі задачі: визначено вплив базових етапів попередньої обробки ЕЕГ у недорогих ВСІ-системах; виявлено обмеження методів референсування та контролю артефактів у малоканалних конфігураціях; сформовано та обґрунтовано узагальнені послідовності обробки для режимів реального часу та офлайн-аналізу; оцінено вплив етапів обробки на ключові метрики сигналу; визначено практичні рекомендації щодо вибору методів попередньої обробки для забезпечення відтворюваності результатів.

Виклад основного матеріалу. Зареєстрований ЕЕГ-сигнал містить постійну складову та повільні дрейфи базової лінії, зумовлені поляризацією електродів і нестабільністю контакту, які не несуть корисної інформації для більшості ВСІ-задач. Тому їх усувають шляхом віднімання середнього значення або високочастотної фільтрації з частотою зрізу 0,5–1 Гц. Недорогі ВСІ-системи також чутливі до мережевих наведень на частоті 50/60 Гц, для пригнічення яких застосовують режекторні фільтри з підбіраною добротністю, що забезпечує зменшення завад без істотного спотворення корисних спектральних компонентів; при цьому рекомендується аналіз спектра до і після фільтрації та документування параметрів обробки.

Для моторних ВСІ-парадигм ключовими є сенсомоторні ритми в діапазоні 8-30 Гц, які виділяють за допомогою смугової фільтрації [9]. Ефективність цього підходу визначається параметрами фільтра, зокрема фазовими характеристиками: фільтри з нульовою фазою прийнятні для офлайн-аналізу, тоді як у системах реального часу застосовуються каузальні фільтри з урахуванням затримки.

Оскільки ЕЕГ вимірюється відносно референсу, вибір схеми референсування суттєво впливає на сигнал. Усереднений референс (Common Average Reference, CAR) широко застосовується, проте в малоканалних системах його ефективність залежить від конфігурації електродів і може призводити до підсилення артефактів [10], що зумовлює необхідність контролю якості каналів.

Для зменшення міжсесійної варіабельності в недорогих ВСІ використовують нормалізацію, зокрема z-нормалізацію в межах сесії або епохи, яка підвищує стабільність ознак за умови обчислення параметрів лише на навчальних даних [11, 12].

Методи попередньої обробки доцільно оцінювати за критеріями надійності, відтворюваності та придатності до роботи в реальному часі. На практиці важливо розрізнати режим офлайн-аналізу та режим потокової обробки, забезпечуючи узгодженість параметрів між ними для коректного перенесення моделей.

На основі наведеного аналізу для малоканалних неінвазивних ВСІ систем сформовано узагальнені послідовності попередньої обробки, адаптовані до різних

режимів використання: для роботи в реальному часі (видалення DC-складової, режекторна фільтрація 50 Гц, цільова смугова фільтрація, переприв'язка та нормалізація); для офлайн-аналізу й навчання моделей (видалення DC або дрейфу, контроль каналів, режекторна та смугова фільтрація, відбракування епох і нормалізація); для виявлення артефактів (видалення DC, смугова фільтрація, ICA або автоматизовані критерії, нормалізація).

Незалежно від вибору послідовності, необхідно документувати тип і порядок фільтрів, частоти зрізу, частоту дискретизації, фазовий режим (каузальний або нульової фази) та критерії контролю артефактів. Для недорогих ВСІ доцільно доповнювати опис наочними спектральними графіками до і після обробки, що дозволяє перевірити ефективність пригнічення 50 Гц і збереження релевантних частот.

Контроль артефактів у 8-канальних системах зазвичай базується на простих і відтворюваних критеріях: амплітудних порогах, порогах на швидкість зміни сигналу та показниках дисперсії або енергії у вікнах. Застосування ICA або автоматизованих методів доцільне переважно в офлайн-аналізі; при цьому важливо оцінювати частку відкинутих даних і можливий систематичний перекид, пов'язаний із класами рухів.

Для демонстрації ефектів попередньої обробки використано 8-канальний ЕЕГ-запис тривалістю близько 24,3 с із частотою дискретизації 250 Гц. Через варіабельність масштабів сигналів у недорогих системах аналіз проводився у відносних одиницях після видалення DC-складової як базового кроку стабілізації.

Спектральний аналіз показує, що застосування вузькосмугового режекторного фільтра 50 Гц ($Q = 30$) суттєво зменшує енергію мережевої складової без помітного впливу на інші частоти (рис. 1).



Рисунок 1 – Приклад пригнічення мережевої складової режекторним фільтром

Джерело: розроблено автором

На рисунку 2 наведено спектр до і після смугової фільтрації 8–30 Гц (фільтр Баттерворта, порядок 6). Після обробки спостерігається пригнічення компонентів поза цільовою смугою, що може підвищувати стійкість ознак, якщо модель або статистичний аналіз орієнтовані саме на ці частоти. Водночас якщо корисна інформація частково міститься поза обраною смугою, надмірно жорстка фільтрація може знижувати інформативність сигналу, тому її параметри мають бути обґрунтовані та перевірені експериментально.

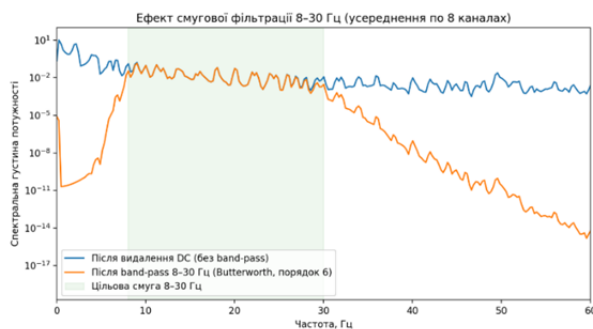


Рисунок 2 – Ефект смугової фільтрації на смузі 8–30 Гц

Джерело: розроблено автором

У часовій області фільтрація проявляється як згладжування сигналу та пригнічення вузькосмугових наведень (Рисунок 3). В офлайн-аналізі можливе використання фільтрів із нульовою фазою, що не вносять фазових зсувів. Натомість у реальному часі застосовуються каузальні фільтри, які неминуче створюють групову затримку, що слід враховувати при оцінці загальної латентності системи.

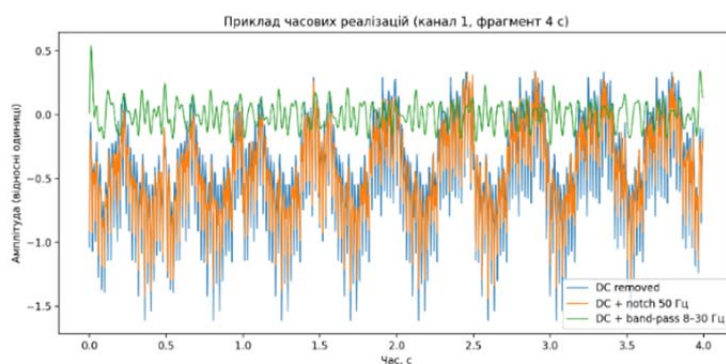


Рисунок 3 – Приклад впливу режекторної та смугової фільтрації у часовій області

Джерело: розроблено автором

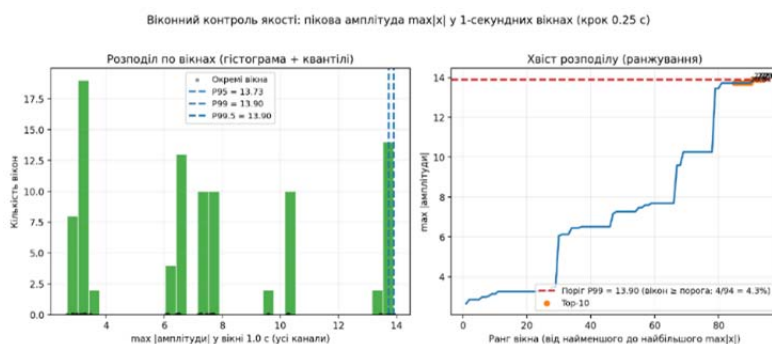


Рисунок 4 – Віконний контроль якості

Джерело: розроблено автором

Через обмеження обчислювальних ресурсів і кількості каналів у недорогих ВСІ практичним є використання простих, інтерпретованих критеріїв якості сигналу. У цій роботі контроль артефактів ілюструється віконною метрикою: для кожного 1-секундного вікна з перекриттям обчислюється максимальна абсолютна амплітуда по всіх каналах (Рисунок 4). Аналіз розподілу пікових амплітуд дозволяє використовувати квантілі (P95, P99, P99.5) як відтворювані пороги для виявлення проблемних інтервалів.

У наведеному прикладі поріг P99 охоплює близько 4,3% вікон, що свідчить про наявність артефактів без домінування їх у записі.

Щоб кількісно оцінити внесок окремих кроків обрано такі метрики: інтегральну потужність у діапазоні 49-51 Гц, загальну потужність у смузі 1-60 Гц, їхнє відношення (індикатор частки вкладу мережевого шуму), потужність у смузі 8-30 Гц, а також середньоквадратичне відхилення амплітуди (Root Mean Square, RMS).

Результати (Таблиця 1) узгоджуються з очікуванням: режекторний фільтр зменшує частку 50 Гц компоненти, тоді як смугова фільтрація концентрує енергію в цільовій смузі 8-30 Гц.

Таблиця 1 – Результати кількісної оцінки внесків окремих етапів обробки

	Потужність 49-51 Гц	Потужність 1-60 Гц	Частка 49-51 Гц	Потужність 8-30 Гц	RMS амплітуди
DC	0.018	4.732	0.004	0.468	4.579
DC та режекторний фільтр	0.001	4.709	0.00025	0.468	4.576
DC та смуговий фільтр	6.205 e-11	0.44	1.409 e-10	0.429	0.618
DC зі смуговим та режекторним фільтрами	4.649e-12	0.439	1.057e-11	0.429	0.618

Джерело: розроблено автором.

Кількісний аналіз підтверджує, що застосовані кроки попередньої обробки діють відповідно до їх функціонального призначення і не вносять неочікуваних спотворень у структуру ЕЕГ-сигналу. Базовий варіант із видаленням DC-складової характеризується присутністю мережевої домішки. Це підтверджує, що просте усунення зсуву не є достатнім для стабілізації спектральної структури сигналу в недорогих BCI-системах.

Додавання режекторного фільтра призводить до різкого зменшення потужності 49-51 Гц (приблизно на порядок) і відповідного падіння нормалізованої частки мережевого шуму до $\sim 0,00025$, при цьому загальна потужність у смузі 1-60 Гц і RMS-амплітуда змінюються мінімально. Це підтверджує адресний характер режекторної фільтрації та її придатність для сценаріїв реального часу.

Застосування смугової фільтрації 8-30 Гц призводить до майже повного усунення енергії на 50 Гц та істотного зменшення потужності 1-60 Гц (до $\approx 0,44$) і RMS-амплітуди (до $\approx 0,62$). Така зміна відображає фокусування сигналу на сенсомоторному діапазоні. Потужність у смузі 8-30 Гц при цьому зберігається на рівні ($\approx 0,43$ - $0,47$), що свідчить про відсутність грубих втрат цільової активності.

Комбінація фільтрів не демонструє додаткових кількісних переваг порівняно зі смуговим фільтром, що очікувано, оскільки 50 Гц уже лежить поза пропускнуою смугою. Загалом результати Таблиці 1 підтверджують коректність обраних кроків попередньої обробки як «проміжної» перевірки якості сигналу та створюють надійне підґрунтя для подальшої оцінки впливу цих варіантів на метрики класифікації в задачах BCI.

Висновки. У роботі обґрунтовано підходи до попередньої обробки електроенцефалографічних сигналів у малоканалних неінвазивних інтерфейсах мозок-комп'ютер. Встановлено, що видалення лише DC-складової не забезпечує стабілізації спектральної структури ЕЕГ через наявність мережевих наведень. Показано ефективність режекторної та смугової фільтрації для зменшення впливу мережевих

завад і концентрації енергії в сенсомоторному діапазоні без істотного спотворення сигналу. Сформовано та експериментально обґрунтовано відтворювані послідовності попередньої обробки для режимів реального часу та офлайн-аналізу, придатні для малоканалних ВСІ низької вартості.

Наукова новизна роботи полягає в кількісно підтвердженому обґрунтуванні практичних послідовностей попередньої обробки ЕЕГ для недорогих малоканалних ВСІ-систем як проміжного етапу валідації сигналу перед задачами класифікації. Отримані результати мають практичну цінність для розробки та валідації недорогих ВСІ-систем, оскільки дозволяють оцінювати якість сигналу та коректність попередньої обробки ще до етапу навчання моделей класифікації.

Список літератури

1. Caiado F., Ukolov A. The history, current state and future possibilities of the non-invasive brain computer interfaces. *Medicine in Novel Technology and Devices*. 2025. Vol. 25. P. 100353. DOI: 10.1016/j.medntd.2025.100353.
2. Nonstationary nature of the brain activity as revealed by EEG/MEG: Methodological, practical and conceptual challenges / A. Y. Kaplan et al. *Signal Processing*. 2005. Vol. 85, no. 11. P. 2190–2212. DOI: 10.1016/j.sigpro.2005.07.010.
3. Linear Modeling of Neurophysiological Responses to Speech and Other Continuous Stimuli: Methodological Considerations for Applied Research / M. J. Crosse et al. *Frontiers in Neuroscience*. 2021. Vol. 15. DOI: 10.3389/fnins.2021.705621.
4. Venkatachalam K. L., Herbrandson J. E., Asirvatham S. J. Signals and Signal Processing for the Electrophysiologist. *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*. 2011. Vol. 4, no. 6. P. 965–973. DOI: 10.1161/circep.111.964304.
5. Rejer I., Cieszyński Ł. Independent component analysis for a low-channel SSVEP-BCI. *Pattern Analysis and Applications*. 2018. Vol. 22, no. 1. P. 47–62. DOI: 10.1007/s10044-018-0758-4.
6. Rejer I., Górski P. MAICA: an ICA-based method for source separation in a low-channel EEG recording. *Journal of Neural Engineering*. 2019. Vol. 16, no. 5. P. 056025. DOI: 10.1088/1741-2552/ab36db.
7. Comparison of the accuracy of machine learning algorithms for brain-computer interaction based on high-performance computing technologies / V. Stefanyshyn et al. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2024. Vol. 115, no. 3. P. 82–90. DOI: 10.33108/visnyk_tntu2024.03.082
8. Матвеева Н., Іваниця Д. Попередня обробка та аналіз ЕКГ сигналів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Т. 355, № 4. С. 388–394. DOI: [10.31891/2307-5732-2025-355-55](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-55)
9. Mdluli B., Khumalo P., Maswanganyi R. C. Signal Preprocessing, Decomposition and Feature Extraction Methods in EEG-Based BCIs. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 22. P. 12075. DOI: 10.3390/app152212075.
10. Orekhova E. V., Wallin B. G., Hedström A. Modification of the Average Reference Montage. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 2002. Vol. 19, no. 3. P. 209–218. DOI: 10.1097/00004691-200206000-00004.
11. Aydın S., Melek M., Gökrem L. Intersession Robust Hybrid Brain–Computer Interface: Safe and User-Friendly Approach with LED Activation Mechanism. *Micromachines*. 2025. Vol. 16, no. 11. P. 1264. DOI: 10.3390/mi16111264.
12. A Review on Signal Processing Approaches to Reduce Calibration Time in EEG-Based Brain–Computer Interface / X. Huang et al. *Frontiers in Neuroscience*. 2021. Vol. 15. DOI: 10.3389/fnins.2021.733546.

References

1. Caiado, F., & Ukolov, A. (2025). The history, current state and future possibilities of the non-invasive brain computer interfaces. *Medicine in Novel Technology and Devices*, 25, 100353. <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2025.100353>
2. Kaplan, A. Y., Fingelkurts, A. A., Fingelkurts, A. A., Borisov, S. V., & Darkhovsky, B. S. (2005). Nonstationary nature of the brain activity as revealed by EEG/MEG: Methodological, practical and conceptual challenges. *Signal Processing*, 85(11), 2190–2212. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.07.010>
3. Crosse, M. J., Zuk, N. J., Di Liberto, G. M., Nidiffer, A. R., Molholm, S., & Lalor, E. C. (2021). Linear modeling of neurophysiological responses to speech and other continuous stimuli: Methodological considerations for applied research. *Frontiers in Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.705621>

4. Venkatachalam, K. L., Herbrandson, J. E., & Asirvatham, S. J. (2011). Signals and signal processing for the electrophysiologist. *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*, 4(6), 965–973. <https://doi.org/10.1161/circep.111.964304>
5. Rejer, I., & Cieszyński, Ł. (2018). Independent component analysis for a low-channel SSVEP-BCI. *Pattern Analysis and Applications*, 22(1), 47–62. <https://doi.org/10.1007/s10044-018-0758-4>
6. Rejer, I., & Górski, P. (2019). MAICA: An ICA-based method for source separation in a low-channel EEG recording. *Journal of Neural Engineering*, 16(5), 056025. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab36db>
7. Mdluli, B., Khumalo, P., & Maswanganyi, R. C. (2025). Signal preprocessing, decomposition and feature extraction methods in EEG-based BCIs. *Applied Sciences*, 15(22), 12075. <https://doi.org/10.3390/app152212075>
8. Matvieieva, N., & Ivanytsia, D. (2025). Poperednia obrobka ta analiz EKH syhnaliv. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 355(4), 388–394 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-55>
9. Stefanyshyn, V., Stefanyshyn, I., Pastukh, O., & Kulikov, S. (2024). Comparison of the accuracy of machine learning algorithms for brain-computer interaction based on high-performance computing technologies. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 115(3), 82–90. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.03.082
10. Orekhova, E. V., Wallin, B. G., & Hedström, A. (2002). Modification of the average reference montage. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 19(3), 209–218. <https://doi.org/10.1097/00004691-200206000-00004>
11. Aydın, S., Melek, M., & Gökrem, L. (2025). Intersession robust hybrid brain-computer interface: Safe and user-friendly approach with LED activation mechanism. *Micromachines*, 16(11), 1264. <https://doi.org/10.3390/mi16111264>
12. Huang, X., Xu, Y., Hua, J., Yi, W., Yin, H., Hu, R., & Wang, S. (2021). A review on signal processing approaches to reduce calibration time in EEG-based brain-computer interface. *Frontiers in Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.733546>

Serhii Solovey, Oleksandr Barabanov, Assoc. Prof., PhD (Phys. & Math.)

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Experimental Evaluation of EEG Preprocessing Pipelines for Low-Channel Real-Time Brain-Computer Interfaces

The purpose of this study is to substantiate and experimentally evaluate effective EEG signal preprocessing strategies for low-cost non-invasive brain-computer interfaces intended for real-time operation. Such systems are characterized by a limited number of channels, restricted computational resources, and high sensitivity to noise and artifacts, which makes the choice of preprocessing methods critical for signal quality and result reproducibility. The work aims to identify practically applicable preprocessing sequences that ensure a balance between noise suppression, preservation of informative components, and computational efficiency under real-time constraints.

The study is based on an experimental analysis of an 8-channel EEG recording acquired at a sampling rate of 250 Hz. The influence of key preprocessing stages, including DC component removal, notch filtering at 50 Hz, band-pass filtering in the 8–30 Hz range, re-referencing, normalization, and artifact control, is systematically investigated. Both time-domain and frequency-domain analyses are employed to assess the effects of individual processing steps. Quantitative metrics such as spectral power in selected frequency bands, normalized contribution of power-line interference, and root mean square amplitude are used to evaluate signal quality. Several generalized preprocessing pipelines are formulated for real-time operation, offline analysis, and artifact detection, with attention to phase characteristics, processing latency, and reproducibility.

The results demonstrate that appropriate combinations of DC removal and notch filtering effectively suppress power-line interference without distorting relevant EEG rhythms, while band-pass filtering concentrates signal energy within the sensorimotor frequency range. The proposed preprocessing sequences provide a transparent and reproducible intermediate validation stage prior to classification tasks in low-cost BCI systems. The findings confirm the suitability of simple, interpretable preprocessing methods for real-time applications and form a practical basis for further evaluation of their impact on motor imagery classification performance.

computer system, EEG signal processing, data processing algorithms, digital filtering, signal quality control, human-machine interface (HMI)

Одержано (Received) 19.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 27.01.2026

УДК 621.979

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).97-107](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).97-107)**С. Г. Карнаух**, доц., д-р техн. наук*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна**e-mail: karnaukh.sergii@gmail.com*

Аналіз комбінованого застосування клиношарнірного і кривошипно-кругового механізмів

Встановлено, що комбіноване застосування клиношарнірного та кривошипно-кругового механізмів дозволяє принципово змінити характер навантаження пресової системи впродовж робочого циклу. Отримані кінематичні залежності свідчать про можливість зменшення пікових швидкостей і прискорень у завершальній фазі робочого ходу, що безпосередньо впливає на зниження динамічних навантажень. Доведено, що формування складного плоского руху інструмента сприяє концентрації деформації в зоні різання та зменшенню енергосилових параметрів процесу. Результати аналізу підтверджують доцільність застосування компактних виконавчих механізмів у пресовому обладнанні для розділення прокату.

клиношарнірний механізм, кривошипно-круговий механізм, розділення прокату, жорсткість преса, динамічні навантаження

Постановка проблеми. Процеси розділення прокату є завершальними операціями металургійного та металообробного виробництва і суттєво впливають на енергоефективність, точність геометричних параметрів та якість виробів. Найбільш поширеними засобами реалізації безвідходних процесів розділення прокату на мірні заготовки є механічні преси, ножиці та холодноломи [1].

Особливістю зазначених процесів є те, що в момент повного розділення заготовки відбувається різке зменшення опору деформуванню, що супроводжується миттєвим вивільненням накопиченої пружної енергії технологічної системи «прес – інструмент – заготовка». Це явище відоме як «енергія розвантаження» або «ефект відскоку» пресового устаткування. Воно супроводжується динамічним розвантаженням ковальсько-пресової машини, ударними навантаженнями, коливальними процесами та підвищенням зношування елементів обладнання. Викликає ударні хвилі в гідравлічних системах та пружні коливання в механічних станинах, руйнування фундаменту [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень з цього питання показує, що роботи ведуться по трьом основним напрямкам: механіка руйнування; вирішення проблеми розвантаження преса при розділенні як пасивними методами (фундамент, демпфери), так і активним керуванням приводом; підвищення жорсткості преса [3-5].

Основна увага приділяється механіці розділення металів [3]. Зокрема, у роботах, присвячених високошвидкісній точній відрізці зсувом, показано, що характер руйнування визначається адіабатичною локалізацією пластичної деформації [4], рівнем напружено-деформованого стану та швидкістю деформації матеріалу [5, 6]. А залежність між напруженням і деформацією набуває вираженого нелінійного

характеру. В роботі [6] показано, що за високих швидкостей деформації утворення зсувних смуг призводить до різкого зниження несучої здатності матеріалу та переходу до крихкого або квазікрихкого руйнування. Саме цей момент часто збігається з різким падінням сил опору розділенню та вивільненням пружної енергії системи. Це підтверджує, що процеси розділення прокату в пресових системах доцільно розглядати як статико-динамічні, в яких накопичення енергії відбувається поступово, а її вивільнення – імпульсно. Встановлено, що концентрація деформацій у зоні різання сприяє зниженню силових параметрів процесу та енерговитрат, однак при цьому зростає роль динамічних ефектів у завершальній фазі розділення [5].

У роботах [6 – 8], присвячених безвідходному розділенню прокату, процес розділення розглядається з позицій енергосилової взаємодії між заготовкою та елементами пресового обладнання. Так в роботі [7] розглядається динаміка кривошипно-повзунного механізму в умовах високої швидкості та великих навантажень для пресових систем. Показано, що максимальні динамічні навантаження на вузли преса виникають не при досягненні максимального зусилля різання, а в момент завершення розділення та подальшого розвантаження системи, що підтверджує актуальність детального дослідження цього етапу.

Використання розумних магнітореологічних демпферів для поглинання енергії, яка вивільняється при розриві металу демпферів на пресах є частковим вирішенням проблеми розділювальних операцій [9].

У роботі [7] пропонується вирішення проблеми ударних навантажень, коливальних процесів при розділенні не пасивними методами (фундамент, демпфери), а активним керуванням приводом. Це демонструє перехід від традиційних кривошипних пресів до сервоприводних систем, які дозволяють програмно гасити шкідливі коливання. Запропоновано оптимізовану криву руху повзуна сервопреса з уповільненням безпосередньо перед контактом з металом і швидке повернення [8].

Аналіз кінематики та динаміки преса із комбінованим кривошипно-повзунним приводом із сервоприводом, наведений у роботі [10]. Розроблено модель керування рухом натискної плити у пресах для розділення прокату.

Автори робіт [6, 7] пропонують рішення для підвищення стійкості інструменту з використанням методів злиття даних та згорткових нейронних мереж, сигналів акустичної емісії при розвантаженні пресу. Замість простого підрахунку ударів, використовується аналіз сигналів у реальному часі. Це вирішує проблему раптових відмов преса та браку продукції.

Більш перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є підвищення жорсткості пресів. Результати дослідження [11] важливі для розуміння впливу конструкції приводу на жорсткість пресової системи, фазу контакту та динамічні характеристики. Показано, що вибір конструкції ланок впливає на довжину технологічного контакту та динамічну поведінку. Пропоновані механізми можуть забезпечити покращену статику та скорочення небажаних коливань, що прямо резонує із підвищенням жорсткості пресів.

В роботі [12] досліджено спосіб зменшення кінетичної потужності в механізмі кривошипного преса шляхом зміни профілю руху повзуна. Це має непрямий вплив на динамічну жорсткість та стабільність преса у робочих режимах. Ідея зміни фаз прискорення/уповільнення повзуна може сприяти зменшенню вібрацій та динамічних навантажень у пресах. Це опосередковано впливає на жорсткість системи та дозволяє підвищити стабільність роботи при високих технологічних навантаженнях.

Дослідження [13] присвячене оптимізації топології конструкції рами пресової машини для підвищення її жорсткості та зниження деформацій під дією ударних

навантажень. Метод топологічної оптимізації дозволив зменшити максимальні переміщення вузлів конструкції більше ніж на 31%, що значно підвищує динамічну жорсткість преса в робочому циклі.

В роботі [14] розроблено механізм з перемінною жорсткістю, який забезпечує плавне налаштування жорсткості за рахунок спеціальної конструкції із змінним пружинним елементом і механізмом «кривошип – повзун». Показано, як можна реалізувати регульовану жорсткість у компактному приводі із високою швидкістю модуляції, що є важливим для підвищення контролю над динамікою. Такий тип механізмів може бути адаптований для пресових приводів, покращуючи їхню статику та адаптивність під навантаженням.

Для підвищення жорсткості преса перспективним напрямком є застосування компактних виконавчих механізмів, у тому числі, клиношарнірного і кривошипно-кругового механізмів [15]. У статті [16] пропонується новий підхід до розмірного синтезу чотириланкових механізмів. Такий підхід дозволяє отримувати геометричні параметри механізму для заданих точок точності руху без чисельних дефектів та недійсних рішень. У роботі [17] автори класифікують можливі форми контакту між повзуном та напрямною та виводять математичну модель контактної жорсткості, що впливає на точність руху механізму при швидкісному приводі.

У роботах [18] запропонована конструкція клиношарнірного механізму з увігнутим клином, у якого графік зміни сили на повзуні максимально наближений до типового графіку розділення. При цьому застосування даного механізму дозволяє суттєво підвищити жорсткість пресу за рахунок зменшення висоти його складових деталей.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що на сьогодні достатньо глибоко досліджені питання пластичної деформації та руйнування металів у процесах розділення, вплив швидкості деформації на механізм руйнування, запропоновані як пасивні (фундамент, демпфери), так і активні методи керування приводом. Водночас недостатньо вивченими залишаються закономірності миттєвого вивільнення енергії розвантаження преса, його вплив на динаміку технологічної системи та навантаження елементів обладнання, особливо при застосуванні компактних виконавчих механізмів.

Перспективним напрямком розвитку обладнання для розділення сортового і трубного прокату є спільне використання клиношарнірного механізму з увігнутим клином і компактних виконавчих механізмів.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження обладнання із спільним застосуванням клиношарнірного механізму з увігнутим клином разом з компактным кривошипно-круговим виконавчим механізмом.

Спільне застосування клиношарнірного механізму з увігнутим клином разом з компактними кривошипно-круговим механізмом дозволяє забезпечити складний плоский рух інструмента, що забезпечує зменшення енергосилових параметрів розділення і потрібну геометричну точність отриманих заготовок. При цьому застосування клиношарнірного механізму з увігнутим клином забезпечує високу жорсткість обладнання і зменшення ефекту розвантаження пресу в момент зняття технологічного навантаження.

Виклад основного матеріалу. Принципова (рис. 1, а) та структурна (рис. 1, б, в) схеми кривошипно-кругового механізму з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином представлені на рис. 1. Запропонована конструкція установки (див. рис. 1, а) складається із клина 1 з радіусом увігнутої поверхні R , шарніра 2, повзуна 3, шатуна 4 довжиною l і кривошипа 5 радіусом r . Аналізуючи кривошипно-круговий механізм з клиношарнірним приводом, можна дійти висновку, що характер

руху його ланок аналогічний характеру руху ланок важільного механізму, що представляє собою комбінацію двохповзунного й кривошипно-шатунного механізмів, а, отже, структурні схеми цих механізмів ідентичні (див. рис. 1, б, в).

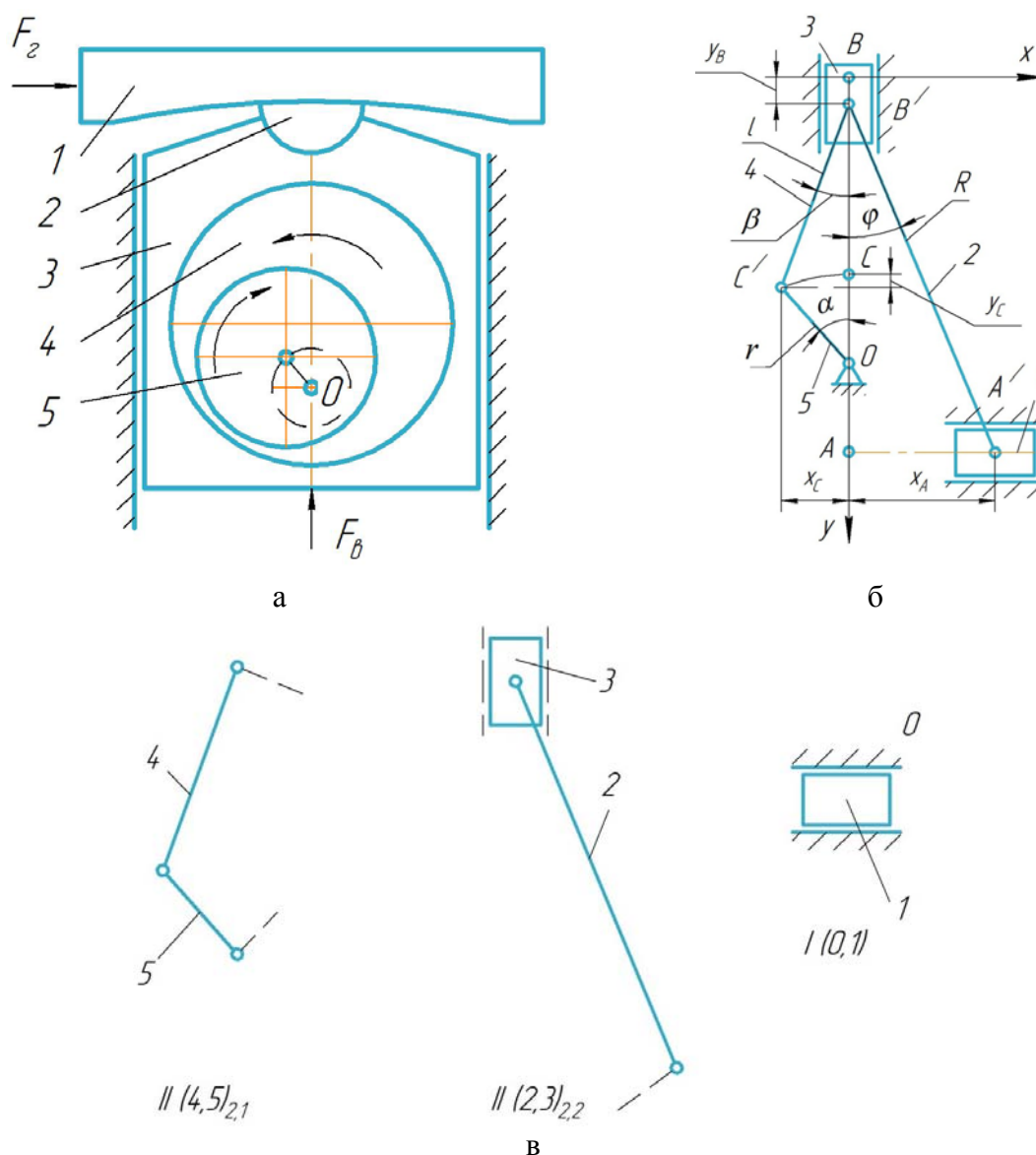


Рисунок 1 – Структурний аналіз кривошипно-кругового механізму з приводом від клиношарнірного механізму з увігнутим клином

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи кривошипно-круговий механізм з клиношарнірним приводом, можна дійти висновку, що характер руху його ланок аналогічний характеру руху ланок важільного механізму, що представляє собою комбінацію двохповзунного й кривошипно-шатунного механізмів, а, отже, структурні схеми цих механізмів ідентичні (див. рис. 1, б, в).

Кривошипно-круговий механізм з клиношарнірним приводом включає п'ять рухомих ланок і сім кінематичних пар п'ятого класу (п'ять обертальних і дві поступальні).

Оскільки механізм плоский, то його рухомість визначається за формулою Чебишева:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 - 0 = 1, \quad (1)$$

де n – число рухомих ланок механізму; p_5 – число кінематичних пар 5 класу; p_4 – число кінематичних пар 4 класу.

Отже, для одержання визначеності руху всіх ланок механізму необхідно задати один незалежний рух вхідній ланці (клину 1). Розчленуємо механізм на первинний механізм і структурні групи Ассура (див. рис. 1, в). Формула його будови має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II(2,3)_{2,2} \rightarrow II(4,5)_{2,1}$. Таким чином, запропонований механізм – механізм II класу.

Визначимо основні співвідношення між геометричними параметрами кривошипно-кругового механізму з клиношарнірним приводом. Для цього розглянемо механізм у довільному положенні (див. рис. 1, б). Початок координат помістимо у вихідне положення точки B (коли точки A , B і C розташовані на одній вертикалі). Нехай клин 1 переміститься на величину ходу x_A . При цьому ланка AB відхиляється від вертикалі на кут φ , який являє собою змінний кут шарніра 2, а повзун 3, а, отже, і точка B переміщується на відстань y_B :

$$y_B = R - R \cdot \cos\varphi = R \cdot (1 - \cos\varphi) \quad (2)$$

або

$$y_B = R - \sqrt{R^2 - x_A^2} \quad (3)$$

Залежність між ходом клина x_A й кутом φ має вигляд:

$$\varphi = \arcsin(x_A/R). \quad (4)$$

При переміщенні повзуна 3 на відстань y_B , шатун 4 відхиляється від осі повзуна на кут β , а кривошип 5 повертається на кут α . При цьому вертикальна складова переміщення точки C (кінця кривошипа):

$$y_C = l \cdot \cos\beta + y_B - l = y_B - l \cdot (1 - \cos\beta) \quad (5)$$

або через кут повороту кривошипа:

$$y_C = \sqrt{l^2 - (r \cdot \sin\alpha)^2} + y_B - l. \quad (6)$$

Тоді горизонтальна складова переміщення точки C визначиться, як

$$x_C = r \cdot \sin\alpha = l \cdot \sin\beta = \sqrt{r^2 - (r - y_C)^2} = \sqrt{2 \cdot r \cdot y_C - y_C^2}. \quad (7)$$

Звідси можна одержати залежності між кутами повороту кривошипа 5 і шатуну 4:

$$\sin\beta = r \cdot \sin\alpha/l; \cos\beta = \sqrt{1 - \sin^2\beta} = \sqrt{1 - (r \cdot \sin\alpha/l)^2}.$$

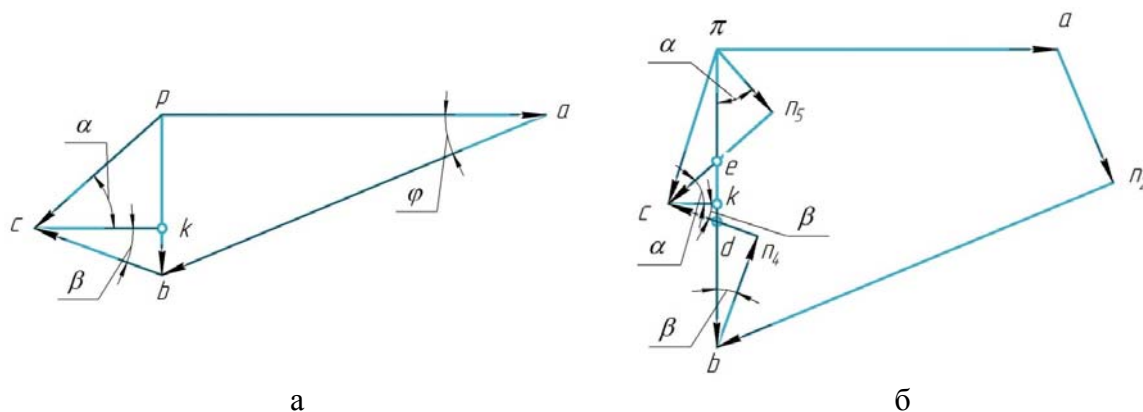
Для визначення залежності між кутом повороту кривошипа α і переміщенням повзуна 3 можна скористатися відомою формулою для кривошипно-повзунного механізму преса:

$$y_B = r \cdot [(1 - \cos\alpha) + r \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha))/4 \cdot l]. \quad (8)$$

Проведемо кінематичне дослідження клиношарнірного механізму графоаналітичним методом. Для цього побудуємо план швидкостей механізму в розглянутому положенні (рис. 2, а).

Швидкість клина, а отже, і точки A , спрямована горизонтально й визначається застосуванням приводом клина. Для визначення швидкості точки B , а, отже, і швидкості повзуна, розв'яжемо графічно векторне рівняння:

$$\frac{\vec{V}_B}{//Y} = \frac{\vec{V}_A}{//X} + \frac{\vec{V}_{BA}}{\perp BA} \quad (9)$$



а – план швидкостей; б – план прискорень

Рисунок 2 – Кінематичний аналіз механізму графоаналітичним методом

Джерело: розроблено автором

З побудованого плану швидкостей знаходимо, що

$$\begin{aligned} V_{BA} &= V_A / \cos \varphi, \\ V_B &= V_A \cdot \tan \varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

Швидкість точки C визначиться з векторного рівняння:

$$\frac{\vec{V}_C}{\perp OC} = \frac{\vec{V}_B}{//Y} + \frac{\vec{V}_{CB}}{\perp BC} \quad (11)$$

Розв'язавши графічно це векторне рівняння й провівши через отриману точку c допоміжну горизонталь ck , одержимо:

$$V_B = pb = pk + kb = pc \cdot \sin \alpha + cb \cdot \sin \beta, \quad (12)$$

де $ck = pc \cdot \cos \alpha = cb \cdot \cos \beta$;

$$cb = pc \cdot \cos \alpha / \cos \beta$$

Отже:

$$V_B = pb = pc \cdot \sin \alpha + pc \cdot \cos \alpha \cdot \tan \beta. \quad (5.13)$$

Тоді швидкість кінця кривошипа (точки C):

$$V_C = pc = V_B / (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \beta) = V_B \cdot \tan \varphi / (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \beta), \quad (14)$$

а відносна швидкість

$$\begin{aligned} V_{CB} &= bc = V_B \cdot \cos \alpha / (\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta) = \\ &= V_B \cdot \cos \alpha / V_A \cdot \tan \varphi \cdot \cos \alpha / \sin(\alpha + \beta). \end{aligned} \quad (15)$$

Кутова швидкість шарніра 2:

$$\omega_2 = V_{BA} / R = V_A / (R \cdot \cos \varphi). \quad (16)$$

Кутова швидкість кривошипа 5:

$$\omega_5 = V_C/r = V_A \cdot \operatorname{tg} \varphi / (r \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta)). \quad (17)$$

Кутова швидкість шатуна 4:

$$\omega_4 = V_{CB}/l = V_A \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \alpha / (l \cdot \sin(\alpha + \beta)). \quad (18)$$

Побудуємо план прискорень клиношарнірного механізму (рис. 2, б), з урахуванням того, що прискорення клина, а отже й точки A , відомо і за величиною, і за напрямком. Запишемо й розв'яжемо графічно векторне рівняння для визначення прискорення точки B , тобто повзуна 3:

$$\frac{\bar{a}_B}{\parallel Y} = \frac{\bar{a}_A}{\parallel X} + \frac{\bar{a}_{BA}^n}{\parallel AB} + \frac{\bar{a}_{BA}^\tau}{\perp AB}, \quad (19)$$

$$\text{де } a_{BA}^n = a n_2 = \omega_2^2 \cdot R = V_A^2 / (R \cdot \cos^2 \varphi).$$

Провівши деякі додаткові побудови, можна одержати прискорення точки B :

$$a_B = \pi b = V_A^2 / (R \cdot \cos^3 \varphi) + a_A \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (20)$$

Прискорення точки C визначиться із системи векторних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{a}_C}{\parallel Y} &= \frac{\bar{a}_B}{\parallel Y} + \frac{\bar{a}_{CB}^n}{\parallel CB} + \frac{\bar{a}_{CB}^\tau}{\perp CB}, \\ \frac{\bar{a}_C}{\parallel CO} &= \frac{\bar{a}_C^n}{\parallel CO} + \frac{\bar{a}_C^\tau}{\perp CO}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{де } a_{CB}^n &= b n_4 = \omega_4^2 \cdot l = V_A^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot \cos^2 \alpha / (l \cdot \sin^2(\alpha + \beta)), \\ a_C^n &= \pi n_5 = \omega_5^2 \cdot r = V_A^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi / (r \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta)^2). \end{aligned}$$

Вирішив графічну систему векторних рівнянь і побудував точку c на плані прискорень, визначимо шукане прискорення точки C , як:

$$a_C = \sqrt{(a_C^n)^2 + (a_C^\tau)^2}, \quad (22)$$

де недостатнє значення дотичного прискорення точки C дорівнює:

$$a_C^\tau = n_5 c = n_5 e + e c = \pi n_5 \cdot \operatorname{tg} \alpha + e c = a_C^n \cdot \operatorname{tg} \alpha + e c. \quad (23)$$

Для визначення довжини відрізка ec , проведемо через побудовану точку c допоміжну горизонталь ck і тоді:

$$a_B = \pi b = \pi e + bd + ek + kd = a_C^n / \cos \alpha + a_{CB}^n / \cos \beta + ck(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta). \quad (24)$$

Звідки:

$$\begin{aligned} ck &= (a_B \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta - a_C^n \cdot \cos \beta - a_{CB}^n \cdot \cos \alpha) / (\cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)) = \\ &= (a_B \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta - a_C^n \cdot \cos \beta - a_{CB}^n \cdot \cos \alpha) / \sin(\alpha + \beta). \end{aligned} \quad (25)$$

Тоді:

$$ec = ck / \cos \alpha = (a_B \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta - a_C^n \cdot \cos \beta - a_{CB}^n \cdot \cos \alpha) / (\cos \alpha \cdot \sin(\alpha + \beta)) =$$

$$= (a_B \cdot \cos \beta - a_C^n \cdot \cos \beta / \cos \alpha - a_{CB}^n) / \sin(\alpha + \beta), \quad (26)$$

$$e_c = \frac{ck}{\cos \alpha} = \frac{a_B \cos \alpha \cos \beta - a_C^n \cos \beta - a_{CB}^n \cos \alpha}{\cos \alpha \sin(\alpha + \beta)} = \frac{a_B \cos \beta - a_C^n \cos \beta / \cos \alpha - a_{CB}^n}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (27)$$

звідки

$$a_C^r = a_C^n \cdot \operatorname{tg} \alpha + (a_B \cdot \cos \beta - a_C^n \cdot \cos \beta / \cos \alpha) / \sin(\alpha + \beta). \quad (28)$$

На підставі виконаних досліджень розроблено і запатентовано конструкцію пристрою для відрізки сортового і трубного прокату «ексцентричним закручуванням» (рис. 3), у якій в якості виконавчого механізму використано кривошипно-круговий механізм у поєднанні з клиношарнірним механізмом.

Під дією сили приводу клин 1 своєю увігнутою поверхнею взаємодіє з шарніром 2, який, повертаючись навколо своєї осі, здійснює зворотно-поступальне переміщення повзуна 3. При цьому кругова шайба 4 обертається навколо своєї осі і видавлює рухомий втулковий ніж 5, який обертається у протилежну сторону на кут, достатній для відрізки заготовки «ексцентричним закручуванням». У конструкції передбачена можливість зміни кута нахилу увігнутого клина 1 клиношарнірного механізму, внаслідок чого можна підбирати раціональну траєкторію руху ексцентричних втулкових ножів. Це дозволить забезпечити високу геометричну точність заготовок, які розділяються при мінімальній енергоємності процесу. Для цього між увігнутим клином 1 і станиною 6, які з'єднані між собою за допомогою шарніра 7, установлений клин 8 з постійним кутом нахилу з можливістю зворотно-поступального руху [19].

Компактні виконавчі механізми мають розвинені контактні поверхні, що знижує питомі сили в опорах й сприяє гасінню коливань. Це у комбінації з малою деформаційною зоною приводить до високої динамічної стійкості. Клиншарнірні механізми також мають великі опорні поверхні деталей, невелику висоту ланок в напрямку дії робочої сили, можливість винесення найбільш піддатливих деталей і вузлів преса із зони дії максимальної сили. Застосування клиношарнірного механізму підвищує енергосилові показники обладнання, надійність його роботи та геометричну точність відрізаних заготовок. Розширюються технологічні можливості обладнання.

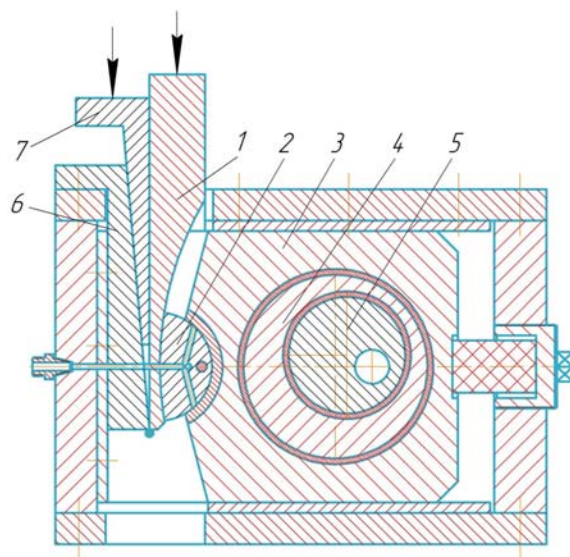


Рисунок 3 – Пристрій для відрізки сортового і трубного прокату «ексцентричним закручуванням»

Джерело: розроблено автором [19]

Висновки:

1. Виконано структурний та кінематичний аналіз кривошипно-кругового механізму з клиношарнірним приводом з увігнутим клином, встановлено його клас та отримано аналітичні залежності для визначення переміщень, швидкостей і прискорень характерних точок і ланок механізму. З використанням графоаналітичних методів теорії механізмів і машин досліджено кінематичні параметри запропонованої механічної системи, що дозволило оцінити її поведінку в робочому циклі процесу розділення прокату.

2. Встановлено, що спільне застосування клиношарнірного механізму з увігнутим клином і компактного кривошипно-кругового механізму забезпечує формування складного плоского руху інструмента, який сприяє зменшенню пікових зусиль розділення та енергоємності процесу. Встановлено, що використання клиношарнірного механізму з великою площею контактних поверхонь і малою висотою ланок у напрямку дії робочої сили підвищує жорсткість преса та зменшує шкідливі наслідки ефекту розвантаження в момент завершення відрізки.

3. На основі результатів досліджень розроблено та запатентовано конструкцію обладнання для безвідходного розділення сортового і трубного прокату методом ексцентричного закручування, яка забезпечує підвищення надійності роботи преса та геометричної точності заготовок. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації пресового обладнання для операцій розділення прокату з підвищеними вимогами до енергоефективності, динамічної стійкості та довговічності.

Список літератури

1. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Zubenko K. V. Development and research of the stamp for cutting of a rolled stock with a differentiated clamp. *FME Transactions*. 2022. 50 (4). 674–682. DOI: 10.5937/fme2204674K.
2. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliiev I. S., Stankov V. U. Cutting of rolled metal with a stress concentrator marked by the elastic deformation of the press. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. 136. 3791–3801. DOI: 10.1007/s00170-025-15043-7.
3. Kaczmarczyk J., Grajcar A. Numerical simulation and experimental investigation of cold-rolled steel cutting. *Materials*. 2018. 11. 1263. DOI: 10.3390/ma11071263.
4. Pursche F., & Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels. *Engineering Transactions*. 2014. 59(2). 67–84. DOI: 10.24423/engtrans.150.2011.
5. Dong Y., Ning J., Dong P., Ren Y., Zhao S. Investigation of fracture behavior and mechanism in high-speed precise shearing for metal bars with prefabricated fracture-start kerfs. *Materials*. 2020. 13. 4073. DOI: 10.3390/ma13184073.
6. Lim JH., Lee SW., Lee J. et al. Pure mechanical impact trimming for ultra high-strength steels: A strain rate-managed approach to enhance shear edge quality without thermal effects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2025. 12. 1763–1793. DOI: 10.1007/s40684-025-00720-5.
7. Liu Y., Shu Y., Hu W., Zhao X., & Xu Z. Active vibration control of a mechanical servo high-speed fine-blanking press. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2021. 67(9). 445–457. DOI: 10.5545/sv-jme.2020.6959.
8. Hofmann J., Veitenheimer C.-V., Fei C.; Chen, C. et al. Development of robust machine learning models for tool-wear monitoring in blanking processes under data scarcity. *Applied Sciences*. 2025. 15(19). 10323. DOI: 10.3390/app151910323.
9. Ghiotti A., Regazzo P., Bruschi S., Bariani P. F. Reduction of vibrations in blanking by MR dampers. *CIRP Annals*. 59. 1. 2010. 275–278, ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.111.
10. Кандяк Н., & Остафійчук Ю. Покращення кінематичних характеристик привода штанцювального преса із комбінованим кривошипно-повзунним механізмом. *Технічні науки та технології*. 2025. 3(41). С. 54–62. DOI: 10.25140/2411-5363-2025-3(41)-54-62.
11. Yu Chen, Yu Sun, Chong Chen. Dynamic analysis of a planar slider-crank mechanism with clearance for a high speed and heavy load press system. *Mechanism and Machine Theory*. 98. 2016. 81–100, ISSN 0094-114X. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.12.004.

12. Pasika V., Augousti A., Lanets O., and Parashchyn O. Reducing the kinetic power of the crank press machine. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2023. 9. 3. 21–30. DOI: 10.23939/ujmems2023.03.021.
13. Tong Z., Lin C.; Li F., Chen T. Application of hybrid cellular automata method for high-precision transient stiffness design of a press machine frame. *Processes*. 2025. 13. 3726. DOI: 10.3390/pr13113726.
14. Wonseok Shin, Jung Kim. Switchable compliant actuator with fast stiffness modulation and energy efficient power transmission. *Mechatronics*. 2023. 90. 102929, ISSN 0957-4158. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2022.102929.
15. Карнаух С. Г., Чоста Н.В. Розробка параметричного розмірного ряду клиношарнірних пресів з увігнутим клином для реалізації безвідходних способів розділення сортового прокату. *Обробка матеріалів тиском. Materials Working by Pressure*. Краматорськ : ДДМА. 2025. 1(54). С. 188-200. DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)188.
16. Kim W. R., Shim J. K. A data-driven approach to the dimensional synthesis of planar slider – crank function generators. *Applied Sciences*. 2025. 15. 12554. DOI: 10.3390/app152312554.
17. Yuan Wang, Liu Juan, Ning Fengping, Chai Chao, Zhang Lei and Li Hui. Dynamic analysis of crank slider mechanism considering 3D translational joint clearance based on variable contact area. *Mechanics & Industry*. 2025. 26. 5. DOI: 10.1051/meca/2025001.
18. Karnaukh S. G., Chosta N. V., Markov O. E., Kukhar V. V. Development and research of the press operating mechanism, made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. 116. 3305–3314. DOI: 10.1007/s00170-021-07718-8.
19. Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Пристрій для поділу сортового прокату на мірні заготовки способом ексцентричного закручування : пат. 51501 Україна, МПК B23D 31/00, B23D 23/00. № u200911584 ; заявл. 13.11.2009 ; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14.

References

1. Karnaukh S. G., Markov O. E., Shapoval A. A., Zubenko K. V. Development and research of the stamp for cutting of a rolled stock with a differentiated clamp. *FME Transactions*. 2022. 50 (4). 674–682. DOI: 10.5937/fme2204674K.
2. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliiev I. S., Stankov V. U. Cutting of rolled metal with a stress concentrator marked by the elastic deformation of the press. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. 136. 3791–3801. DOI: 10.1007/s00170-025-15043-7.
3. Kaczmarczyk J., Grajcar A. Numerical simulation and experimental investigation of cold-rolled steel cutting. *Materials*. 2018. 11. 1263. DOI: 10.3390/ma11071263.
4. Pursche F., & Meyer L. W. Correlation between dynamic material behavior and adiabatic shear phenomenon for quenched and tempered steels. *Engineering Transactions*. 2014. 59(2). 67–84. DOI: 10.24423/engtrans.150.2011.
5. Dong Y., Ning J., Dong P., Ren Y., Zhao S. Investigation of fracture behavior and mechanism in high-speed precise shearing for metal bars with prefabricated fracture-start kerfs. *Materials*. 2020. 13. 4073. DOI: 10.3390/ma13184073.
6. Lim JH., Lee SW., Lee J. et al. Pure mechanical impact trimming for ultra high-strength steels: A strain rate-managed approach to enhance shear edge quality without thermal effects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2025. 12. 1763–1793. DOI: 10.1007/s40684-025-00720-5.
7. Liu Y., Shu Y., Hu W., Zhao X., & Xu Z. Active vibration control of a mechanical servo high-speed fine-blanking press. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2021. 67(9). 445–457. DOI: 10.5545/sv-jme.2020.6959.
8. Hofmann J., Veitenheimer C.-V., Fei C.; Chen, C. et al. Development of robust machine learning models for tool-wear monitoring in blanking processes under data scarcity. *Applied Sciences*. 2025. 15(19). 10323. DOI: 10.3390/app151910323.
9. Ghiotti A., Regazzo P., Bruschi S., Bariani P. F. Reduction of vibrations in blanking by MR dampers. *CIRP Annals*. 59. 1. 2010. 275–278, ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.111.
10. Kandyak N., & Ostafiychuk Y. Improvement of the kinematic characteristics of the die press drive using a combined crank-hinged mechanism. *Technical sciences and technologies*. 2025. 3(41). 54–62. DOI: 10.25140/2411-5363-2025-3(41)-54-62 [in Ukrainian].
11. Yu Chen, Yu Sun, Chong Chen. Dynamic analysis of a planar slider-crank mechanism with clearance for a high speed and heavy load press system. *Mechanism and Machine Theory*. 98. 2016. 81–100, ISSN 0094-114X. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2015.12.004.
12. Pasika V., Augousti A., Lanets O., and Parashchyn O. Reducing the kinetic power of the crank press machine. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2023. 9. 3. 21–30. DOI:

- 10.23939/ujmms2023.03.021.
13. Tong Z., Lin C.; Li F., Chen T. Application of hybrid cellular automata method for high-precision transient stiffness design of a press machine frame. *Processes*. 2025. 13. 3726. DOI: 10.3390/pr13113726.
 14. Wonseok Shin, Jung Kim. Switchable compliant actuator with fast stiffness modulation and energy efficient power transmission. *Mechatronics*. 2023. 90. 102929. ISSN 0957-4158. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2022.102929.
 15. Karnaukh S. G., Chosta N. V. Development of a parametric sized series of wedge-shaped presses with a curved wedge for the implementation of waste-free methods for separating long rolled products. *Metal Forming by Pressure. Materials Working by Pressure. Kramatorsk: DDMA*. 2025. 1(54). 188-200. DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)188 [in Ukrainian].
 16. Kim W. R., Shim J. K. A data-driven approach to the dimensional synthesis of planar slider – crank function generators. *Applied Sciences*. 2025. 15. 12554. DOI: 10.3390/app152312554.
 17. Yuan Wang, Liu Juan, Ning Fengping, Chai Chao, Zhang Lei and Li Hui. Dynamic analysis of crank slider mechanism considering 3D translational joint clearance based on variable contact area. *Mechanics & Industry*. 2025. 26. 5. DOI: 10.1051/meca/2025001.
 18. Karnaukh S. G., Chosta N. V., Markov O. E., Kukhar V. V. Development and research of the press operating mechanism, made in the form of the wedge-joint mechanism with a curving wedge for separation operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. 116. 3305–3314. DOI: 10.1007/s00170-021-07718-8.
 19. Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. *Device for dividing rolled bars into measured blanks by the method of eccentric twisting* : Patent 51501, Ukraine, IPC B23D 31/00, B23D 23/00. Application u200911584; filed November 13, 2009; published July 26, 2010. Bulletin 14. [in Ukrainian].

Serhii Karnaukh, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

Analysis of the Combined Application of Wedge-Joint and Crank-Circular Mechanisms

The purpose of the article is to provide a scientific substantiation of the feasibility and effectiveness of the combined application of a wedge-joint mechanism with a concave wedge and a crank-circular mechanism in equipment for the separation of rolled bars and tubes. Particular attention is paid to the problem of instantaneous release of the accumulated elastic energy of the press system at the moment the separation process is completed. The obtained results are intended to serve as a basis for the development of energy-efficient, reliable, and high-precision press equipment of a new generation.

The paper presents a structural and kinematic analysis of a crank-circular mechanism driven by a wedge-joint mechanism with a concave wedge. The methodological framework of the study is based on analytical methods of the theory of mechanisms and machines, as well as grapho-analytical methods for investigating the velocities and accelerations of characteristic points and links of the mechanism. The class of the mechanism, its mobility, and its structural configuration are determined using Assur groups. Analytical relationships are obtained that link the geometric parameters of the mechanism with the displacements, velocities, and accelerations of the actuating links. The influence of the combined mechanisms on the formation of a complex planar trajectory of tool motion is investigated. Conditions for reducing peak forces and the energy intensity of the rolled product separation process are analyzed. The developed and patented equipment design ensures improved geometric accuracy of workpieces and enhanced operational reliability of the machine. The obtained scientific findings can be applied in the design, modernization, and optimization of presses for rolled product separation with increased requirements for energy efficiency, dynamic stability, and durability.

As a result of the study, it is established that the combined application of wedge-joint and crank-circular mechanisms makes it possible to fundamentally change the loading pattern of the press system throughout the working cycle. The obtained kinematic relationships indicate the possibility of reducing peak velocities and accelerations in the final phase of the working stroke, which directly contributes to a reduction in dynamic loads. It is proven that the formation of a complex planar motion of the tool promotes the concentration of deformation in the cutting zone and reduces the energy-force parameters of the process. The results of the analysis confirm the expediency of using compact actuating mechanisms in press equipment for rolled product separation.

wedge-joint mechanism, crank-circular mechanism, rolled product separation, press stiffness, dynamic loads

Одержано (Received) 09.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

Г. Б. Філімоніхін, проф., д-р техн. наук, **І. І. Філімоніхіна**, доц., канд. фіз.-матем. наук, **Л. С. Олійніченко**, доц., канд. техн. наук, **Ю. О. Сокальська**, **Ю. О. Остапчук**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: filimonikhin@ukr.net

Метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта

Теоретично обґрунтовується метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта. Лопатевим гвинтом може бути повітряний чи гребний гвинт з постійним кроком. Розробляється оптимальний метод, що потребує мінімальну кількість пусків лопатевого гвинта для визначення зазначених незрівноваженостей. Аерогідродинамічна незрівноваженість оцінюється масовим еквівалентом і визначається для робочого режиму роботи лопатевого гвинта. Розроблений метод застосовний на етапах виготовлення чи ремонту лопатевих гвинтів для балансування чи відбракування.

гвинт, балансування, літальний апарат, плавальний апарат, балансувальний пристрій, екранний ефект

Постановка проблеми. Основні методи визначення масової незрівноваженості роторів побудовані для лінійних роторних систем. Найменшу кількість пусків ротора для цього потребує метод коефіцієнтів впливу. Так, відповідно до методу, для визначення динамічної незрівноваженості (незрівноваженості у двох площинах корекції) жорсткого ротора достатньо провести три пробних пуска ротора, через що цей метод називають ще методом трьох пробних пусків.

Основним джерелом вібрацій в машинах з лопатевими гвинтами є масові і аерогідродинамічні незрівноваженості гвинтів. Масова складова майже не змінюється під час роботи гвинта, а аерогідродинамічна зазнає значних змін. Тому існує загальна проблема з виділення із динамічної незрівноваженості масової і аерогідродинамічної складових. У рамках загальної проблеми існує задача з визначення зазначених складових оптимальним способом, тобто мінімальною кількістю пробних пусків гвинта. Це потрібне для зменшення трудомісткості і вартості цього процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні етапи розвитку балансувальної техніки і відповідної теорії найбільш повно відображені в роботах [1-4]. При динамічному балансуванні жорстких роторів незрівноваженість мас ротора визначається у двох площинах корекції. Оптимальним з точки зору трудомісткості методом динамічного балансування жорстких роторів є метод трьох пробних пусків [5]. Цей метод найбільш точний для лінійних роторних систем, потребує найменшу кількість пусків ротора і ґрунтується на методі коефіцієнтів впливу [6]. Так, відповідно до методу, для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого ротора достатньо провести три пробних пуска. В [7] модернізований метод коефіцієнтів впливу для визначення динамічної незрівноваженості ротора. Модернізований метод використовує в розрахунках тільки інформацію про заміряні вібрації у двох площинах корекції. У

явному вигляді не розраховуються коефіцієнти впливу, не враховуються величини і місця розташування пробних мас. Це зменшує похибки обчислень. Також в обчисленнях використовується апарат комплексних чисел, що робить алгоритми розрахунків компактними.

Основним джерелом вібрацій в машинах з лопатевими гвинтами є масова і аерогідродинамічна незрівноваженість гвинтів. Тому існує загальна проблема з балансування лопатевих гвинтів [8, 9]. При одиничному чи дрібносерійному виготовленні лопатевих гвинтів аерогідродинамічне балансування забезпечується правкою геометричної форми гвинта. Незрівноваженість мас балансується на балансувальному верстаті чи з використанням балансувального приладу. В [10] встановлена аналогія між аеродинамічною і масовою незрівноваженостями повітряного гвинта. Доведена можливість балансування аеродинамічної незрівноваженості крильчатки осьового вентилятора корегуванням мас. Сама по собі аеродинамічна незрівноваженість характеризується неточністю форми лопатей крильчатки, насадженням її на вал з ексцентриситетом і перекосом. В [11] показано, що ці геометричні неточності мають масовий еквівалент.

З появою малих безпілотних і пілотованих апаратів виробництво лопатевих гвинтів стало масовим. В таких умовах традиційні методи балансування незастосовні, бо трудомісткі. При виготовленні чи ремонті гвинтів актуальною стає більш часткова проблема з виділення із динамічної незрівноваженості масової і аерогідродинамічної складових [12, 13]. В [13] показано, що для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженостей лопатевого гвинта достатньо визначити динамічну незрівноваженість гвинта балансувальним приладом два рази. Перший раз – при нормальних умовах роботи гвинта, а другий – при змінених, що змінюють за відомим законом аерогідродинамічну незрівноваженість і не змінюють незрівноваженість мас. При цьому визначається масовий еквівалент аерогідродинамічної незрівноваженості. Для зміни умов роботи повітряних гвинтів запропоновано використовувати зміну температури повітря чи газу [14], зміну тиску [15], заміну повітря чи газу на газ іншої щільності [16]. У випадку повітряних і гребних гвинтів запропоновано використовувати: реверсний режим обертання гвинта [17, 18]; екранний ефект [19].

Розроблені способи [13-19] потребують шість пробних пусків гвинта: три для визначення динамічної незрівноваженості гвинта при нормальних умовах роботи; три – при змінених умовах роботи гвинта. Але така кількість пусків гвинта може бути надмірною.

Постановка завдання. Мета роботи – розробити метод чотирьох пробних пусків повітряного (гребного) гвинта для окремого визначення його масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості.

Завдання досліджень. Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- 1) розробити оптимальний з точки зору кількості пусків лопатевого гвинта метод визначення його масової і аерогідродинамічної незрівноваженості;
- 2) розробити конструкцію універсального стенду для реалізації методу у випадку гребних і повітряних гвинтів.

Виклад основного матеріалу.

1. Метод чотирьох пробних пусків лопатевого гвинта для визначення його масової і аерогідродинамічної незрівноваженості.

1.1. Алгоритм розрахунку динамічної незрівноваженості гвинта.

Розмітка ротора, місця встановлення датчиків вібрацій, їх тип, датчик обертів, тип сигналів, що знімаються з датчиків тощо обговорені в роботі [7]. Сигнал з будь-якого датчика вібрацій обробляється балансувальним приладом. В результаті визначається характеристика вібрацій у вигляді комплексного числа

$$\mathbf{V} = A e^{i\varphi}, \quad (1)$$

де A – модуль; φ – фаза вібрацій у напрямку датчику вібрацій; i – уявна одиниця.

Гвинт встановлюють на вал балансувального верстату для динамічного балансування і три рази визначають амплітуди і фази коливань валу у площині першого і другого датчику вібрацій, рознесених по подовжній осі валу при обертанні гвинта з однією і тією ж сталою кутовою швидкістю.

Перший раз гвинт обертають без додавання пробних мас і визначають $A0_1, \varphi0_1, A0_2, \varphi0_2$. По цим амплітудам і фазам визначаються відповідні комплексні числа $V0_j = A0_j e^{i\varphi0_j}$, $j = 1, 2$, що характеризують вібрації. Відповідно до методу коефіцієнтів впливу вібрації датчиків, викликані невідомими незрівноваженими масами Q_1, Q_2 , записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$V0_j = a_{j1} Q_1 + a_{j2} Q_2, \quad j = 1, 2, \quad (2)$$

де $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – невідомі комплексні коефіцієнти впливу.

Другий раз до гвинта приєднують пробну масу P_1 у першій площині корекції і визначають $A1_1, \varphi1_1, A1_2, \varphi1_2$. По цим амплітудам і фазам визначаються відповідні комплексні числа $V1_j = A1_j e^{i\varphi1_j}$, $j = 1, 2$, що характеризують вібрації. Вібрації валу викликані незрівноваженими масами $Q_1 + P_1, Q_2$, записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$V1_j = a_{j1} (Q_1 + P_1) + a_{j2} Q_2, \quad j = 1, 2. \quad (3)$$

Третій раз до гвинта приєднують пробну масу P_2 у другій площині корекції і визначають $A2_1, \varphi2_1, A2_2, \varphi2_2$. По цим амплітудам і фазам визначаються відповідні комплексні числа $V2_j = A2_j e^{i\varphi2_j}$, $j = 1, 2$, що характеризують вібрації. Вібрації валу викликані невідомими незрівноваженими масами $Q_1, Q_2 + P_2$, записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$V2_j = a_{j1} Q_1 + a_{j2} (Q_2 + P_2), \quad j = 1, 2. \quad (4)$$

Невідомі незрівноважені маси Q_1, Q_2 пов'язані з пробними масами наступним чином

$$Q_j = P_j d_j, \quad j = 1, 2. \quad (5)$$

Комплексні числа d_1, d_2 , подані у експоненціальній формі

$$d_1 = d_1 e^{i\psi_1}, \quad d_2 = d_2 e^{i\psi_2}, \quad (6)$$

визначають, що модуль незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) більше відповідної пробної маси P_1 , (P_2) у d_1 (d_2) разів, а кут ψ_1 (ψ_2) задає у першій (другій) площині корекції положення незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) і відраховується у першій (другій) площині корекції від пробної маси P_1 (P_2) до незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) проти ходу стрілки годинника.

Отже, одержані 8 рівнянь з (2)-(5) для визначення 8 невідомих $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, Q_1, Q_2, d_1, d_2$.

З рівнянь (2)-(5) одержуються такі рівняння для визначення $\mathbf{d}_1$, $\mathbf{d}_2$.

$$\mathbf{d}_1 = (\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1) / \mathbf{D}, \quad \mathbf{d}_2 = -(\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1) / \mathbf{D}, \quad (7)$$

де

$$\mathbf{D} = \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1 - \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 + \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1 + \mathbf{V}1_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}1_2 \mathbf{V}2_1. \quad (8)$$

Отже, три пробних пуска гвинта при нормальних умовах роботи необхідні для визначення динамічної незрівноваженості гвинта при цих умовах.

1.2. Визначення окремих складових динамічної незрівноваженості.

Незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1$, $\mathbf{Q}_2$ мають складові $\mathbf{Q}_1^{(m)}$, $\mathbf{Q}_2^{(m)}$ від незрівноваженості мас і складові $\mathbf{Q}_1^{(a)}$, $\mathbf{Q}_2^{(a)}$ від аерогідродинамічної незрівноваженості:

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_1^{(m)} + \mathbf{Q}_1^{(a)}, \quad \mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_2^{(m)} + \mathbf{Q}_2^{(a)}, \quad (9)$$

де незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1$, $\mathbf{Q}_1^{(m)}$, $\mathbf{Q}_1^{(a)}$, $\mathbf{Q}_2$, $\mathbf{Q}_2^{(m)}$, $\mathbf{Q}_2^{(a)}$ подані у комплексному вигляді.

З метою окремого визначення як незрівноваженості мас, так і аерогідродинамічної незрівноваженості, пропонується визначати амплітуди і фази коливань $A3_1, \varphi3_1, A3_2, \varphi3_2$ гвинта у площинах двох датчиків вібрацій при змінених умовах роботи гвинта. У змінених умовах змінюється за відомим законом тільки аерогідродинамічна незрівноваженість гвинта (і не зазнають змін масова незрівноваженість, коефіцієнти впливу, модуль швидкості обертання гвинта):

$$\tilde{\mathbf{Q}}_j^{(a)} = k \mathbf{Q}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2/, \quad (10)$$

де k – коефіцієнт, який характеризує змінні умови роботи гвинта.

Відповідно до результатів роботи [13]

$$k = k_p k_e k_\omega, \quad (11)$$

причому: $k_p = \rho1 / \rho0$ – відношення питомої ваги $\rho1$ повітря, газу (рідини) при змінених умовах, до питомої ваги $\rho0$ при нормальних умовах роботи гвинта; $k_e = F1 / F0 > 1$ – відношення осьової аеродинамічної сили $F1$, заміряної при змінених умовах роботи до цієї сили $F0$, заміряної при нормальних умовах роботи гвинта, враховується тільки при встановленні екрану, інакше $k_e = 1$;

$$k_\omega = \begin{cases} 1 - \text{при прямому обертанні гвинта;} \\ -1 - \text{при реверсному обертанні гвинта.} \end{cases} \quad (12)$$

Зауважимо, що у випадку повітряного гвинта питому вагу повітря чи газу можна змінювати зміною температури, тиску повітря чи газу, або заміною повітря чи газу на інший газ з іншою питомою вагою [13].

По амплітудам і фазам $A3_1, \varphi3_1, A3_2, \varphi3_2$ визначаються відповідні комплексні числа $\mathbf{V}3_j = A3_j e^{i\varphi3_j}$, $/ j = 1, 2/$, що характеризують вібрації.

У змінених умовах роботи гвинта його незрівноважені маси зміняться таким чином:

$$\tilde{\mathbf{Q}}_j = \mathbf{Q}_j^{(m)} + k_p \mathbf{Q}_j^{(a)} = \mathbf{Q}_j^{(m)} + \mathbf{Q}_j^{(a)} + (k - 1) \mathbf{Q}_j^{(a)} = \mathbf{Q}_j + (k - 1) \mathbf{Q}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2/. \quad (13)$$

Тут враховано, що незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1^{(m)}$, $\mathbf{Q}_2^{(m)}$ при зміні умов роботи гвинта не зміняться.

Вібрації валу викликані невідомими незрівноваженими масами (13), записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$\mathbf{V}3_j = \mathbf{a}_{j1}\tilde{\mathbf{Q}}_1 + \mathbf{a}_{j2}\tilde{\mathbf{Q}}_2 = \mathbf{a}_{j1}[\mathbf{Q}_1 + (k-1)\mathbf{Q}_1^{(a)}] + \mathbf{a}_{j2}[\mathbf{Q}_2 + (k-1)\mathbf{Q}_2^{(a)}], \quad / j = 1, 2 /. \quad (14)$$

Подано (14) у вигляді

$$\mathbf{V}3_j = \mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1 + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2 + (k-1)(\mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1^{(a)} + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2^{(a)}), \quad / j = 1, 2 /. \quad (15)$$

З (15), з врахуванням (2), одержуємо

$$\mathbf{V}3_j = \mathbf{V}0_j + (k-1)(\mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1^{(a)} + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2^{(a)}), \quad / j = 1, 2 /. \quad (16)$$

Звідки знаходимо

$$\mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1^{(a)} + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2^{(a)} = \frac{\mathbf{V}3_j - \mathbf{V}0_j}{k-1}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (16)$$

Невідомі незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1^{(a)}, \mathbf{Q}_2^{(a)}$ пов'язані з пробними масами наступним чином

$$\mathbf{Q}_j^{(a)} = \mathbf{P}_j\mathbf{d}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / , \quad (17)$$

де комплексні коефіцієнти $\mathbf{d}_1^{(a)}, \mathbf{d}_2^{(a)}$ подібні до коефіцієнтів $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$, але визначають незрівноважені маси від аерогідродинамічної незрівноваженості гвинта при нормальних умовах роботи гвинта.

З рівнянь (2)-(5) і (16), (17) знаходимо такі рівняння для визначення двох мас від аерогідродинамічної незрівноваженості гвинта:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_1^{(a)} &= -\frac{\mathbf{V}0_1\mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2\mathbf{V}2_1 - \mathbf{V}0_1\mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2\mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}2_1\mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}2_2\mathbf{V}3_1}{(k_p - 1)\mathbf{D}}, \\ \mathbf{d}_2^{(a)} &= \frac{\mathbf{V}0_1\mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2\mathbf{V}1_1 - \mathbf{V}0_1\mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2\mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}1_1\mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}1_2\mathbf{V}3_1}{(k_p - 1)\mathbf{D}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Невідомі незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1^{(m)}, \mathbf{Q}_2^{(m)}$ пов'язані з пробними масами наступним чином

$$\mathbf{Q}_j^{(m)} = \mathbf{P}_j\mathbf{d}_j^{(m)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (19)$$

де комплексні коефіцієнти $\mathbf{d}_1^{(m)}, \mathbf{d}_2^{(m)}$ подібні до коефіцієнтів $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$, але визначають незрівноважені маси від масової незрівноваженості гвинта.

Оскільки при нормальних умовах роботи гвинта

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{d}_j^{(m)} + \mathbf{d}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (20)$$

то

$$\mathbf{d}_j^{(m)} = \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /. \quad (21)$$

Це коефіцієнти для визначення двох мас від масової незрівноваженості гвинта.

2. Універсальний стенд для визначення незрівноваженостей лопатевого гвинта.

На рис. 1 показана схема універсального стенду для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта – як гребного, так і повітряного.

Лопатевий гвинт 1 має дві площини корекції 2, 3, у яких визначаються незрівноваженості гвинта. Лопатевий гвинт встановлюється на стенд 4. Стенд має вал 5, на який насаджується гвинт. Вал обертається у прямому чи реверсному напрямку електродвигуном 6. Електродвигун підтримує пружна пластина 7, що може повертатися навколо шарніра 8. Двигун відносно шарніра зрівноважує протизвагу 9. Пружна пластина утримується у вертикальному положенні опорою 10, суміщеною з

динамометром. Для створення ефекту Землі використовується екран 11, який розміщується перед лопатевим гвинтом. На двигун встановлені два датчики вібрацій 12, 13. Початок нового оберту валу фіксує датчик обертів 14. Балансувальний прилад 15 приймає і обробляє сигнали з датчиків вібрацій і обертів, розраховує амплітуди і фази обертових складових вібрацій у двох поперечних площинах датчиків вібрацій. Осьова сила, створена гвинтом, вимірюється динамометром 10.

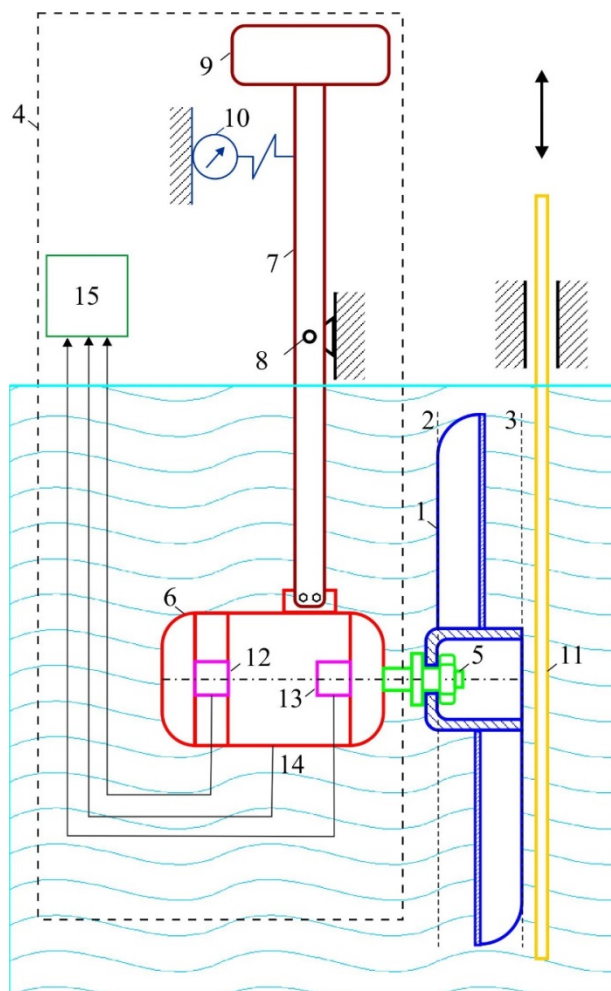


Рисунок – Універсальний стенд для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта

Джерело: розроблено авторами

Зауважимо, що датчиками вібрацій можуть бути акселерометри, датчики віброшвидкостей чи вібропереміщень [7]. Не принципово за яким алгоритмом обробляються сигнали з датчиків. Балансувальний прилад повинен після кожного пробного запуску визначати амплітуди і фази вібрацій у площинах двох датчиків вібрацій.

У випадку гребного гвинта він знаходиться у воді чи рідині. Змінені умови роботи гребного гвинта забезпечуються [13]: заміною води на рідину іншої питомої ваги; реверсним обертанням; встановленням екрану.

У випадку повітряного гвинта він знаходиться у повітрі. Змінені умови роботи повітряного гвинта забезпечуються [13]: заміною повітря на газ іншої питомої ваги;

змінюю температуру повітря; змінюю тиску; реверсним обертанням; встановленням екрану.

Висновки.

1. Аерогідродинамічну незрівноваженість лопатевого гвинта можна визначити по чотирьом пробним пускам, причому така кількість пусків є мінімальною. Перший раз гвинт обертають без додавання пробних мас. Другий раз до гвинта приєднують пробну масу у першій площині корекції. Третій раз до гвинта приєднують пробну масу у другий площині корекції. Четвертий раз гвинт обертають при змінених умовах роботи, при яких змінюється за заданим законом тільки аерогідродинамічна незрівноваженість, але при цьому істотно не змінюються коефіцієнти впливу.

Аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість оцінюється масовим еквівалентом і визначається для робочого режиму роботи гвинта.

2. Конструктивно можна реалізувати універсальний стенд для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта – як гребного, так і повітряного.

У випадку гребного гвинта він знаходиться у воді чи рідині. Змінені умови роботи гребного гвинта забезпечуються: заміною води на рідину іншої питомої ваги; реверсним обертанням; встановленням екрану.

У випадку повітряного гвинта він знаходиться у повітрі. Змінені умови роботи повітряного гвинта забезпечуються: заміною повітря на газ іншої питомої ваги; змінюю температуру повітря; змінюю тиску; реверсним обертанням; встановленням екрану.

Список літератури

1. Darlow, M.S. Review of Literature on Rotor Balancing. In: Balancing of High-Speed Machinery. Mechanical Engineering Series. Springer, New York, NY. 1989, pp. 39-52. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3656-6_3
2. Foiles, W.C., Allaire, P. E., Gunter, E. J., Review: Rotor Balancing. Shock and Vibration. 1998, Vol. 5. Issue 5-6, 648518, pp. 325-336. <https://doi.org/10.1155/1998/648518>
3. Ibraheem, A., Ghazaly, N., Abd el- Jaber, G. (2019). Review of Rotor Balancing Techniques. American Journal of Industrial Engineering, Vol. 6, Issue 1, pp. 19–25. URL: <https://www.sciepub.com/ajie/abstract/11311>
4. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. Machines, 2021. Vol. 9, Issue 5: 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
5. Everett L.J. (1997). Optimal Two-Plane Balance of Rigid Rotors. Journal of Sound and Vibration, 1997. Vol. 208, Issue 4, pp. 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
6. Xu, X. and Fan, P. Rigid Rotor Dynamic Balancing by Two-Plane Correction with the Influence Coefficient Method Applied Mechanics & Materials, 2013, Vols. 365-366, pp. 211-215 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.211>
7. Філімоніхін Г.Б., Сокальська Ю.О., Остапчук Ю.О. Модернізація методу коефіцієнтів впливу для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопального ротора. Центральнотехнічний науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 12(43), ч. I, С. 126-132. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.126-132](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.126-132)
8. Best, S. (1945). Propeller Balancing Problems. SAE Transactions, 53, 648–659. <http://www.jstor.org/stable/44467824>
9. Majumder, P., Maity, S. (2022). A critical review of different works on marine propellers over the last three decades. Ships and Offshore Structures, 18(3), 391–413. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2058767>
10. Філімоніхін, Г. Б., & Олійніченко, Л. С. (2015). Дослідження можливості зрівноваження аеродинамічного дисбалансу крильчатки осьового вентилятора корегуванням мас. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(7(77)), 30–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195>
11. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Bilyk, Y., Krivoblotsky, L., & Machok, Y. (2021). Theoretical study into the aerodynamic unbalance of a propeller blade and the correcting masses this balance it. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(112)), 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>

12. Bertelè, M., & Bottasso, CL (2022). Automatic detection and correction of aerodynamic and inertial rotor unbalances in wind turbine rotors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265. DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032100>
13. Filimonikhin G., Ostapchuk Y., Sokalska Y., Olijnichenko L., Pirogov V. Justification of Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalances of a Propeller. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. II. pp. 87-101. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.87-101](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.87-101)
14. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 161332 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500165 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 26.11.2025, Бюл. № 48/2025.
15. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159842 Україна : МПК G01M 1/12, G01M1/22 (2006.01). № u202500166 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025, Бюл. № 28/2025.
16. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159843 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500167 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025, Бюл. № 28/2025.
17. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159914 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500164 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29/2025.
18. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159841 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500163 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025, Бюл. № 28/2025.
19. Спосіб визначення незрівноваженостей гребного гвинта: патент на корисну модель 162030 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202503872; заявл. 11.08.2025 ; опубл. 04.02.2026, Бюл. № 5/2026.

References

1. Darlow, M.S. Review of Literature on Rotor Balancing. In: *Balancing of High-Speed Machinery*. Mechanical Engineering Series. Springer, New York, NY. 1989, pp. 39-52. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3656-6_3
2. Foiles, W.C., Allaire, P. E., Gunter, E. J., Review: Rotor Balancing. *Shock and Vibration*. 1998, Vol. 5. Issue 5-6, 648518, pp. 325-336. <https://doi.org/10.1155/1998/648518>
3. Ibraheem, A., Ghazaly, N., Abd el- Jaber, G. (2019). Review of Rotor Balancing Techniques. *American Journal of Industrial Engineering*, Vol. 6, Issue 1, pp. 19–25. URL: <https://www.sciepub.com/ajie/abstract/11311>
4. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*, 2021. Vol. 9, Issue 5: 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
5. Everett L.J. (1997). Optimal Two-Plane Balance of Rigid Rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 1997. Vol. 208, Issue 4, pp. 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
6. Xu, X. and Fan, P. Rigid Rotor Dynamic Balancing by Two-Plane Correction with the Influence Coefficient Method *Applied Mechanics & Materials*, 2013, Vols. 365-366, pp. 211-215 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.211>
7. Filimonikhin G., Ostapchuk Y., Sokalska Y. Modernization of the Influence Coefficient Method for Determining the Dynamic Unbalance of a Rigid Two-support Rotor. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 12(43), Part I, 126-132. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.126-132](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.126-132) [in Ukrainian].
8. Best, S. (1945). Propeller Balancing Problems. *SAE Transactions*, 53, 648–659. <http://www.jstor.org/stable/44467824>
9. Majumder, P., Maity, S. (2022). A critical review of different works on marine propellers over the last three decades. *Ships and Offshore Structures*, 18(3), 391–413. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2058767>
10. Filimonikhin, G., Olijnichenko, L. (2015). Investigation of the possibility of balancing aerodynamic unbalance of the impeller of the axial fan by correction of masses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7(77)), 30–35. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195> [in Ukrainian].
11. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Bilyk, Y., Krivoblotsky, L., & Machok, Y. (2021). Theoretical study into the aerodynamic unbalance of a propeller blade and the correcting masses this balance it. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(112)), 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>

12. Bertelè, M., & Bottasso, CL (2022). Automatic detection and correction of aerodynamic and inertial rotor unbalances in wind turbine rotors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265. DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032100>
13. Filimonikhin G., Ostapchuk Y., Sokalska Y., Olijnichenko L., Pirogov V. Justification of Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalances of a Propeller. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Issue 12(43), Part II, 87-101. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.87-101](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.87-101)
14. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 161332 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500165; appl. 14.01.2025; publ. 26.11.2025, Bull. No. 48/2025 [in Ukrainian].
15. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159842 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M1/22 (2006.01). No. u202500166; appl. 14.01.2025; publ. 09.07.2025, Bull. No. 28/2025 [in Ukrainian].
16. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159843 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500167; appl. 14.01.2025; publ. 09.07.2025, Bull. No. 28/2025 [in Ukrainian].
17. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159914 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500164; appl. 14.01.2025; publ. 16.07.2025, Bull. No. 29/2025 [in Ukrainian].
18. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159841 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500163; appl. 14.01.2025; publ. 09.07.2025, Bull. No. 28/2025 [in Ukrainian].
19. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 162030 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202503872; appl. 11.08.2025; publ. 04.02.2026, Bull. No. 5/2026 [in Ukrainian].

Gennady Filimonikhin, Prof., Dr. Tech. Sci., **Irina Filimonikhina**, Assoc. Prof., PhD phys. and math. sci.,
Lyubov Olijnichenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yulia Sokalska**, **Yulia Ostapchuk**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Four-run Test Methods for Determining the Mass and Aerohydrodynamic Imbalance of a Propeller

A new optimal method for separately determining the mass and aerohydrodynamic unbalance of a fixed-pitch propeller is theoretically substantiated. For this purpose, it is proposed to start the propeller four times: the first three times under normal propeller operating conditions, as in the three-trial run method; the fourth time - under changed conditions, under which only the aerohydrodynamic component of the propeller unbalance changes. A propeller can be an air or marine propeller. An air propeller has an aerodynamic component of unbalance, and a marine propeller has a hydrodynamic component.

The changed operating conditions of the propeller are provided by: changing the density of air, gas or liquid; using reverse rotation of the propeller; using the ground effect. In particular, the change in density is achieved by replacing the working medium with a medium with a different density or by changing its temperature or pressure.

The aerohydrodynamic unbalance of the propeller is estimated by the mass equivalent and is determined for the operating mode of the propeller.

The developed method is optimal because it requires a minimum number of propellers starts to determine the specified imbalances. The developed method is applicable at the stages of manufacturing or repairing bladed propellers for balancing or rejection.

propeller, balancing, aircraft, swimming apparatus, balancing device, ground effect

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 05.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

УДК 621.7.043

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).117-127](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).117-127)**Р. Г. Пузир**, проф., д-р техн. наук, **Р. Р. Козлов***Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна**e-mail: puzyruslan@gmail.com*

Огляд аналітичних методів аналізу напружено-деформованого стану заготовки під час роздавання трубних напівфабрикатів

Показано, що з метою точного опису процесу роздавання розглядаються рівняння рівноваги елементу заготовки у полярних координатах з окремим додаванням умов тертя, вигину на вільній поверхні та зміцнення матеріалу. Але питання визначення деформованого стану залишається відкритим. Більш точним моделюванням є визначення полів напружень та деформацій за теорією оболонок, але отримання замкнутого аналітичного рішення викликає математичні труднощі. Подальші дослідження будуть процесу будуть зосереджені на синергії обох методів теоретичного аналізу.

роздавання, циліндрична заготовка, рівняння рівноваги, зміцнення, товщина стінки

Постановка проблеми. Роздавання трубчастих заготовок, як процес листового штампування, використовується для збільшення діаметру кінців порожнистих циліндрів або їх середньої частини. Використовується в автомобільній та машинобудівній галузях для отримання патрубків, з'єднувальних елементів [1], як елемент технологічного процесу виготовлення, наприклад, ободів коліс [2], у нафто та газодобувній галузях для збільшення діаметру обсадних труб у свердловині [3], у аерокосмічній галузі у якості абсорберів кінетичної енергії під час посадки літальних апаратів [4] і т. д. Коло галузей застосування таких виробів не обмежується приведеними вище. Але, залишається відкритим питання точного теоретичного опису процесу з отриманням універсальних аналітичних рівнянь, прийнятних для інженерних розрахунків. Такі вирази необхідні для побудови технологічних процесів роздавання з прогнозуванням властивостей виробу на етапі проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичний аналіз процесу роздавання циліндричних порожнистих виробів базується на теорії процесів листового штампування [5, 6], деформаційної теорії пластичності [7, 8] та теорії пластичної течії [9]. Особливу увагу автори приділяють розробці алгоритму розрахунку напружень, які діють у стінках заготовки під час навантаження. Для досягнення більш точного рішення вводяться окремо додаткові складові, такі як коефіцієнт тертя між інструментом та заготовкою [5], додаткові напруження, які з'являються від згинального та розгинального моменту [6, 12], уточнюються навантаження, які призводять до втрати стійкості недеформованої частини [11], вводяться умови руйнування стінки у повздовжньому напрямку за рахунок локалізації деформацій [13]. Інші дослідники зосереджують увагу на визначенні деформованого стану шляхом введення умов зв'язку між приростом деформацій та головними напруженнями та підстановки їх в рівняння рівноваги для вісесиметричного напруженого стану [9, 10]. Такі рішення дають змогу оцінити розподіл деформацій у деформованій частині заготовки.

Постановка завдання. Таким чином, метою даного дослідження є огляд методів аналітичного моделювання процесу роздавання трубчатих циліндричних заготовок та формування стійких уявлень про основні фактори впливу на напружено-деформований стан стінок заготовки для створення математичної моделі несиметричного формозмінення виробів з розтрубом.

Виклад основного матеріалу. Так, класична теорія листового штампування розглядає поле напружень контактної конічної ділянки, використовуючи рівняння рівноваги при вісесиметричному деформуванні для плоского напруженого стану [5, 6]. Використовуються спрощені рівняння рівноваги для отримання простих виразів для відшукування величини напружень, які діють в осередку деформації. В полярних координатах вони мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} + 2\tau_{\rho\theta} + \rho \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} &= 0, \\ \rho \frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} r + (\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

де σ_{ρ} та σ_{θ} – нормальні напруження, які діють у меридіональному та тангенціальному напрямках; $\tau_{\rho\theta} = \tau_{\theta\rho}$ – дотичні напруження, які діють на площадках перпендикулярних до тангенціального та меридіонального напрямку; ρ – поточний радіус заготовки.

У випадку вісесиметричного деформування і плоского напруженого стану рівняння (1) замінюються одним виразом

$$\rho \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = 0. \quad (2)$$

Однак, прагнення авторів, наблизити математичні вирази до реального процесу деформування ускладнили це рівняння введенням коефіцієнту тертя μ та куту нахилу утворюючої пуансону α

$$\rho \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 0. \quad (3)$$

Інтегрування рівняння (3) спільно з умовою пластичності по гіпотезі максимальних дотичних напружень $\sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = \sigma_s$, де σ_s - межа пластичності металу заготовки, дозволило отримати наглядні і прості аналітичні вирази для визначення нормальних напружень, діючих в осередку деформації. Під час інтегрування використовували граничні умови $\sigma_{\rho} = 0$ при $\rho = R_u$

$$\sigma_{\rho} = -\sigma_s \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho}{R_u} \right)^{\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} \right]. \quad (4)$$

Розкладання степенної та логарифмічної функцій у ряд зі збереженням перших їх членів та заміна отриманих виразів у формулі (4), дало змогу спростити рівняння:

– для меридіональних напружень $\sigma_{\rho} = -\sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{R_u}{\rho} - 1 \right)$;

– для тангенціальних напружень $\sigma_\theta = -\sigma_s \left[1 - \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{R_u}{\rho} - 1 \right) \right]$.

Врахування згинального моменту, який виникає під час виходу конічної поверхні заготовки на циліндричну ділянку та під час початку роздавання та збільшує стискаючі меридіональні напруження, відбувається за рахунок множника $(3 - 2 \cos \alpha)$ і формула (4) приймає вигляд

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \left[\left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) + \sqrt{\frac{2s}{R_u}} \sin \alpha \right] (3 - 2 \cos \alpha), \quad (5)$$

де R_u – радіус напівфабрикату на циліндричній ділянці пуансону; r_3 – радіус заготовки.

Під час пластичної деформації відбувається зміцнення металу заготовки, що збільшує величину стискаючих меридіональних напружень. Врахування зміцнення відбувається заміною σ_s середнім для осередку деформації напруженням текучості. Це середнє значення σ_s визначають, як середнє арифметичне між максимальним та мінімальним значеннями напруження текучості в осередку деформації (при лінійній апроксимації кривої зміцнення) або, як значення напруження текучості під час деформації, яка дорівнює середній для осередку деформації ε_θ (при ступеневій апроксимації кривої зміцнення). Використовуючи ступеневу апроксимацію меридіональне напруження буде дорівнювати

$$\sigma_\rho = -\frac{\sigma_\varepsilon}{2(1-\psi_u)} \left[\frac{R_u - r_3}{\psi_u (R_u + r_3)} \right]^{1-\psi_u} \left[\left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \left(\frac{R_u}{r_3} - 1 \right) + \sqrt{\frac{2s}{R_u}} \sin \alpha \right] \times \\ \times \left(1 + \sqrt{\frac{r_3}{R_u}} \right) (3 - 2 \cos \alpha) \quad (6)$$

де ψ_u – відносне зменшення площі поперечного перетину до моменту початку утворення шийки; σ_ε – межа міцності металу заготовки.

Таким чином, теорія листового штампування приводить до визначення напруженого стану заготовки в осередку деформації та за її межами. За формулою (6) можливо визначити величину максимальних меридіональних напружень, які діють в недеформованих стінках циліндра та перейти к питанням втрати стійкості. Допущення, щодо осесиметричності навантаження та плоского напруженого стану, дали змогу авторам отримати залежності (5), (6), які містять основні технологічні та конструктивні фактори процесу роздавання, як то, радіус заготовки та отриманої деталі, кут нахилу утворюючої конусу пуансону, товщина заготовки, коефіцієнт тертя та значення механічних властивостей металу. Тобто, дослідник має у своєму арсеналі набір параметрів, за допомогою яких можливо регулювати напружений стан заготовки, змінюючи той чи інший чинник, або їх комбінацію та теоретично досліджувати процес. Такий підхід залишає відкритим питання щодо деформованого стану заготовки. Теоретично, перехід від напружень до деформацій відбувається за деформаційною теорією пластичності, але фінальні залежності для визначення деформацій значно ускладнюються і мають обмежене застосування у практичних розрахунках.

Для отримання рішень для напружено-деформованого стану ділянки заготовки під час роздавання Надаї А. [8] запропонував підхід, заснований на безмоментній теорії

оболонки обертання та деформаційній теорії пластичності. Вирішення цього завдання засновано на двох допущеннях Кірхгофа-Лява: 1) сукупність матеріальних частинок, які розташовані на нормалі до серединної поверхні оболонки до деформації, розташовані також на нормалі до її серединної поверхні і після деформації, і тому деформований стан оболонки визначається тільки деформованим станом її серединної поверхні; 2) усі компоненти напружень, які мають напрямки нормалі до серединної поверхні, вельми малі в порівнянні з іншими напруженнями. Ці два постулати означають, що кожен тонкий елементарний шар матеріалу, паралельний до серединної поверхні оболонки, знаходиться в умовах плоского напруженого стану. Інше допущення, прийняте автором, стосується нестисливості матеріалу заготовки, що значно спрощує рішення завдання.

Використовуються відомі рівняння рівноваги для посудин

$$\begin{aligned}\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} &= p, \\ 2\pi r T_1 \sin \theta &= P,\end{aligned}\quad (7)$$

де $T_1 = \sigma_1 h$ – меридіональне зусилля, що розтягує; $T_2 = \sigma_2 h$ – тангенціальне зусилля; h – товщина оболонки; p – розподілене навантаження (тиск); r – радіус оболонки; θ – кут нахилу нормалі до осі оболонки.

Напруження визначаються формулами

$$\left. \begin{aligned}\sigma_1 &= p \frac{r}{h} S_1, \sigma_2 = p \frac{r}{h} S_2, \\ S_1 &= \frac{PR_2}{2\pi r^3}, S_2 = \frac{R_2}{r} - \frac{R_2}{R_1} S_1\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

де R_1, R_2 – головні радіуси кривини серединної поверхні; $S_1 = T_1 - \frac{1}{2}T_2 = h \frac{\sigma_1}{e_1} \varepsilon_1$;

$S_2 = T_2 - \frac{1}{2}T_1 = h \frac{\sigma_2}{e_2} \varepsilon_2$; σ_i – інтенсивність напружень; e_i – інтенсивність деформацій;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – меридіональна та тангенціальна відносні деформації.

Для циліндричної заготовки вирази (8) спрощуються

$$\sigma_1 = \frac{PR_2}{2\pi r^2 h}, \sigma_2 = \frac{pR_2}{h} - \frac{R_2}{R_1} \sigma_1. \quad (9)$$

Сила P в любому перетині дорівнює

$$P = 2\pi r h_0 q + 2\pi \int_r^R p r dr, \quad (10)$$

де h_0 – початкова товщина заготовки; q – тиск на вільний кінець труби; p – поточний радіус заготовки.

Формули (9) та (10) наведені для визначення, в першу чергу, деформацій трубної заготовки. Для спрощення кінцевих рівнянь використовується умова пластичності Треска-Сен-Венана

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \sigma_s \delta, \quad (11)$$

де δ – коефіцієнт Лодє, який враховує дію нормального напруження у напрямку осі z ,
 $\frac{1}{\sqrt{3}} \geq \delta \geq 1$.

Використовуючи додаткові закони про нерозривність деформацій та незмінність об'єму під час пластичної деформації, отримані формули для знаходження розподілу напружень та деформацій для всього осередку деформації:

– відносне тангенціальне подовження $\varepsilon_2 = \frac{\rho - r}{r} = \bar{r} - 1$;

– відносне меридіональне подовження $\varepsilon_1 = (\bar{r} - 1) \frac{E_2 \bar{\sigma}_1 - E_1}{(3 - 2E_2) \bar{\sigma}_1 + 2E_1}$;

– відносне подовження елементу оболонки у напрямку її нормалі $\varepsilon_2 = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{1}{\chi} - 1$.

де $\bar{\sigma}_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_s \delta}$; $E_1 = 1$; $E_2 = 1$.

Закон розподілу напруження $\bar{\sigma}_1$ вздовж утворюючої циліндричної заготовки приймає вигляд

$$E_1 z = \frac{d}{d\bar{r}} \left(\frac{\bar{r} \bar{\sigma}_1}{\chi} \right) = \frac{(2 - E_2) \bar{\sigma}_1 + E_1}{\chi(\bar{r})}, \quad (12)$$

а закон зміни товщини стінки виглядає наступним чином

$$\chi = \bar{r} \frac{(3 - 3E_2 + \bar{r}E_2) \bar{\sigma}_1 + (3 - \bar{r})E_1}{(3 - 2E_2) \bar{\sigma}_1 + 2E_1}, \quad (13)$$

де $z = \frac{E_1}{\varphi} \frac{d}{d\bar{r}} \left(\frac{\bar{r} \varphi \bar{\sigma}_1}{\chi} \right)$; $\varphi = \frac{r}{R_2} = \sin \theta = \text{const} > 0$.

Подані рівняння інтегруються чисельно, тому що не завжди форму інструменту можливо представити у вигляді аналітичної залежності.

Таким чином, представлена математична модель процесу роздавання надає змогу визначити розподіл напружено-деформованого стану заготовки у кожній ділянці пластично деформованої частини, а також з'ясувати товщину та довжину готового виробу. Але, недоліком такого підходу, на наш погляд, є те, що не враховано зміцнення металу заготовки під час пластичної деформації та використання методів чисельного інтегрування отриманих рівнянь. Такий підхід інтегрування декілька зменшує інформативність кінцевих формул, не дає змогу дослідити вагу кожного параметра технологічного процесу щодо його регулювання. Однак, розвиток цифрових засобів розрахунку та комп'ютерних програм дозволяє створити на базі даних рівнянь потужний інструмент для аналізу процесів роздавання циліндричних напівфабрикатів.

Джонсон В. [9] у своїх працях розглядає роздавання трубчатої заготовки, як процес осесиметричної деформації та нехтує згинальними моментами, діючими в меридіональному напрямку. Тобто, так само використовує безмоментну теорію оболонок обертання. Матеріал заготовки – ідеальний жорстко-пластичний. Приймається, що напружений стан ділянки напівфабрикату плоский з меридіональними та тангенціальними головними напруженнями.

Кінцеве рівняння рівноваги з урахуванням поверхневого навантаження та тертя виглядає наступним чином

$$r \frac{d\sigma_m}{dr} + \frac{r}{h} \frac{dh}{dr} \sigma_m + \sigma_m - k\sigma_t = 0, \quad (14)$$

де $k = 1 + f \operatorname{ctg} \alpha$; r – поточний радіус заготовки; h – товщина заготовки; σ_m та σ_t – нормальні напруження, які діють у меридіональному та тангенціальному напрямках; f – коефіцієнт тертя; α – кут між дотичною до меридіану та віссю заготовки.

Для подальшого інтегрування рівняння рівноваги (14) використана теорія пластичної течії, де приріст деформацій в окружному напрямку $d\varepsilon_t$ та в напрямку нормалі до оболонки $d\varepsilon_v$ пов'язані з приростом радіуса та товщини відношеннями

$$d\varepsilon_t = \frac{dr}{r}; d\varepsilon_v = \frac{dh}{h}. \quad (15)$$

Тому рівняння рівноваги (14) може бути записано у наступній формі

$$r \frac{d\sigma_m}{dr} + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_t} \sigma_m + \sigma_m - k\sigma_t = 0. \quad (16)$$

Перехід від приростів деформацій до напружень відбувається за теорією пластичної течії

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_t} = -\frac{\sigma_m - \sigma_t}{2\sigma_t - \sigma_m}. \quad (17)$$

Тоді рівняння (16) приймає вигляд

$$r \frac{d\sigma_m}{dr} - \frac{\sigma_m - \sigma_t}{2\sigma_t - \sigma_m} \sigma_m + \sigma_m - k\sigma_t = 0. \quad (18)$$

Компоненти напружень повинні задовольняти умові пластичності Губера-Мізеса у формі

$$\sigma_m^2 + \sigma_m \sigma_t + \sigma_t^2 = \sigma_s^2. \quad (19)$$

Далі, для задоволення умовам пластичності та рівнянням рівноваги компоненти напружень представляються у формі

$$\sigma_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \cos \psi; \sigma_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \cos \left(\psi - \frac{\pi}{3} \right), \quad (20)$$

де ψ – кут виду напруженого стану, для даного випадку $\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{5}{6}\pi$.

Підставляючи рівняння (20) у (18) та інтегруючи, отримано рівняння для обчислення безрозмірного радіуса, який залежить від ψ

$$\frac{r}{r_1} = \exp \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{2 \operatorname{tg}^2 \psi d\psi}{-\sqrt{3} + (1-k) \operatorname{tg} \psi - \sqrt{3} k \operatorname{tg}^2 \psi}, \quad (21)$$

де r_1 – радіус заготовки; ψ – значення функції ψ при $r = r_1$.

Товщина стінки обраховується за наступною залежністю

$$\frac{h}{h_1} = \exp \left[- \int_{\psi_1}^{\psi} \frac{tg\psi (tg\psi + \sqrt{3}) d\psi}{-\sqrt{3} + (1-k)tg\psi - \sqrt{3}ktg^2\psi} \right]. \quad (22)$$

Подане рівняння (22) пов'язує товщину стінки з функцією ψ .

Автор пропонує обчислювати інтеграли (21) та (22) чисельно.

Таке рішення дає відповіді за запитання щодо розподілу напружень та деформацій під час пластичного формозмінення, але не дає змогу оцінити вплив технологічних параметрів процесу роздавання на величину кожної складової. Так, виходячи з формул (20), напруження залежать тільки від кута виду напруженого стану ψ і не враховують кута нахилу конусу пуансона, товщини заготовки та коефіцієнту тертя. Це не зовсім зручно з технологічної точки зору. Але, важливим є отримання залежностей, щодо розрахунку товщини готового виробу та його кінцевого радіусу.

Закордонні автори присвячують теоретичному аналізу операціям роздавання трубних заготовок також дуже багато уваги. Так, починаючи з рішення Р. Хілла [10] 1950 року, подальші дослідження зосереджуються на спрощенні рівнянь рівноваги за рахунок допущення про плоский напружений стан та об'ємний деформований.

Наприклад, дослідники [13], також як і Р. Хілл, розглядають два рівняння рівноваги. Перше рівняння складається з проекцій усіх зусиль, діючих на елемент заготовки у напрямку, перпендикулярному до матриці

$$q \left(r \Delta\theta \frac{dr}{\sin \alpha} \right) = \sigma_{\theta} \left(t \frac{dr}{\sin \alpha} \right) \cos \alpha \sin \Delta\theta. \quad (23)$$

Друге рівняння рівноваги дорівнює сумі усіх сил, діючих на елемент у напрямку паралельному до утворюючої матриці

$$(r + dr)(t + dt)\Delta\theta(\sigma_z + d\sigma_z) = tr\Delta\theta\sigma_z + r\Delta\theta \frac{dr}{\sin \alpha} \mu q + t \frac{dr}{\sin \alpha} \sigma_{\theta} \sin \alpha \sin \Delta\theta,$$

де q – тиск між матрицею та стінкою заготовки; r – радіус заготовки; α – половина кута матриці; $\Delta\theta$ – кут між меридіональними площинами, які відсікають елементарний елемент заготовки; σ_{θ} – середнє тангенціальне напруження; t – товщина заготовки; σ_z – середнє меридіональне напруження; μ – коефіцієнт тертя.

Шляхом рішення представлених рівнянь рівноваги разом з критерієм пластичності по гіпотезі Губера-Мізеса та представлення відношення швидкостей деформації через напруження за виразом $\frac{dt}{dr} = \frac{\sigma_z + \sigma_{\theta}}{\sigma_z - 2\sigma_{\theta}} \frac{t}{r}$, були отримані

диференціальні формули для обчислення товщини та радіусу напівфабрикату улюбій зоні перетину

$$r \frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{\sigma_z(2\sigma_z + \sigma_{\theta}) + (1 + \mu ctg\alpha)\sigma_{\theta}(\sigma_z + 2\sigma_{\theta})}{\sigma_z + 2\sigma_{\theta}} = 0, \quad (24)$$

$$t \frac{d\sigma_z}{dt} + \frac{\sigma_z(2\sigma_z + \sigma_{\theta}) + (1 + \mu ctg\alpha)\sigma_{\theta}(\sigma_z + 2\sigma_{\theta})}{\sigma_z - \sigma_{\theta}} = 0. \quad (25)$$

Інтегрувати рівняння (24) та (25) Р. Хілл пропонує чисельно. Але, в роботі [11] автором запропоновано аналітичне інтегрування аналогічних диференціальних рівнянь і отримано вирази стосовно r та t

$$\ln(x_r) = \frac{y}{mb} + 2 \frac{\ln(2 - mby + 2mb^2)}{m^2 b^2} + c_r, \quad (26)$$

$$\ln(x_t) = \frac{y}{mb} + 2 \frac{\ln(2 - mby + 2mb^2)}{m^2 b^2} + 3 \frac{\ln(2 - mby + 2mb^2)}{m} + c_t, \quad (27)$$

де c_r та c_t – константи інтегрування.

Ці константи знаходять з граничних умов: $y = 0, x_r = 0$ та $y = 0, x_t = 0$, тоді

$$c_r = -2 \frac{\ln(2 + 2mb^2)}{m^2 b^2}, \quad c_t = -(2 - 3mb^2) \frac{\ln(2 + 2mb^2)}{m^2 b^2},$$

де $m = \mu \operatorname{ctg} \alpha$; $y = \frac{\sigma_z}{\sigma_e}$; $x_t = \frac{t}{t_1}$; $x_r = \frac{r}{r_1}$; b – константа першого порядку у рівнянні

пластичності.

Таким чином, бачимо, що для отримання розподілу товщини та радіусу заготовки по утворюючій конічного розтрубу застосовано вирішення комбінації двох рівнянь рівноваги з умовою пластичності Губера-Мізеса та запропоновано використання теорії пластичної течії. Це дало змогу авторам отримати замкнуті аналітичні рівняння. Чисельне вирішення завдання, яке використовує Р. Хілл, також має велике значення, тому що легко автоматизується та візуалізується. Однак, вирази (26) та (27) складно використовувати для технологічних процесів роздавання циліндричних заготовок. Вони заважкі до сприйняття та аналізу впливу основних факторів процесу на кінцевий результат. Такі вирази дуже добре застосовувати для перевірочних та уточнюючих розрахунків під час виведення спрощених аналітичних або емпіричних формул.

У таблиці 1 подано зведений порівняльний аналіз існуючих підходів до визначення напружено-деформованого стану під час роздавання циліндричної заготовки, основні допущення та порівняльні критерії. На рисунку 1 показано складність розв'язання математичних моделей різних авторів та вплив рішень на точність визначення деформованого стану. У таблиці 2 приведені дані (технологічні та конструктивні фактори процесу роздавання), які входять у рівняння математичних моделей роздавання з технологічної точки зору.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця основних підходів

Існуючі теорії/ критерії порівняння	Теорія листового штамп-ння (Keeler, Wang)	Безмоментна теорія оболонок (Надаї)	Теорія пластичної течії (Johnson)	Комбінований підхід (Hill та ін.)
Основне припущення	Плоский напружений стан, ігнорується товщина	Кирхгофа– Лява, тонка оболонка	Ідеальний жорстко- пластичний матеріал	Поєднання рівнянь рівноваги з критерієм пластичності
Врахування тертя	Так коефіцієнт μ	Неявно через навантаження	Так коефіцієнт f	Так (через параметр $m = \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha$)
Врахування зміцнення	Так (апрокс-ція кривої)	Ні (не враховано в явному вигляді)	Ні	Частково (через константу b)
Тип розв'язку	Анал-чний (замкнутий)	Аналітичний (спрощений)	Напіваналний, потребує	Напіванал-ний/ чисельний

Існуючі теорії/ критерії порівняння	Теорія листового штампу-ння (Keeler, Wang)	Безмоментна теорія оболонок (Надаї)	Теорія пластичної течії (Johnson)	Комбінований підхід (Hill та ін.)
			інтегрування	
Основна вихідна величина	Напруження (σ_r , σ_θ)	Зусилля ($T_\square$, $T_\square$) та напруження	Напруження (σ_m , σ_t) та кут ψ	Товщина (t) та радіус (r)
Зручність для технолога	Висока (явні формули)	Середня (потребує знань теорії оболонок)	Низька (складні інтеграли)	Низька (чисельні методи)
Придатність для чисельного моделювання	Обмежена	Обмежена	Висока (через параметризацію)	Висока

Джерело: розроблено автором

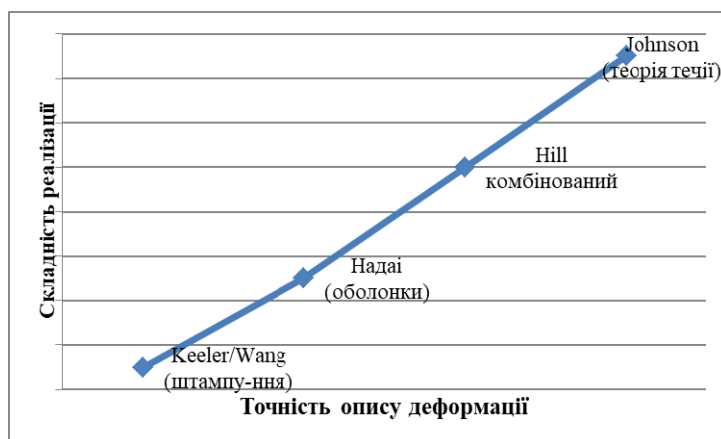


Рисунок 1 – Графік порівняння складності розв'язання моделей та точності підрахунку деформацій

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 - Врахування технологічних факторів

Фактор впливу	Keeler/Wang	Надаї	Johnson	Hill
Кут конусу пуансона (α)	Так	Так	Так	Так
Товщина заготовки (h)	Так	Так	Так	Так
Коефіцієнт тертя (μ/f)	Так	Неявно	Так	Так
Зміцнення матеріалу	Так	Ні	Ні	Частково
Втрата стійкості	Ні	Ні	Ні	Ні

Джерело: розроблено автором

Висновки. Критичний огляд підходів до теоретичного аналізу процесу роздавання трубчатої циліндричної заготовки показав, що цей метод пластичного формоутворення достатньо добре досліджений та отримані замкнуті аналітичні рішення. Автори публікацій зосереджені на досягненні різних цілей. Це картина розподілу напружень у стінках напівфабрикату, розподіл деформацій, зменшення товщини виробу та закони збільшення радіусу заготовки на деформованій частині. Але

відкритими залишаються питання, щодо втрати стійкості як деформованої, так і недеформованої частини заготовки. Це ж саме стосується і руйнування стінок зразків. Ґрунтуючись на поданих рішеннях, можна визначити ці питання, вводячи критерії втрати стійкості та руйнування. Дослідження безпосередньо пов'язує технологічні параметри деформації з фундаментальними матеріалознавчими явищами (пластичність, зміцнення та критерії руйнування), що дозволяє не лише описувати, а й прогнозувати поведінку заготовки з урахуванням її реальних механічних характеристик та мікроструктурних змін.

Для подальших досліджень по даній тематиці з врахуванням попередніх напрацювань різних дослідників необхідно застосування синергетичного підходу, який буде враховувати найкращі практики методів теоретичного аналізу листового штампування та технічної теорії оболонок.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації, порівняльному аналізі та уточненні різних підходів щодо визначення напружено-деформованого стану заготовки під час роздавання конічним пуансоном. Де виділяються ключові аспекти існуючих теорій, такі як точність опису поля напружень та деформацій, обмеження класичних теорій та зручність застосування отриманих рішень на практиці у технологічних розрахунках. Виділяються невирішені завдання та пропонується комплексний підхід з акцентом на сучасне виробництво з залученням цифрових технологій.

Список літератури

1. Tan C.J. End Formation of a Round Tube into a Square Section with Reduced Forming Loads. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 395-396. P. 945–948. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.395-396.945.
2. Пузир Р.Г., Троцько О.В., Черкашенко В.Ю. Вплив геометричних параметрів циліндричної заготовки на напружено деформований стан при роздачі конічними пуансонами. *Обробка матеріалів тиском: збірник наукових праць*. Краматорськ: 2012. № 4 (33). С. 114-121.
3. Karrech A., Seibi A. Analytical model for the expansion of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210, №. 2. P. 356–362. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.024.
4. Yang J., Luo M., Hua Yu., Lu Xu. Energy absorption of expansion tubes using a conical–cylindrical die: Experiments and numerical simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2010. Vol. 52, №. 5. P. 716–725. Doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.015.
5. Keeler S.P. Sheet Metal Stamping Technology – Need for Fundamental Understanding. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Springer. Boston: MA, 1978. P. 3–18. Doi: 10.1007/978-1-4613-2880-3_1.
6. Wang N.M. A mathematical model of drawbead forces in sheet metal forming. *J. Applied Metalworking*. 1982. Vol. 2. P. 193–199. Doi: 10.1007/BF02834037.
7. Thomsen E.G., Yang C.T., Kobayashi S. Plastic Deformation in Metal Processing. Macmillan, 1965. 486 p.
8. Nádai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. McGraw-Hill, 1950. 572 p.
9. Johnson W., Mellor P.B. Plasticity for mechanical engineers. D. Van Nostrand Company LTD, 1962. 412 p.
10. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. *Oxford University Press*, New York, 1950. 407 p.
11. Пузир Р. Г., Левченко Р. В., Сіра Ю. Б., Лелюх С. Н. Чисельне моделювання втрати стійкості трубної заготовки під час роздачі сполучних перехідників. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». 2019. № 12 (1337). С. 51–56.
12. Пузир Р. Г. Визначення довжини хвилі загасання згинального моменту при роздачі циліндричної заготовки. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2012. № 5 (76), С. 64–66.
13. Al-Abri O.S. Analytical and numerical solution for lardge plastic deformation of solid expandable tubular. *SPE International*. 2011. 152370. P. 1 – 13.

References

1. Tan, C.J. (2013). End Formation of a Round Tube into a Square Section with Reduced Forming Loads. *Applied Mechanics and Materials*, 395-396, 945–948. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.395-396.945.

2. Puzyr, R.G., Trocko, O.V. & Cherkashenko, V.Yu. (2012). Vpliv geometrichnih parametriv cilindrichnoyi zagotovki na napruzhenno deformovaniy stan pri rozdachi konichnimi puansonami. *Obrobka materialiv tiskom: zbirnik naukovih prac*. Kramatorsk: 4 (33), 114-121. [in Ukrainian].
3. Karrech, A. & Seibi, A. (2010). Analytical model for the expansion of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2, 356–362. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.024.
4. Yang, J., Luo, M., Hua, Yu, & Lu, Xu. (2010). Energy absorption of expansion tubes using a conical–cylindrical die: Experiments and numerical simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, 5, 716–725. Doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.015.
5. Keeler, S.P. (1978). Sheet Metal Stamping Technology – Need for Fundamental Understanding. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Springer. Boston: MA, 3–18. Doi: 10.1007/978-1-4613-2880-3_1.
6. Wang, N.M. (1982). A mathematical model of drawbead forces in sheet metal forming. *J. Applied Metalworking*, 2, 193–199. Doi: 10.1007/BF02834037.
7. Thomsen, E.G., Yang, C.T. & Kobayashi S. (1965). *Plastic Deformation in Metal Processing*. Macmillan.
8. Nádai, A. (1950). *Theory of Flow and Fracture of Solids*. McGraw-Hill.
9. Johnson, W. & Mellor, P.B. (1962). *Plasticity for mechanical engineers*. D. Van Nostrand Company LTD.
10. Hill, R. (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford University Press, New York.
11. Puzyr, R. G., Levchenko, R. V., Sira, Yu. B. & Lelyuh, S. N. (2019). Chiselne modelyuvannya vtrati stijkosti trubnoyi zagotovki pid chas rozdachi spoluchnih perehidnikiv. *Visnik Nacionalnogo tehnicznego universitetu «HPI»*. Seriya: «Innovacijni tehnologiyi ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiyi», 12(1337), 51–56. [in Ukrainian].
12. Puzyr, R. G. (2012). Vznachennya dovezhyni hvili zagasannya zginalnogo momentu pri rozdachi cilindrichnoyi zagotovki. *Visnik Kremenchuckogo nacionalnogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradskogo*, 5 (76), 64–66. [in Ukrainian].
13. Al-Abri, O.S. (2011). Analytical and numerical solution for lardge plastic deformation of solid expandable tubular. *SPE International*, 152370, 1–13.

Ruslan Puzyr, Prof., Dr. Tech. Sci., **Rostyslav Kozlov**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

A Review of Analytical Methods for Evaluating the Stress-strain State of Workpieces During the Processing of Semi-finished Pipe Products

This study reviews analytical modeling methods for the division of tubular cylindrical blanks and identifies the primary factors influencing the stress-strain state of blank walls. The objective is to establish a mathematical model for the asymmetric deformation of bell-shaped products.

The work provides a critical analysis of existing analytical models of the process of dividing a cylindrical blank with conical punches. It is shown that this processing method is used in various industries and is sufficiently studied from a theoretical point of view. Some researchers focus on calculating the components of the stress tensor. They explicitly identify technological process factors that affect the quality of the final product. Other researchers pay more attention to the deformed state of the blank and, based on the obtained dependencies, calculate changes in the radius of the semi-finished product along the forming conical surface and wall thinning in the deformed part. Various theoretical approaches are used: sheet metal stamping theory, theory of shells of rotation, deformation theory of plasticity, and theory of plastic flow. The obtained dependencies have closed solutions, which are obtained by direct integration of the equilibrium conditions of the workpiece element with the plasticity conditions. But there are solutions that are proposed to be integrated numerically. This integration approach somewhat reduces the informativeness of the final formulas and does not allow for investigating the weight of each parameter of the technological process in relation to its regulation. However, the development of digital calculation tools and computer programs allows the creation of a powerful tool for analyzing the processes of distributing cylindrical semi-finished products based on the equation database.

Questions regarding the loss of stability of both the deformed and undeformed parts of the workpiece remain open. The same applies to the destruction of the walls of the samples. Based on the presented solutions, these questions can be determined by introducing the criteria for loss of stability and destruction. For further research on this topic, taking into account the previous work of various researchers, it is necessary to apply a synergistic approach that will take into account the best practices of methods for theoretical analysis of sheet metal stamping and the technical theory of shells.

distribution, cylindrical workpiece, equilibrium equation, hardening, wall thickness

Одержано (Received) 21.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 10.02.2026

М. М. Студент¹, проф., д-р техн. наук, О. Г. Лук'яненко¹, ст. досл., канд. техн. наук, Х. Р. Задорожна, канд. техн. наук, С. І. Маркович², доц., канд. техн. наук, В. М. Гвоздецький¹, ст. досл., д-р техн. наук, О. З. Студент¹, проф., д-р техн. наук

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

²Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: student.phmi@gmail.com, alukanenko246@gmail.com, irynapohrelyuk@gmail.com, marko60@ukr.net, gvosdetcki@gmail.com, student.phmi@gmail.com

Структура та зносостійкість дуплексних нітридних покриттів на титановому сплаві ВТ9

Досліджено структуру, мікротвердість та схильність до сколювання дуплексних покриттів на титановому сплаві ВТ9. Структура дуплексного покриття складається із дифузійного азотованого підшару та основного йонно-плазмового шару (Physical Vapor Deposition PVD) нітриду титану (надалі PVD TiN) або нітриду цирконію (PVD ZrN). Мікротвердість покриттів PVD, напилених на попередньо азотовані титанові зразки, є значно вищою ніж без азотованого підшару. Фазовим аналізом встановлено, що дифузійний азотований шар це твердий розчин азоту у титані без фазової плівки, а головною складовою PVD шару є нітрид титану TiN, або нітрид цирконію ZrN. Результати спектрального аналізу підтвердили, що PVD шари переважно містять титан, або цирконій та азот з незначною кількістю алюмінію у вигляді домішок. Встановлено, що азотований підшар суттєво зменшує схильність до утворення відколів обох дуплексних покриттів (азотований підшар + PVD TiN і азотований підшар + PVD ZrN) та на два порядки підвищує зносостійкість титанового сплаву.

титановий сплав, дифузійне азотування, йонно-плазмове покриття, структура, мікротвердість

Постановка проблеми. Завдяки поєднанню високої питомої міцності та корозійної стійкості, титанові сплави стали незамінними в авіа- та автомобілебудуванні, у хімічній промисловості та медицині. В автомобільній галузі титанові сплави використовують для виготовлення клапанів та пружин, що дає змогу двигуну набирати оберти швидше, підвищуючи його ефективність та потужність. Титановим сплавам характерна висока жорсткість тому виготовлені із цих сплавів пружини можуть бути коротшими та значно легшими за сталеві. Заміна сталевих деталей на титанові знижує інерційність системи, що критично для високооберткових двигунів. Кріплення із титанових сплавів використовують для зменшення маси автомобілів, що підвищує ресурс та покращує їх керованість. Виготовлення статорів електродвигунів із титанових сплавів підвищує їх потужність на 8...10% порівняно з алюмінієвими за відповідних габаритних розмірів. Технології 3D-друку дають змогу виготовляти титанові деталі з внутрішніми порожнинами (наприклад, гальмівні супорти), які неможливо виготовити за технологією литва. Це зменшує їх вагу на 40% без втрат за міцністю.

В останні роки в автомобілебудуванні намітився тренд на використання деталей із титанових сплавів вже в серійному виробництві (особливо в електромобілях та гібридах). Україна має одні із найбільших запасів титанових руд у світі і тому для нашої промисловості є важливим виробництво титанових сплавів, дослідження властивостей та пошук нових можливостей для їх ефективного застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сплави титану ВТ6 (Ti–6Al–4V) та ВТ9 (Ti–6Al–3Mo–2Zr) мають високу питому міцність проте мають суттєвий недолік – низьку зносостійкість (схильність до утворення задирів та інтенсивного стирання під

час тертя) [1-3]. Відомі методи поверхневого зміцнення азотуванням та оксидуванням, формують на поверхні титанових сплавів тонку фазову плівку $2...3\ \mu\text{m}$ із нітриду або оксиду титану з градієнтним за вмістом азоту чи кисню шаром ($20...30\ \mu\text{m}$) твердого розчину під нею [4-6]. Такий тонкий зміцнений шар не може істотно підвищити зносостійкість титанового сплаву, особливо за високих питомих навантажень. Для підвищення зносостійкості титанових сплавів широко використовують йонно-плазмовий метод формування на їх поверхні шару нітриду титану товщиною $2...20\ \mu\text{m}$ [7, 8]. Проте і в цьому випадку такі тонкі покриття не можуть забезпечити необхідну зносостійкість конструкційним елементам з титанових сплавів, що експлуатуються за підвищених питомих навантажень. В останні роки поширилася тенденція до підвищення зносостійкості титанових сплавів шляхом застосовування товстіших зносостійких покриттів, сформованих поєднанням різних методів (дуплексні покриття), які можуть використовуватись за підвищених питомих навантажень [9, 10].

Постановка завдання. Мета роботи – підвищити зносостійкість титанового сплаву ВТ9 шляхом застосування дифузійного насичення його поверхневих шарів азотом з наступним нанесенням зверху цього шару йонно-плазмового покриття із нітриду титану або нітриду цирконію. Для досягнення мети необхідно:

- сформувати на поверхні титанового сплаву азотований шар методом хіміко-термічного оброблення
- на азотований шар нанести йонно-плазмовим методом шар нітриду титану або цирконію
- провести порівняльні дослідження трибологічних характеристик титанового сплаву із розробленими дуплексними покриттями

Матеріали та методики досліджень. Азотування титанового сплаву ВТ9 (Ti–6Al–3Mo–2Zr) здійснювали у реакційній камері з газоподібним азотом за парціального тиску газу $10^5\ \text{Pa}$ та температури 850°C з витриманням впродовж 4h. Йонно-плазмові покриття (PVD) з нітриду титану та нітриду цирконію завтовшки $30\ \mu\text{m}$ наносили на поверхню зразків з титанового сплаву ВТ9 на установці “Булат-3” за робочого тиску $6,65\cdot 10^{-3}\ \text{Pa}$ та напруги $800...1000\ \text{V}$. Поверхню зразків попередньо очищували в розряді за напруги $1000...1500\ \text{V}$ впродовж 3 min.

Мікроструктурні дослідження здійснювали на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP (SEM аналіз) із системою мікроаналізу INCA Energy. Мікротвердість заміряли відповідно до вимог ГОСТ 9450–76 на мікротвердомірі ПМТ–3М за навантаження на індентор 100 g. Використовували індентор, робоча частина котрого мала форму піраміди з квадратною основою. Розподіл мікротвердості за глибиною дифузійних шарів визначали на скісних шліфах. Кут нахилу площини скісного мікрошліфа обирали так, щоб ця площа була якомога ближчою до оптичної осі металографічного мікроскопа.

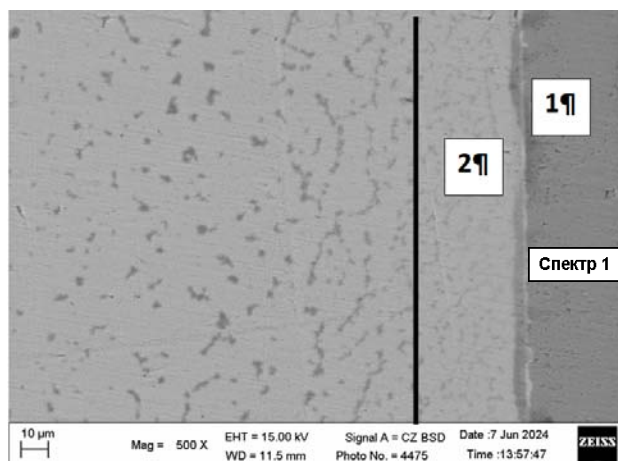
Для визначення схильності покриттів до відколу на їх поверхні наносили лунки алмазним конусом на приладі твердомір Роквела за навантаження $150\ \text{kg}$.

Зношування покриттів досліджували за стирання їх поверхні гумовим диском (діаметр $48...50\ \text{mm}$, ширина $15\pm 0,1\ \text{mm}$) за навантаження $25\ \text{N}$ та швидкості його обертання – $25\ \text{m/min}$; абразив у вигляді кварцевого піску з розміром часточок $200...1000\ \mu\text{m}$ безперервно подавався у зону тертя. Тривалість випробовувань $15\ \text{min}$.

Виклад основного матеріалу. Структура дуплексного покриття складається із дифузійного азотованого шару (2) та йонно-плазмового шару (PVD) (1). Азотований та PVD шари мали приблизно однакову товщину $\sim 30\ \mu\text{m}$, а сумарна товщина дуплексного покриття становила $60...70\ \mu\text{m}$ (рис. 1). Фазовим аналізом встановлено, що дифузійний азотований шар відповідав твердому розчину азоту у титані без фазової плівки, а PVD

шар – нітриду титану TiN, або нітриду цирконію ZrN. Спектральним аналізом підтверджено, що PVD шари переважно містять титан або цирконій з азотом з незначною кількістю домішок алюмінію.

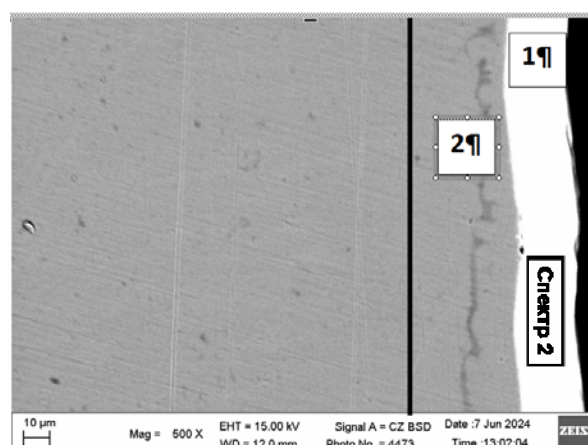
Мікротвердість PVD покриттів на основі нітриду цирконію є дещо меншою ніж у покриттів на основі нітриду титану (табл. 1). Так максимальна твердість покриття PVD ZrN становить 2465 HV_{0,1}, а TiN – 2707 HV_{0,1}. Мікротвердість PVD покриттів, напилених на попередньо азотовані титанові зразки, є на 50...150 HV_{0,1} більшою ніж PVD покриттів без азотованого підшару (табл. 1). Очевидно це пов'язано із деякою дифузією азоту в процесі PVD в попередньо насичений азотом підшар. Адже підвищена мікротвердість дифузійного підшару зберігається до його товщини 60...70 μm.



Спектр 1

Елемент	Ваговий %	Атомний%
N	2.90	9.28
Al	0.02	0.02
Ti	97.08	90.70
Сума	100.00	

а



Спектр 2

Елемент	Ваговий %	Атомний%
N	2.74	9.2
Ti	0.18	0.34
Zr	97.08	90.46
Сума	100.00	

б

Рисунок 1 – Структура та спектральний аналіз поверхневих шарів дуплексних покриттів на титановому сплаві BT9: а) – дифузійний азотований шар + (PVD TiN), б) – дифузійний азотований шар + (PVD ZrN).

1 – PVD шари, 2 – дифузійні шари.

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Мікротвердість HV_{0,1} дуплексних покриттів на титановому сплаві BT9

Віддаль від поверхні покриття до місця заміру мікротвердості	Випробовувані покриття на сплаві BT9			
	Азотований дифузійний підшар + PVD TiN	PVD TiN	Азотований дифузійний підшар + PVD ZrN	PVD ZrN
<i>l</i> , мкм	Мікротвердість, HV _{0,1}			
5	1658	1502	1025	965
10	2355	2335	2078	1943
20	2820	2707	2502	2465
30	2330	2301	2223	2183
40	801	532	575	425
60	562	405	490	410
80	450	390	421	385
Мікротвердість підкладки зі сплаву BT9	425	395	420	395

Джерело: розроблено авторами

Проведені випробування на схильність до утворення відколів у покриттях показали, що за наявності азотованого підшару розміри відколів суттєво зменшилися як у дуплексному покритті (азотований підшар + PVD TiN) (рис. 2а), так і на дуплексному покритті (азотований підшар + PVD ZrN) (рис. 2б). Як видно на рис. 2 площа сколу навколо уколу алмазним конусом є майже в 2 рази більша на поверхні покриття отриманого лише йонно-плазмовим напыленням нітриду титану ніж у покриття отриманого комбінованим методом – нанесення йонно-плазмового покриття на попередньо азотований дифузійний шар.

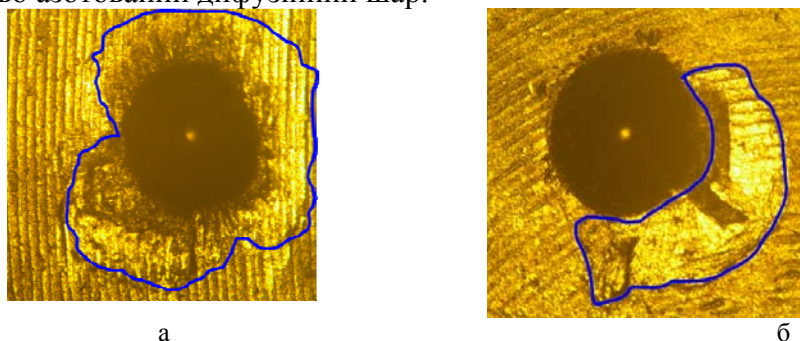


Рис. 2. Фото слідів уколів алмазним конусом поверхні титанового сплаву BT9 з покриттями: а – PVD TiN, б – азотований підшар + PVD TiN, ділянка сколювання біля сліду круглої форми від уколу індентора, виділена синьою лінією

Джерело: розроблено авторами

Таку саму тенденція спостерігали і для покриттів на основі нітриду цирконію (рис. 3). Площа відколу для комбінованого покриття є суттєво меншою ніж для йонно-плазмового покриття без азотованого дифузійного підшару.

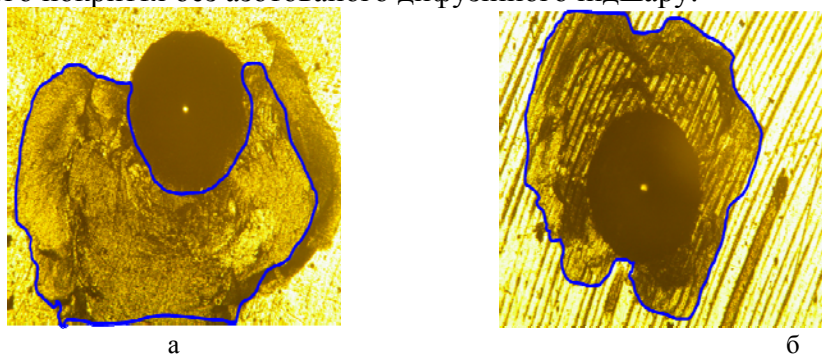


Рисунок 3 – Фото слідів уколів алмазним конусом поверхні титанового сплаву BT9 з покриттями: а – PVD ZrN, б – азотований підшар + PVD ZrN, ділянка сколювання біля сліду круглої форми від уколу індентора, виділена синьою лінією.

Джерело: розроблено авторами

За наявності обох йонно-плазмових покриттів на титановому сплаві його абразивна зносостійкість суттєво збільшилась (табл. 2). А азотований підшар в обох випадках додатково підвищив її.

Таблиця 2 – Зносостійкість покриттів на титановому сплаві BT9

Номер покриття	Покриття на сплаві BT9	Втрата маси зразків за зношування в умовах незакріпленого абразиву, 10^{-3} g
1	PVD TiN	1,2
2	азотований підшар + PVD TiN	1
3	PVD ZrN	1,3
4	азотований підшар + PVD ZrN	1,1
	BT9	100

Джерело: розроблено авторами

Так дуплексні покриття (№2 та № 4) мають більшу на ~20% зносостійкість ніж звиклі PVD покриття без дифузійно твердо зміцненого азотом підшару (№1 та №3). Загалом, дуплексні покриття на основі нітридів титану та цирконію підвищують зносостійкість титанового сплаву на два порядки.

Висновки. Структура дуплексного покриття на поверхні титанового сплаву BT9 складається із дифузійно насиченого азотованого підшару та нанесених зверху на нього іонно-плазмових шарів PVD TiN або PVD ZrN. Мікротвердість PVD покриттів, напилених на попередньо азотовані титанові зразки, перевищила властиву PVD покриттям, нанесеним на зразки без азотованого підшару та зростала на 50...150 HV_{0,1}. Встановлено, що азотований підшар суттєво зменшує площу відколів в обох дуплексних покриттях як типу (азотований підшар + PVD TiN), так і (азотований підшар + PVD ZrN). Дуплексні покриття на основі нітридів титану та цирконію підвищують зносостійкість титанового сплаву на два порядки

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту 2025.06/0028 «Розроблення технології поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів двигунів авіаційної техніки регламентованим дифузійним насиченням елементами втілення»

Список літератури

1. Budinski, K.G. (1991) Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 2 (151), 203-217.
2. Bansal, D.G., Eryilmaz, O.L., & Blau, P.J. (2011) Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 271, 2006-2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.021>
3. Bell, T., Dong, H., & Sun, Y. (1998) Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 1-3 (31), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00015-2)
4. Bansal, D.G., Kirkham, M., & Blau, P.J. (2013) Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*, 302, 837-844. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.034>
5. Marin, E., Offoiach, R., Regis, M., Fusi, S., Lanzutti, A., & Fedrizzi, L. (2016) Diffusive thermal treatments combined with PVD coatings for tribological protection of titanium alloys. *Materials and Design*, 89, 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.011>
6. Pohrel'yuk, I.M., Fedirko, V.M. & Dovhuniyuk, V.M. (2000) Influence of nitriding and oxidation on the wear of titanium alloys. *Materials Science*, 3 (36), 466-471. [in Ukrainian] <http://dx.doi.org/10.1007/BF02769614>
7. Łepicka, M. & Grądzka-Dahlke, M. (2016) Surface modification of Ti6Al4V titanium alloy for biomedical applications and its effect on tribological performance - a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 46, 86-103. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0153-8>
8. Baptista A., Silva F. J. G., Porteiro J., Míguez J. & Pinto G. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands, *Coating*, 2018, 8(11), 402 <https://doi.org/10.3390/coatings811040>
9. Pohrel'yuk I. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R., Lavrys S., Kravchyshyn T. M., Kovalchuk I.V. Tribological characteristics of titanium after combined treatment, *Materials Science*, 2024, 59(6), 1-8. DOI: [10.1007/s11003-024-00836-0](https://doi.org/10.1007/s11003-024-00836-0)
10. Tkachuk O. V., Hvozdet'skyi V. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R., Kovalchuk I. V., Pohrel'yuk I. M. Structural features and wear resistance of the TiAlN coating on the Ti-6Al-4V alloy formed by combining electric arc spraying and gas nitriding methods, *Materials Science*, 2025, 60(4), 453-461. DOI: [10.1007/s11003-025-00905-y](https://doi.org/10.1007/s11003-025-00905-y)

References

1. Budinski, K.G. (1991) Tribological properties of titanium alloys. *Wear*, 2 (151), 203-217.
2. Bansal, D.G., Eryilmaz, O.L., & Blau, P.J. (2011) Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 271, 2006-2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.021>
3. Bell, T., Dong, H., & Sun, Y. (1998) Realizing the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 1-3 (31), 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00015-2)
4. Bansal, D.G., Kirkham, M., & Blau, P.J. (2013) Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*, 302, 837-844. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.034>
5. Marin, E., Offoiach, R., Regis, M., Fusi, S., Lanzutti, A., & Fedrizzi, L. (2016) Diffusive thermal treatments combined with PVD coatings for tribological protection of titanium alloys. *Materials and Design*, 89, 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.011>

6. Pohrel'yuk, I.M., Fedirko, V.M. & Dovhunyuk, V.M. (2000) Influence of nitriding and oxidation on the wear of titanium alloys. *Materials Science*, 3 (36), 466-471. [in Ukrainian] <http://dx.doi.org/10.1007/BF02769614>
7. Łępicka, M. & Grądzka-Dahlke, M. (2016) Surface modification of Ti6Al4V titanium alloy for biomedical applications and its effect on tribological performance - a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 46, 86-103. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0153-8>
8. Baptista A., Silva F. J. G., Porteiro J., Míguez J. & Pinto G. Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands, *Coating*, 2018, 8(11), 402 <https://doi.org/10.3390/coatings811040>
9. Pohrel'yuk I. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R., Lavrys S., Kravchyshyn T. M., Kovalchuk I.V. Tribological characteristics of titanium after combined treatment, *Materials Science*, 2024, 59(6), 1-8. DOI:10.1007/s11003-024-00836-0
10. Tkachuk O. V., Hvozdet'skyi V. M., Student M. M., Zadorozhna Kh. R., Kovalchuk I. V., Pohrel'yuk I. M. Structural features and wear resistance of the TiAlN coating on the Ti-6Al-4V alloy formed by combining electric arc spraying and gas nitriding methods, *Materials Science*, 2025, 60(4), 453-461. DOI:10.1007/s11003-025-00905-y

Mykhailo Student, Prof., Dr. Tech. Sci., **Alexander Luk'yanenko**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Khrystina Zadorozhna**, Senior Research Associate, PhD tech. sci., **Volodymyr Hvozdet'skyi**, Senior Researcher, Dr. Tech. Sci., **Oleksandra Student**, Prof., Dr. Tech. Sci.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
Sergiy Markovych, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Structure and Wear resistance of Duplex Nitride Coatings on VT9 Titanium Alloy

The combination of high specific strength and low weight of titanium alloys (titanium weighs almost half as much as steel) makes them indispensable in the aviation, automotive, and chemical industries, as well as in medicine. In recent years, there has been a trend toward using titanium not only in high-performance automobiles but also in the mass production of components for electric and hybrid vehicles. Ukraine has some of the world's largest titanium ore deposits (specifically, the Irshanske and Samotkanske deposits). Therefore, titanium production is of paramount importance for Ukraine.

Titanium alloys VT6 (Ti-6Al-4V) and VT9 (Ti-6Al-3Mo-2Cr) are among the most popular titanium alloys worldwide. While possessing high strength, they nevertheless have one significant drawback: low wear resistance (susceptibility to scratching and abrasive wear due to friction). Known surface hardening methods, such as nitriding and oxidation, form a thin phase film of titanium nitride or oxide, 2...3 microns thick, on the surface of the titanium alloy. This film transitions into a 20...30 micron thick layer hardened by interstitial elements (nitrogen or oxygen). However, this thin hardened layer also cannot significantly increase the wear resistance of the titanium alloy, especially under high specific loads. To improve the wear resistance of titanium alloys, physical vapor deposition (PVD) of a 2...20 µm-thick titanium nitride layer onto the surface is widely used. Even in this case, such thin coatings cannot provide significant wear resistance to structural components made of titanium alloys operating under increased specific loads. In recent years, there has been a trend toward increasing the wear resistance of titanium alloys through the use of thicker wear-resistant coatings formed by various methods (duplex coatings), which can be used at higher specific loads.

Nitriding of the VT9 titanium alloy was carried out in a reaction chamber with nitrogen at a partial gas pressure of 10^5 Pa and a temperature of 850 °C for 4 hours. Physical vapor deposition (VPD) of titanium nitride and zirconium nitride with a thickness of 30 µm on the surface of the VT9 alloy was carried out using a Bulat-3 installation at an operating pressure of 6.65×10^{-3} Pa and a voltage of 800...1000 V. The specimen surfaces were pre-cleaned by discharge at a voltage of 1000...1500 V for 3 min.

To determine the tendency of the coatings to chip, their surfaces were indented using a diamond indenter with a conical surface, using a Rockwell tester, under a load of 100 kg.

Conclusions. The duplex structure of the resulting coating consists of a diffusion-nitrided layer and a physical vapor deposition (PVD). The nitrided and PVD layers had approximately the same thickness (30 µm) and the total thickness of the two-layer coating was 60...70 µm. The microhardness of zirconium nitride-based PVD coatings was significantly lower than that of titanium nitride-based coatings. For example, the maximum hardness of a ZrN PVD coating was 2465 HV_{0.1}, while for TiN it was 2707 HV_{0.1}.

The microhardness of PVD coatings deposited onto pre-nitrided titanium specimens were significantly higher than that of specimens without a nitrided underlayer. Thus, the maximum microhardness of PVD coatings increases by 50...150 HV_{0.1}.

titanium alloy, diffusion nitriding, ion plasma coating, structure, microhardness

Одержано (Received) 16.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

О.В. Швидкий*Криворізький національний університет, м Кривий Ріг, Україна**e-mail: Shvidkiyalexandr@ukr.net*

Енергоефективний спосіб при збагаченні залізистих кварцитів

Основою статті є дослідження, при якому визначався вплив речовинного складу залізистих кварцитів на їх міцність. Показник міцності визначається непрямым способом, а за допомогою затрат електроенергії під час подрібнення рудного матеріалу до відповідного класу. Наведено теоретичне обґрунтування та розрахунок витрат електричної енергії на дроблення залізистих кварцитів. Задля зменшення витрат електроенергії запропонований спосіб, який передбачає вилучення частини крупно-кускової фракції рудного матеріалу з процесу збагачення. Наведено розрахунок очікуваного економічного ефекту. Базуючись на результатах проведеного дослідження, представлені відповідні висновки та рекомендації з їх обґрунтуванням та критичним аналізом.

енергозатрати, залізисті кварцити, вміст магнетиту, міцність, збагачення, гранулометричний склад, контроль якості

Постановка проблеми. В даній статті процеси дроблення та подрібнення як такі, що використовуються для розкриття зерен корисного компоненту. Під час помелу слід проводити операції грохочення та класифікації. Всі ці процеси є енергоємні, тому задача стоїть дуже гостро, щоб отримати повноцінний, готовий, якісний продукт і з найменшими затратами енергії та ефективним використанням гірничого обладнання. Енергозбереження є задачею номер один у світовому масштабі.

Рудний матеріал повинен відповідати певним характеристиками на кожній стадії процесу збагачення починаючи від видобутку до відвантаження уже готової продукції.

Оскільки сировина, що надходить на збагачувальні фабрики, має грудки критичного розміру (для відкритих гірничих виробок 1200-1500 мм, для підземних 600-800 мм), процес дроблення і подрібнення проводять в декілька стадій. Технологічно грамотно процеси дроблення супроводжувати операціями грохочення, а процеси подрібнення операціями класифікації. При цьому дотримується так званий «принцип Чеччота» - «не дробити нічого зайвого», своєчасно виводити з процесу готовий по крупності клас, що виключає переподрібнення продукту, економить електроенергію та збільшує термін служби футерувальних плит дробарок і млинів. Між дробленням і подрібненням немає принципових відмінностей. Умовно вважають, що при дробленні одержують продукт з максимальним розміром зерен більше 5 мм, а при подрібненні – менше 5 мм [1].

Якщо взяти процеси збагачення корисних копалин, які є досить енергоємними, затратними, то вочевидь самим дешевим способом отримання готової продукції це безпосередній забір корисних копалин з багатим, високим вмістом цінного компоненту. В надрах природи корисні копалини звісно перемежуються і потім постає питання про те, що робити з корисними копалинами, які мають невеликий відсоток цінного компоненту. Зрозуміло, що це задача оптимізації використання багатих і бідних руд одночасно в суміші.

Кожне родовище має свої характеристики пород, що залягають, і складаючи технологічні карти враховують ці характеристики і встановлюють для кожного із них відповідні критерії. Наприклад один із таких критеріїв – мінімальний вміст магнітного заліза в руді, що вважатиметься некондиційною рудою, тобто не долучати до збагачення, а відправляти на складування.

Проблема економного використання енергоресурсів, зокрема електроенергії, в гірничій справі досліджується багатьма науковцями і винахідниками оскільки, вимагає все більш критичнішого підходу задля досягнення раціональнішого їх використання, що має привести до зниження собівартості продукції та її конкурентоспроможності.

Аналіз досліджень і публікацій. Тривкість, твердість і міцність це загально прийняті поняття, які символізують сукупність фізико-механічних властивостей гірських порід, що виявляється в різних технологічних процесах при видобутку і переробці корисних копалин. Ці поняття визначають здатність гірських порід чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх сил але характеризують свою сторону фізико-механічних властивостей гірських порід [2].

Дроблення і подрібнення є підготовчими операціями збагачення і призначені для роз'єднання (розкриття) рудних зерен різних мінералів, що містяться в корисних копалинах у вигляді тісно перепланих зростків. Чим повніше розкриваються, звільнюються один від іншого мінерали при дробленні і подрібненні, тим успішніше протікає подальший процес збагачення корисних копалин. Крупність зерен, до якої необхідно дробити або подрібнювати матеріал перед збагаченням, визначається розміром вкраплення цінних мінералів і процесом, що прийнятий для збагачення корисної копалини [3].

Процеси збагачення корисних копалин, метою яких є підвищення вмісту цінних компонентів у перероблюваній природній сировині відіграють все зростаючу роль у розвитку сучасної економіки. Це пов'язано, зокрема, з тим, що родовища багатих руд у багатьох випадках вже відпрацьовані і для підтримки виробничих потужностей підприємств на необхідному рівні доводиться залучати в експлуатацію бідні руди. Підвищення вмісту корисних компонентів у концентраті є однією з основних задач при інтенсифікації технологічних процесів в гірничо-видобувній, хімічній, металургійній та інших галузях промисловості [3].

Речовинний склад руд Криворізького басейну визначає фізико-механічні властивості залізистих порід. Ранніми дослідниками, що вивчали властивості руд даного басейну, вказувалося, що для всіх порід і руд зі збільшенням вмісту кварцу характеристики по міцності збільшуються, а зі зростом вмісту магнетиту міцність зменшується.

Практика руйнування руд показує, що лише невелика частина витраченої на руйнування енергії перетворюється в корисну роботу. Тобто для одержання необхідного гранулометричного складу руди обмін енергією між джерелом і тілом, що руйнується, не завжди здійснюється адекватно поставленому завданню [1].

При цьому ефективність процесу збагачення залежить від того, наскільки повно вдалося розкрити зростки мінералів для більш повного розділення корисного компоненту від пустої породи. Це в свою чергу впливає на якість проміжного продукту яке надходить на наступні стадії збагачення і безпосередньо вплине на якість кінцевого продукту.

Погіршення якості сировини, підвищення вимог до повноти і комплексності її використання, розробки ресурсо- і енергозберігаючих технологій роблять усе більш актуальною проблему раціонального руйнування руд, розкриття і збагачення мінералів [4].

У технології збагачування руд найбільш енергоємним процесом є дезінтеграція (дроблення і подрібнення) руд, частка якого складає понад 50-70 % загальних витрат. Відомо, що по електрозатратам тільки 5% витрачається на процеси дроблення, а близько 60% – на процеси подрібнення [6, 7].

Так, для раціональнішого використання електроенергії, деякими дослідниками, пропонується до процесу дроблення пред'явити вищі вимоги, тобто проводити помел до меншого класу крупності вихідного матеріалу. Таким чином, має відбутися перерозподіл енергозатрат із більш затратного переділу в менш затратний, що в свою чергу, повинно привести до зниження собівартості кінцевого продукту.

Тому перспективною є концепція перерозподілу енерговитрат між процесами дроблення і подрібнення, збільшення питомої ваги циклу дроблення в загальному процесі дезінтеграції руд. Для цього необхідно зменшити крупність дробленого продукту з 25-30 мм до 10 мм, бо кожний міліметр зниження крупності дробленої руди дозволяє на 1,2-1,5% знизити енергоємність і на стільки ж підвищити продуктивність наступних операцій рудо підготовки [6].

Постановка задачі. Визначивши ступінь впливу речовинного складу залізистих кварцитів на міцність по енергозатратам під час їх подрібнення, здійснити пошук з мінімізації інтегральної енергоємності їх руйнування, тобто основною метою є досягнення зменшення енерговитрат при видобуванні та переробці залізо-містких руд, в залежності від їх фізичних та хімічних властивостей.

Використовуючи досвід напрацьований в Проблемно-галузевій науково-дослідній лабораторії при Криворізькому національному університеті, який направлений на дослідження фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей гірських порід і руд, зробити кількісне та якісне обґрунтування припущення, що задля зменшення енерговитрат вилучати крупно-кусову фракцію з подальшого процесу збагачення. Оскільки в даній фракції вміст корисного компоненту нижчий, а міцність більша. Передбачається, що вилучення виконувати на прикінцевих стадіях дроблення.

Викладення основного матеріалу та результатів. Використовуючи матеріали, які були опубліковані на IX Міжнародній науково-практичній конференції [8], де представлений аналіз більш ніж 240 вимірювань. Для визначення кількісного виходу фракцій проводився розсів, за яким було зроблено висновок, що чим менший вміст магнетиту, тим більший вихід крупного класу в продуктах дроблення.

Також був проведений розрахунок по витраті електроенергії під час подрібнення. І в вигляді питомої витрати електроенергії на одиницю маси проби була отримана функція залежності від вмісту магнетиту, що описується рівнянням (1).

$$E = 0,7658 \cdot (\text{Fe})^2 - 66,24 \cdot (\text{Fe}) + 2078, \quad (1)$$

де надійність апроксимації R^2 становить 0,99 [8].

Одним з недоліків даного дослідження це те, що не використовувались проби руд з низьким вмістом магнетиту, що в свою чергу говорить, про неповноту дослідження. Хоча, це не заважає над отриманою залежністю провести екстраполяцію до менших значень масової частки заліза магнітного. Вид кривої при такому підході продемонстровано на рис.1.

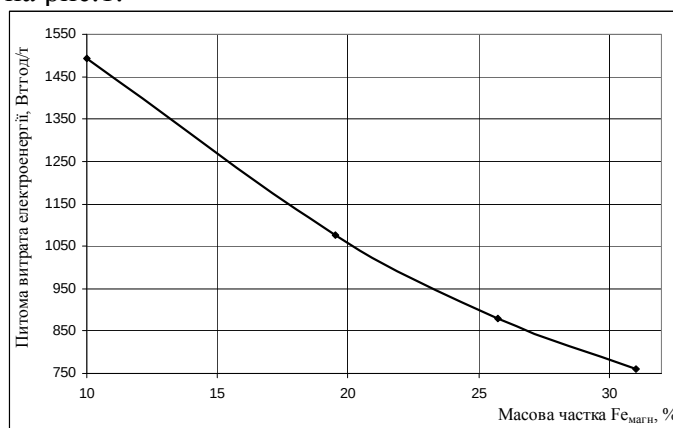


Рисунок 1 – Залежність питомої витрати електроенергії на подрібнення руди від масової частки магнетиту з екстраполяцією

Джерело: зроблено автором

Таким чином, аналізуючи характер кривої, можна стверджувати, що питома витрата електроенергії для руд з нижчим вмістом магнетиту буде більшою.

Екстраполяція показує суттєві і навіть невиправдано великі затрати електроенергії на подрібнення руд з бідним вмістом корисного компоненту. В даному випадку екстраполяція обмежена на рівні 10% масової частки магнетиту в руді.

Беручи до уваги все вище сказане, проведемо розрахунок економічного ефекту від запропонованого підходу, а саме відділення крупно-кускової фракції, яка є за вмістом заліза біднішою, з циклу збагачення. Кількість вилученого матеріалу обмежимо на рівні 5%, бо більше чи менше це вже питання іншого дослідження. А якщо взяти до уваги різні дробильні фабрики, де наявне різне устаткування для проведення дроблення, то обґрунтування доцільності такого підходу для кожної буде своїм, та може бути відчутно різним.

Звернемось до передбачуваного економічного ефекту. В даний час на території Криворізького басейну розміщено п'ять гірничо-збагачувальних комбінатів: ПівдГЗК, ІнГЗК, ЦГЗК, ПівнГЗК та НКГЗК.

За даними з відкритих джерел видобуток руди на цих підприємствах на рік сягає: ПівнГЗК 26,6 млн. тонн, НКГЗК 15,2 млн. тонн, ЦГЗК 15 млн. тонн, ІнГЗК 36 млн. тонн, ПівдГЗК 18 млн. тонн. Це середньозважені показники на рік.

Якщо узагальнити показники, то видобуток гірничорудними підприємствами Криворіжжя варіюється в межах 100 млн. тонн на рік.

За даними Міністерства статистики України найбільшими споживачами електроенергії в Україні є чорна металургія 28% [9]. Щодо споживання електроенергії питома вага гірничорудного виробництва складає більше 25% [5].

По вітчизняних ГЗК показники електроенергоефективності виглядають наступним чином: середня питома витрата електроенергії на ГЗК, де кінцевий продукт – обкотиші, – 62-63 кВт·год/т., а де залізорудний концентрат – 38-45 кВт·год/т. [10].

У собівартості готового продукту процеси руйнування являються вагомою частиною від всіх затрат.

За отриманими результатами проведеного дослідження можна стверджувати, що одним із шляхів зниження енерговитрат при видобутку та переробці залізистих кварцитів це відділення крупно-кускової фракції після дроблення від гірничої маси, що йде на наступні етапи переробки руди. Це підтверджено рис.1, що на їх подрібнення буде витрачено більше електроенергії.

Якщо взяти, що кількість електроенергії, яка затрачається на обробку однієї тонни руди становить близько 40 кВт·год. З урахуванням річного обсягу видобутку залізистих кварцитів у ГЗК Кривбасу, приблизно 100 млн. т., то видалення 5% крупно-кускової фракції руди від загальної маси дозволить знизити енерговитрати приблизно на $0,05 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 40 = 200$ млн. кВт на рік. А враховуючи, що вартість однієї кВт·год для підприємств становить понад 10 грн., то загальна сума витрат перевищить 2 млрд. грн.

Даний висновок не можна сприймати, як необхідність, а як суто той, що впливає із дослідження. Тому що, говорити про досягнення економії електроенергії можливо тільки при комплексному підході, де враховані всі ділянки ГЗК. Оскільки вилучення крупно-кускової фракції під час дроблення може привести до погіршення наступного підготовчого процесу – подрібнення, бо в сировині буде менша кількість міцної фракції, яка відіграє не останню роль в процесі подрібнення. Наступне те що, вилучення частини уже видобутої сировини безпосередньо збільшить об'єм бурових, вибухових, а також навантаження на транспортні перевезення, щоб зберегти оптимальну, і в той же час, ефективну роботу всього переділу ГЗК.

Також, доцільно було б не просто частину крупного матеріалу вилучати з процесу збагачення, а проводити контроль якості матеріалу, що вилучатиметься. Це дасть можливість правильно оцінити необхідність вилучати крупно-кускову фракцію з переділу чи пустити на повторне коло дроблення. Тому є необхідним впровадження в технологічні процеси засобів оперативного контролю параметрів сировини [11].

Адже контроль плин технологічних процесів збагачення є важливим питанням. Тому розробка і впровадження датчиків та визначників, дозволить оптимально налаштувати технологічну лінію в цілому, або окремі її ділянки, і проводити моніторинг роботи гірничого обладнання. Це дає змогу оперативно виявляти відхилення в роботі і, при належному реагуванні на збої, відновлювати роботу ГЗК [11].

Дроблення і подрібнення є найбільш енергоємними і дорогими процесами у циклі збагачення корисних копалин. Капітальні та експлуатаційні витрати на них можуть досягати 70 % від усіх затрат на збагачення. Тому удосконалення дробильного і подрібнювального обладнання, застосування найбільш ефективних і економічних способів і схем підготовчих операцій мають важливе народногосподарське значення [11].

Для підвищення конкурентної спроможності залізовмісної продукції в Україні, необхідно впроваджувати і використовувати енергозберігаючі заходи, методи, способи, технології, обладнання і т. ін., щоб продукція мала попит не тільки на місцевому рівні.

Використовуючи результати дослідження і рекомендований підхід до вилучення крупно-кускової фракції, можна досягти зниження енерговитрат при дробленні рудного матеріалу. Кількісна оцінка, по вилученні даної фракції, і на якій стадії дроблення це впроваджувати, то для кожного ГЗК буде відмінна, і потребує детальнішого вивчення.

Висновки. 1. За речовинним складом, чим менший вміст магнетиту, тим вища міцність залізистих кварцитів.

2. Відповідно до ситового аналізу вихід фракції крупного класу спостерігається на пробах з меншим вмістом магнетиту.

3. За розподілом енерговитрат, відомо, що 5% витрачається на дроблення і близько 60% – на процеси подрібнення, тому доцільно перерозподілити з більш витратного переділу на менш витратний, що має призвести до зниження енерговитрат. Для цього потрібно проводити помел до меншого класу крупності.

4. Щоб під час дроблення досягти вищих показників і при цьому суттєво не збільшувати енерговитрат, то необхідно вилучати крупно-кускову фракцію з попередніх стадій дроблення, тобто вилучити надрешітний продукт.

5. І головне, вилучення з процесу дезінтеграції крупно-кускової фракції проводити з контролем якості, бо для різних родовищ і ГЗК різні вимоги щодо якості до залізорудної сировини.

Список літератури

1. Олійник Т.А., Скляр Л.В., Олійник М.О. Дослідження умов селективного руйнування мінеральних комплексів при збагаченні гематит-ільменітових руд. *Збагачення корисних копалин*. 2015. Вип. 60(101). URL: <https://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2015-60-101/07.pdf> (дата звернення 02.08.2025р).
2. Білецький В.С., Гайко Г.І., Торопчинова К.Л. Українська енциклопедія. Тематичний реєстр гасел з напрямку «Гірництво та науки про Землю»: енциклопедія. Київ: Державна наукова установа «Енциклопедичне видавництво», 2019. 248 с.
3. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин / Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 634 с.
4. Сокур М.І., Равінська В.О. Енергозбереження при переробці залізних руд. *Геотехнології*. 2022. Вип. 5. С. 31-36.
5. Сокур М.І., Білецький В.С. Дослідження енергоспоживання дробильно-збагачувальних фабрик. *Геотехнології*. 2021. Вип. 4. С. 14-20.
6. Імітаційна модель електроспоживання процесу рудопідготовки в умовах РЗФ-1 Північного ГЗК. / М.І. Сокур та ін. *Збагачення корисних копалин*. 2018. Вип. 71. С. 56-62.
7. Математичне моделювання електроспоживання на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК. / М.І. Сокур та ін. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 65(106). С. 72-77.
8. Азарян А.А., Трачук А.А., Швидкий О.В. Дослідження енергоефективності збагачення залізистих кварцитів. *Наукові дослідження: сучасні виклики та перспективи*: зб. матеріалів конф. IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 14-16 квіт. 2025р. Німеччина Мюнхен: MDPC, 2025. С. 230-234.
9. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm (дата звернення 19.06.2025).
10. Сінчук І.О., Методологічні засади оцінювання електроефективності залізорудних підприємств: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2019, 248 с.

11. Оперативний контроль та управління якістю при видобутку і переробці мінеральної сировини: монографія / А.А. Азарян та ін. Прага: OKTAN PRINT, 2020. 500 с.
12. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / М.І. Сокур та ін. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с.

References

1. Oliinyk, T.A., Skliar, L.V. & Oliinyk, M.O. (2015). Study of the conditions of selective destruction of mineral complexes during enrichment of hematite-ilmenite ores. *Mineral concentration*, 60(101). <https://zzkk.nmu.org.ua/pdf/2015-60-101/07.pdf> [in Ukrainian].
2. Biletskyi, V.S., Haiko, H.I. & Toropchynova, K.L. (2019). *UKRAINIAN ENCYCLOPEDIA. THEMATIC REGISTER OF KEYWORDS in the field of "Mining and Earth Sciences"* V.S. Biletskyi (Ed.). K: State Scientific Institution "Encyclopedic Publishing House" [in Ukrainian].
3. Biletskyi, V.S., Oliinyk, T.A. & Smyrnov, V.O. et al. (2020). *Fundamentals techniques and technologies of mineral concentration*. Kyiv: Publishing Lira-K [in Ukrainian].
4. Sokur, M.I. & Ravinska, V.O. (2022). Energy saving in iron ore processing. *Geotechnologies*. 5, 31-36 [in Ukrainian].
5. Sokur, M.I. & Biletskyi, V.S. (2021). Research on energy consumption of crushing and enrichment plants. *Geotechnologies*. 4, 14-20 [in Ukrainian].
6. Sokur, M.I., Biletskyi, V.S., Bozhyk, D.P. & Kochatok, A.V. (2018). Simulation model of electricity consumption of the ore preparation process in the conditions of the ore processing plant 1 of the Northern Mining and Processing Plant. *Mineral concentration*. 71, 56-62 [in Ukrainian].
7. Sokur, M.I., Biletskyi, V.S., Sokur, L.M. & Sokur, I.M. (2017). Mathematical modeling of electricity consumption in crushing and grinding complexes of mining and processing plants. *Mineral concentration*. 65(106), 72-77 [in Ukrainian].
8. Azaryan, A.A., Trachuk, A.A. & Shvydkyi, O.V. (2025). Research on the energy efficiency of ferruginous quartzite concentration. *Scientific research: modern challenges and future prospects: Proceedings of the IX-th International scientific and practical conference* (pp 230-234). Munich: MDPC Publishing [in Germany].
9. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/energ.htm [in Ukrainian].
10. Sinchuk, I.O. (2019). *Methodological principles for assessing the electrical efficiency of iron ore enterprises*. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. [in Ukrainian].
11. Azaryan, A.A. et al. (2020). *Operational control and quality management in the extraction and processing of mineral raw materials*. Prague: OKTAN PRINT [in Ukrainian].
12. Sokur, M.I. et al. (2017). *Preparation minerals for beneficiation*. Kremenchuk: Kremenchuk National University named after M. Ostrogradsky, Academy of Mining Sciences of Ukraine. PP Shcherbatykh O.V. [in Ukrainian].

Oleksandr Shvydkyi

Kyryvyi Rih National University, Kyryvyi Rih, Ukraine

Energy Efficient Method for Concentration of Ferruginous Quartzites

The aim of the article was to search for and theoretically substantiate an energy-efficient method for the destruction of ferruginous quartzites. The physical and mechanical properties, namely the strength of ferruginous quartzites, depend on the material composition. When grinding magnetite ore, energy consumption is higher if the content of the useful component in the ore is lower, and the yield by fractions depends on the amount of quartzite in the material being ground. In view of this, the proposed method is to separate the coarse-lumpy fraction from the general beneficiation cycle.

The article is based on a study that determined the influence of the material composition of ferruginous quartzites on their strength. The strength indicator is determined indirectly, using the energy consumption during grinding of ore material to the appropriate class. Having determined the degree of influence of the material composition of ferruginous quartzites on the strength in terms of energy consumption during their grinding, a functional dependence was established. Then, the extrapolation of the obtained function was made. And as a result of the work, an approach was proposed that involves reducing the energy intensity during the destruction of ferruginous quartzites during their crushing. The theoretical justification of this method is given, since it provides a basis for predicting the disclosure of minerals and choosing the operating modes of technological equipment. The calculation of the expected economic effect for mining and processing enterprises of the Kyryvyi Rih basin is given.

According to the obtained results of the study, the relevant conclusions are presented: the grinding of ferruginous quartzites depends on their material composition and is inversely proportional to the magnetite content, with an increase in the strength of the ores, energy consumption per ton of mining mass increases. The main recommendation is the issue of implementing quality control systems. After all, these systems help to adjust the division for optimal operation, and to conduct continuous monitoring of its performance indicators. Also, as a recommendation, this is the introduction of energy-saving modern technologies.

energy consumption, ferruginous quartzites, magnetite content, strength, beneficiation, granulometric composition, quality control

Одержано (Received) 20.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2025

Прийнято до друку (Approved) 20.01.2026

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.362.5:621.867.3

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).140-150](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).140-150)

Е.Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст. досл, О.А. Черній

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua*

Експериментальні дослідження спірального віброживильника для дозування поодинокого насіння соняшнику

В статті представлено результати експериментальних досліджень проектного спірального віброживильника, що використовуватиметься для дозування поодинокого насіння соняшнику в автоматизованій лінії фенотипування. Розширено наведено дані по методикам проектування та планування експериментальних досліджень чашевих віброживильників. Наведено результати аналізу та систематизації основних факторів, що впливають на процес вібропереміщення насіння соняшнику по жолобу віброживильника. Використовуючи адитивну FDM технологію, методом 3D друку виготовлено експериментальний зразок вібраційного чашевого віброживильника. Описано будову експериментальної установки по дослідженню амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) дослідного віброживильника. Для дослідження впливу маси насіння соняшнику, що міститиметься в чаші віброживильника на зміну його амплітудно-частотних характеристик, підготовлено наважки насіння масою 29 г, 58 г та 116 г. Також, з метою визначення характеру вібропереміщення насіння, сформовані партії наважок насіння з різними його розмірними групами. Результати досліджень представлені у вигляді графічних залежностей зміни вертикальної амплітуди, віброшвидкості та віброприскорення чаші проектного спірального віброживильника, залежно від колової частоти вимушених коливань створюваних дебалансним віброприводом. Відображено дослідні АЧХ залежно від маси завантаженого в чашу віброживильника насіння соняшнику. Оптимальна швидкість транспортування, при дозуванні насіння соняшнику, отримана при значеннях вимушених колових частот ω в діапазоні 150-170 с⁻¹, при значеннях вертикальних амплітуд коливання чаші A 0,35-0,6 мм. Такі вібропараметри отримуються при напрузі живлення вібродвигуна 3,3 В. При всіх варіантах завантаження чаші віброживильника, рух насіння характеризувався, як безвідливний від поверхні жолоба. Факторним експериментом встановлені рівняння регресії другого порядку, що вказують на залежність параметрів оптимізації: вертикальної амплітуди коливань A , мм чаші віброживильника, вертикальної віброшвидкості V , мм/с та віброприскорення a , м/с² від таких незалежних факторів: маси завантаженого в чашу насіння m , г та напруги живлення вібродвигуна U , В.

посівний насіннєвий матеріал, лінія фенотипування, насіння соняшнику, чашевий вібраційний живильник, модель віброживильника, експериментальна установка, робоча частота коливань, амплітудно-частотна характеристика віброживильника, факторний експеримент

Постановка проблеми. Підіймально-транспортувальні та дозувальні машини, які виконують свої функції завдяки коливанням робочих органів достатньо добре зарекомендували себе в різних галузях промисловості. Великого впровадження вібраційні машини досягли в аграрній та харчовій галузях промисловості.

Для розрахунку та проектування вібраційно-транспортувальних машин створено достатньо великий набір теоретичних методик. Кожна намагається врахувати сучасні досягнення наукових досліджень в сфері вібраційного транспортування та зменшити похибки аналітичних досліджень з експериментальними результатами при проектуванні вібраційних машин [1–8].

При цьому важко не згадати великий позитивний вплив використання чисельного моделювання при синтезі та проектуванні різного роду машин включно з вібраційними. Проводити моделювання з використанням комп'ютера дає можливість пакет програмного забезпечення платформи Simcenter Star-CCM+ від компанії Siemens. [9].

Аналіз досягнень в синтезі та проектуванні вібраційних чашевих живильників для транспортування та дозування насіння сільськогосподарських культур, вказує на наявність масиву факторів, які чинять суттєвий вплив на якість процесу вібротранспортування насіння даним типом віброживильників. Для їхнього аналізу створено схему їх класифікації приведену на рис. 1



Рисунок 1 – Схема факторів впливу на процес вібротранспортування насіння спіральним віброживильником

Джерело: розроблено авторами

Зважаючи на таку кількість чинників впливу на якість вібротранспортування насіння, звичайно, при створенні аналітичних залежностей та теоретичних досліджень протікання переміщення частки вантажу при вібрації робочого органу приймають ряд нехтувань або припущень [3]. Це значно спрощує трудомісткість теоретичних досліджень без суттєвого впливу на їх точність.

Але, все ж таки, якою б методикою не користувалися при синтезі та проектуванні спіральних вібраційних живильників насіння, виникає необхідність проведення експериментальних досліджень для перевірки робоздатності конструкції та відповідності експериментальних показників якості до теоретичних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Організація та методика експериментальних досліджень роботи чашевих віброживильників суттєво впливають на достовірність отриманих результатів, що зумовлює значну увагу до цього питання в наукових публікаціях.

У роботі [7] наведено методику та результати експериментальних і чисельних досліджень чашевого віброживильника з електромагнітним приводом. Основними дослідними параметрами були вертикальна та горизонтальна амплітуди коливань чаші, а також кут вібрації. Чисельне моделювання виконано в середовищі MSC ADAMS, а експериментальні дані отримано з використанням вібросенсорів Brüel & Kjaer. Порівняння результатів показало розбіжність між моделлю та експериментом у межах 1,12–9,3%, що підтверджує адекватність застосованої методики.

Дослідження [10] присвячене синтезу чашевого віброживильника для транспортування та автоматичного сортування деталей типу «болт» і «гайка». Виконано розрахунок конструкції, модальний аналіз у ANSYS Workbench та симуляцію процесу транспортування в середовищі Algorux Momentum. Експериментальні дослідження

підтвердили результати моделювання, а загальна похибка не перевищувала 5%. Встановлено оптимальний діапазон робочих частот електромагнітного приводу 50–60 Гц.

Алгоритм проектування чашевих віброживильників і методику чисельного моделювання процесу вібротранспортування розглянуто в статті [11]. За допомогою методу кінцевих елементів проведено модальний аналіз конструкції та визначено умови резонансної взаємодії власних і вимушених частот. Отримані результати підтверджено експериментально, що свідчить про можливість достовірної оцінки працездатності та продуктивності віброживильників методами чисельного моделювання.

У роботах [12–13] досліджено віброживильники з п'єзокерамічними віброприводами. Встановлено їх переваги у вигляді низького енергоспоживання, зниженого рівня шуму та мінімальних витрат на обслуговування, водночас відзначено необхідність застосування спеціалізованої керуючої електроніки.

Стаття [14] присвячена дослідженню спірального віброживильника з п'єзоелектричним приводом, у якій проаналізовано амплітудно-частотні характеристики та визначено резонансні режими роботи. Показано, що оптимальна робота віброживильника забезпечується в дорезонансному режимі, а аналітичні результати добре узгоджуються з експериментальними даними.

У роботі [15] виконано комплексне дослідження чашевого віброживильника з метою зниження шуму та покращення якості дозування. Теоретичні амплітудно-частотні характеристики, отримані методом кінцевих елементів, підтверджено експериментально. Встановлено оптимальні режими роботи віброживильника, за яких досягається найбільша плавність транспортування.

Дослідження [16] присвячене впливу додаткової маси на роботу вібраційних живильників. Показано, що використання додаткової маси як резонатора дозволяє знизити енергетичні витрати, підвищити продуктивність та покращити дозуючі характеристики, що є важливим для автоматизованих технологічних ліній.

Отже, аналіз наукових публікацій свідчить, що проектування сучасних вібраційних живильників доцільно здійснювати із застосуванням 3D-моделювання, методу кінцевих елементів та чисельної симуляції процесів вібротранспортування. Водночас експериментальні дослідження залишаються необхідним етапом для перевірки теоретичних моделей, що підтверджує високу актуальність експериментальної частини при синтезі сучасних чашевих і спіральних віброживильників.

Постановка завдання. За мету дослідження прийнято проведення планування комплексу експериментів, створення експериментальної дослідної установки та виконання експериментальних досліджень процесу вібропереміщення та дозування поодинокого насіння соняшнику дослідним зразком чашевого вібраційного живильника.

Виклад основного матеріалу. Плануємий комплекс експериментів націлено на перевірку правильності теоретичних обґрунтувань конструктивно-технологічних параметрів дослідного чашевого віброживильника, а також отримання емпіричних закономірностей впливу основних конструктивно-технологічних параметрів віброживильника на його продуктивність та якість дозування насіння соняшнику. В результаті будуть прийняті рішення по оптимізації конструктивно-технологічних параметрів віброживильника з метою отримання більш якісного проведення дозування насіння соняшнику в лініях автоматичного фенотипування.

Проектування і виготовлення експериментального зразка спірального вібраційного живильника. Аналітичні обґрунтування та проведений комплекс експериментів з використанням чисельного моделювання, що виконані раніше, надали в результаті оптимальні числові значення конструктивно-технологічних параметрів чашевого віброживильника для дозування насіння соняшнику. Використовуючи ці дані, виготовлено комплект робочих креслень деталей проєктного віброживильника та створені їх 3D моделі (рис. 2).

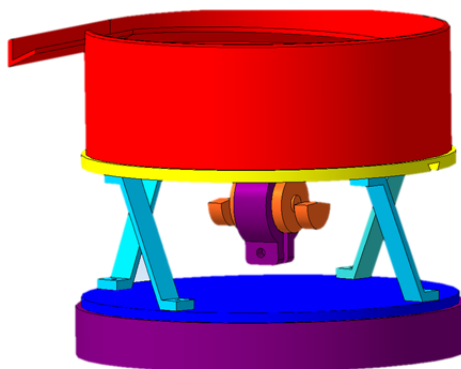


Рисунок 2 – 3D модель експериментального чашевого вібраційного живильника для дозування насіння соняшнику в лініях його автоматичного фенотипування

Джерело: розроблено авторами

Спроектовані 3D моделі деталей віброживильника спочатку оброблювались спеціальною комп'ютерною програмою Creality Print. Метою цього процесу являлось підготовка 3D моделей деталей віброживильника до друку на 3D принтері та створення G-коду моделей. Фрагмент інтерфейсу підготовки до 3D друку чаші віброживильника представлено на рис. 3. Далі, використовуючи 3D принтер Creality K1 Max та філамент ABS+, проводилось завантаження підготовлених файлів в систему 3D принтера, налаштування основних режимів друку та безпосередньо виготовлення проєктних деталей методом адитивного FDM друку.

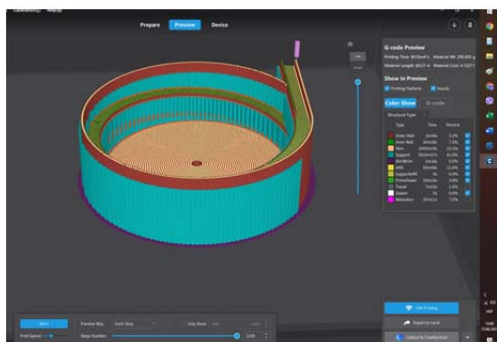
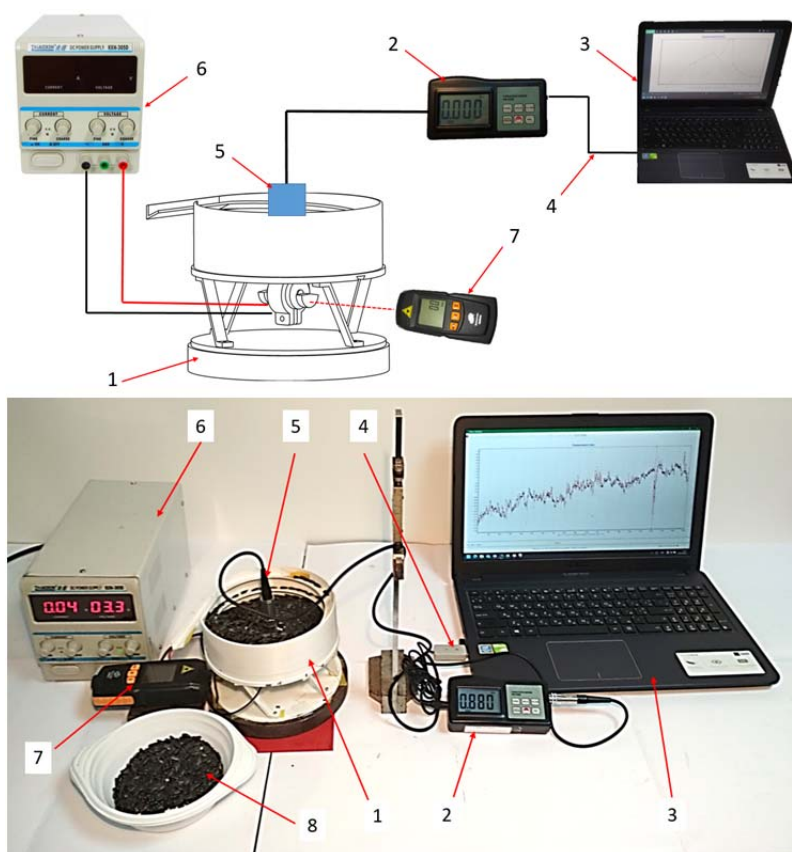


Рисунок 3 – Фрагмент інтерфейсу програми Creality Print і процес 3D друку чаші проєктного віброживильника принтером Creality K1 Max філаментом ABS+

Джерело: розроблено авторами

Створення експериментального стенду і налаштування додаткового обладнання. Комплекс експериментальних досліджень проєктного чашевого віброживильника планувався з метою встановлення його емпіричних амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), характеру руху насіння соняшнику по спіральним доріжкам та продуктивності, а саме якості дозування насіння соняшнику. Для досліджень використовувалось насіння соняшнику трьох фракцій: мілке, середнє та велике. Адже віброживильник буде працювати з різним насіннєвим матеріалом соняшника, який характеризується великою варіативністю розмірів насінин. Створений експериментальний стенд для визначення амплітудно-частотних характеристик віброживильника та визначення характеру руху насіння соняшнику показано на рис. 4.



1—дослідний спіральний віброживильник; 2—віброметр VM 6360; 3—комп'ютер з встановленим програмним забезпеченням RS232 для обробки даних; 4—USB кабель для з'єднання віброметра з ноутбуком; 5— п'єзодатчик для зняття параметрів вібрації чаші віброживильника; 6—лабораторний блок живлення RXN-305D; 7—безконтактний тахометр Benetech GM8905

Рисунок 4 – Схема і загальний вигляд експериментального стенду для дослідження АЧХ віброживильника

Джерело: розроблено авторами

Для отримання дослідних даних вібрації (віброзміщення, мм; віброшвидкість, мм/с; віброприскорення, м/с^2 ; частоти коливань, Гц) чаші віброживильника використовувався віброметр VM 6360 (точність показань – $\pm 5\%$). Для зняття параметрів вібрації чаші віброживильника в реальному часі та створення автоматичних звітів визначених параметрів, віброметр підключався через USB кабель роз'ємом RS232 з ноутбуком. Вимірювання частоти обертання валу вібродвигуна проводилось безконтактним тахометром Benetech GM890 (точність показань – $\pm 0,05\%$). Регулювання та вимірювання параметрів сили струму та напруги, яке споживає електродвигун віброживильника здійснювалось лабораторним блоком живлення RXN-305D.

В експериментальних дослідженнях використовувалось насіння соняшнику гібриду Алькантара (F1) врожаю 2025 року. Насіння мало стандартну для тривалого зберігання вологість $7,7 \pm 0,9\%$, очищене від грубих незернових включень, пошкодженого та неповноцінного насіння. Так, як до незалежних факторів, що використовуватимуться в проведенні факторних експериментів при визначенні якості роботи віброживильника, віднесені маса насіння, що завантажуватиметься в чашу віброживильника та розмір фракції насіння, то дослідне насіння соняшнику було розділене за насипною масою на наважки по 29 г, 58 г та 116 г. Такий розмір мас обумовлений аналітичними розрахунками. За розмірними фракціями насіння розділено на категорії представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики розмірних фракцій дослідного насіння соняшнику

Назва фракції	Мілка	Середня	Крупна
Середня довжина насіння L , мм	11,32	12,37	13,85
Середня ширина насіння b , мм	5,73	7,11	8,62
Середня висота насіння h , мм	3,25	4,0	5,36

Джерело: розроблено авторами

Визначення емпіричних амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) віброживильника. Створений дослідний стенд дозволив визначити фактичні залежності зміни амплітуди коливань чаші експериментального віброживильника, віброшвидкості, віброприскорення від частоти збурювальної сили дебалансного віброприводу та маси завантаженого насіння соняшнику. Отриманні залежності наведені на рис. 5–7.

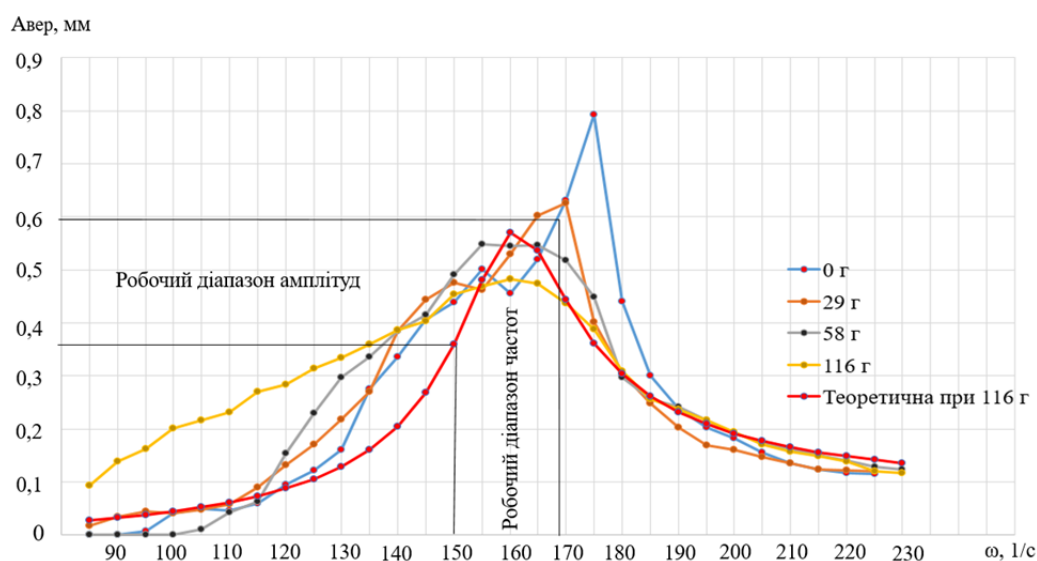


Рисунок 5 – Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) дослідного спірального віброживильника при різних масах насіння соняшнику, що міститься в чаші

Джерело: розроблено авторами

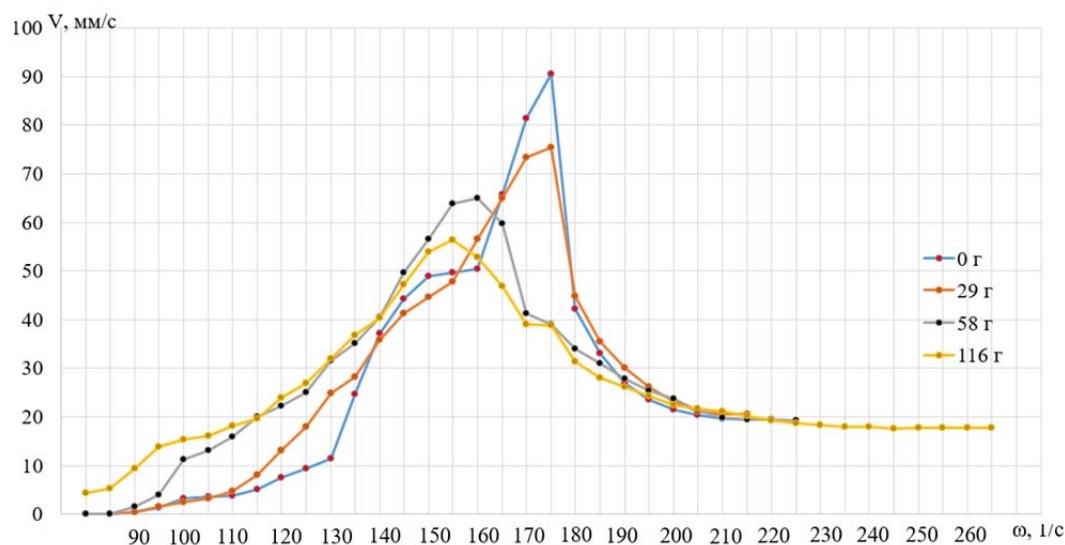


Рисунок 6 – Дослідна залежність зміни вертикальної віброшвидкості від частоти коливань дослідного спірального віброживильника при різних масах насіння соняшнику, що міститься в чаші

Джерело: розроблено авторами

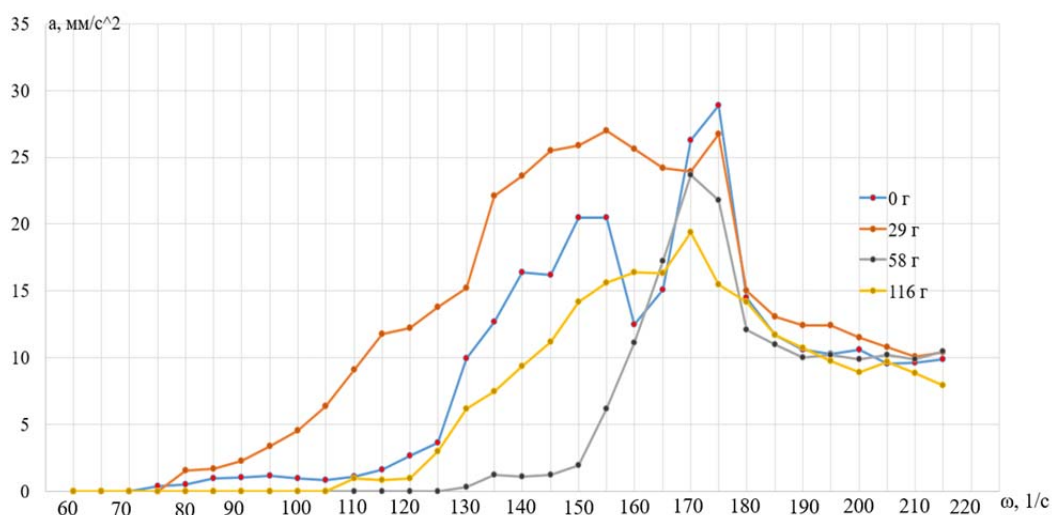


Рисунок 7 – Дослідна залежність зміни вертикального віброприскорення від частоти коливань дослідного спірального віброживильника при різних масах насіння соняшнику, що міститься в чаші
Джерело: розроблено авторами

Для дослідження зміни вертикальної амплітуди коливань чаші віброживильника від величини її завантаження при робочій коловій частоті $\omega = 153 \text{ с}^{-1}$ одержано графічну залежність показану на рис. 8.

Аналізуючи отримані графічні залежності (рис. 5–7) можна стверджувати, що чаша віброживильника має два чітко виражених значення резонансних коливань. Перший резонанс характеризується меншими значеннями вібропараметрів ніж другий резонанс, й, ймовірно, створений завдяки характеристикам пружності віброізоляторів, що встановлені між фундаментом плитою (маса m_2) та опорною поверхнею, на яку встановлено віброживильник. Другий резонанс спричинений жорсткісними характеристиками пружних елементів віброживильника. Також відмічається, що при збільшенні маси завантаженого в чашу віброживильника насіння соняшнику, резонансні частоти коливань зміщуються вліво по осі колових частот. Це відповідає теорії розрахунку вібраційних машин, адже у формулі визначення резонансної частоти вібросистеми, маса чаші з вантажем входить в знаменник. А отже, при незмінній жорсткості пружних елементів, резонансна частота зменшується при збільшенні коливальної маси чаші (маса m_1). Крім того, на АЧХ впливають демпферні властивості насіння соняшнику. Тому при максимальному завантаженні чаші віброживильника (116 г), графіки віброшвидкості та віброприскорення є більш пологішими ніж при відсутності завантаження (0 г). А пікові значення цих параметрів, також зі збільшенням навантаження чаші, зменшуються. Порівнюючи теоретичну АЧХ проєктного віброживильника при масі завантаження чаші 116 г (на рис. 5 зображена червоним кольором) та експериментальну графічну залежність амплітуди коливань чаші від колової частоти дебалансів видно, що резонанс в обох випадках виникає при значенні колової частоти $\omega_p = 160 \text{ с}^{-1}$. А найстабільніший рух насіння соняшнику по лоткам віброживильника спостерігався при значенні вертикальної амплітуди коливань чаші рівній $A = 0,44 \text{ мм}$ та значенні колової частоти $\omega = 153 \text{ с}^{-1}$.

Встановлено, що стабільна оптимальна швидкість руху насіння соняшнику по спіральній навивці віброживильника спостерігається при повному завантаженні чаші віброживильника (116 г) з вертикальною амплітудою 0,4 мм. Поступове зменшення маси завантаження до нуля призводить до збільшення вертикальної амплітуди коливань чаші до 0,6 мм (рис. 8). При цьому швидкість руху також дещо зростає. При всіх варіантах завантаження чаші віброживильника рух насіння характеризувався як безвідривний від поверхні жолоба. Це відповідає проведеним аналітичним розрахункам.

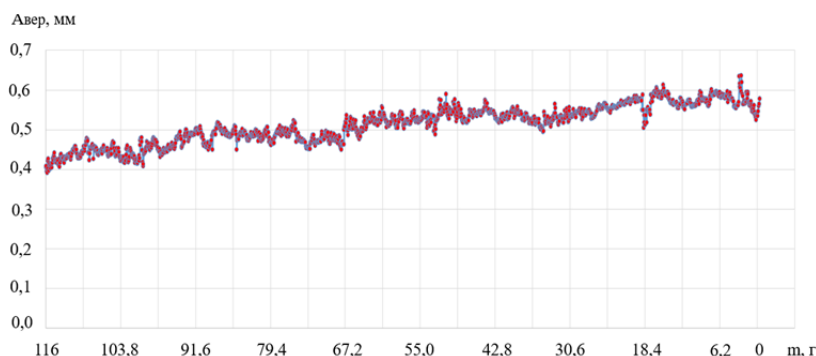


Рисунок 8 – Дослідна залежність зміни вертикальної амплітуди коливань чаші віброживильника від величини її завантаження при робочій коловій частоті $\omega=153 \text{ c}^{-1}$
Джерело: розроблено авторами

Провівши факторні експерименти та обробивши дані в математичній програмі Wolfram Cloud, знайдено регресійні рівняння другого порядку, та отримані графічні поверхні відгуку.

Прийнявши в якості параметру оптимізації вертикальну амплітуду коливань A (мм), вертикальну віброшвидкість V (мм/с), вертикальне віброприскорення a (м/с²) чаші віброживильника, а незалежними факторами масу завантаженого насіння m , г та напругу живлення вібродвигуна U , В, отримано регресійну залежність:

$$A = 3,8565 - 0,0076m - 3,4861 \cdot 10^{-6}m^2 - 2,35U + 0,0024mU + 0,4018U^2 \quad (1)$$

$$V = 261,56 - 0,62m + 0,0009m^2 - 170,58U + 0,15mU + 32,50U^2 \quad (2)$$

$$a = -704,728 + 0,34m + 0,00004m^2 + 442,511U - 0,13mU + 66,79U^2 \quad (3)$$

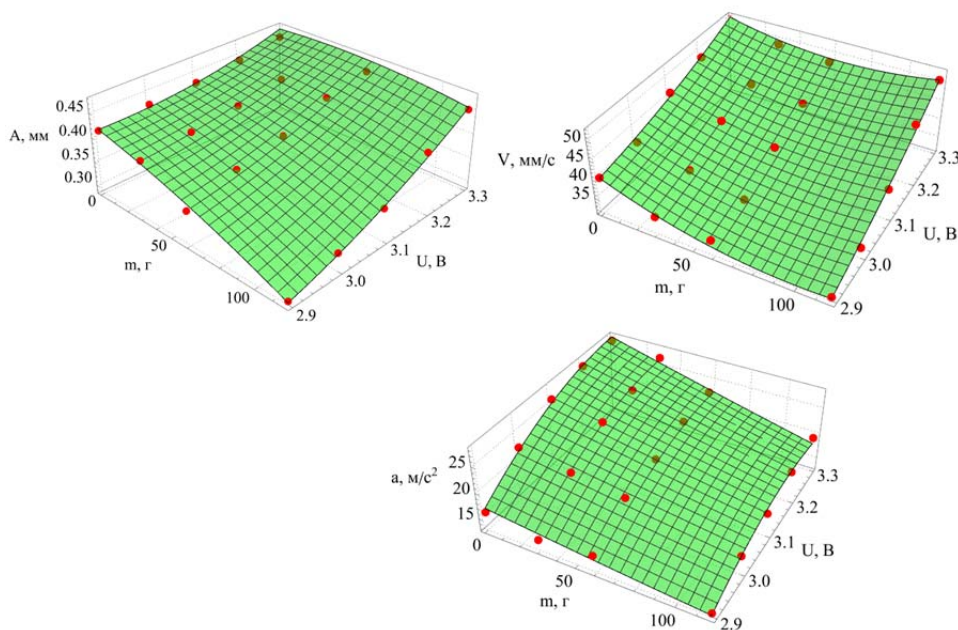


Рисунок 9 – Поверхня відгуку залежності вертикальної амплітуди A , вертикальної віброшвидкості V і вертикального віброприскорення a від маси завантаженого насіння m та напруги живлення вібратора U (червоними точками відмічені значення експериментальних даних)
Джерело: розроблено авторами

Порівняння з табличним значенням критерію Фішера ($F_{\text{табл}}$), яке для рівня значущості $q = 0,05$ та ступенів вільності $f_1 = 6$; $f_2 = 14$ становить $F_{0,05;6;14} = 2,848$, дає підстави стверджувати, що рівняння регресії (1)–(3) є статистично значущими. Отже,

обрані фактори: маса завантаженого в чашу насіння соняшнику m (г) та напруга живлення вібродвигуна U (В), мають суттєвий вплив на амплітуду коливання, віброшвидкість та віброприскорення чаші дослідного спірального віброживильника.

Висновки. За результатами аналітичних досліджень, створена 3D модель чашевого віброживильника для дозування насіння соняшнику в лініях його автоматичного фенотипування. Методом FDM друку виготовлені деталі проєктного віброживильника. В якості матеріалу виготовлення обрано філамент ABS+. Створена експериментальна установка, дозволила провести експериментальні дослідження процесу вібропереміщення насіння соняшнику по робочим поверхням чаші віброживильника.

Аналізуючи отримані графічні залежності дослідних АЧХ, можна стверджувати, що чаша віброживильника має два чітко виражених значення резонансних коливань. Перший резонанс характеризується меншими значеннями вібропараметрів ніж другий резонанс, й, ймовірно, створений завдяки характеристикам пружності віброізоляторів, що встановлені між фундаментною плитою (маса m_2) та опорною поверхнею, на яку встановлено віброживильник. Другий резонанс спричинений жорсткісними характеристиками пружних елементів віброживильника. Також відмічається, що при збільшенні маси завантаженого в чашу віброживильника насіння соняшнику, резонансні частоти коливань зміщуються вліво по осі колових частот.

Оптимальна швидкість транспортування при дозуванні насіння соняшнику отримана при значеннях вимушених колових частот ω в діапазоні $150\text{--}170\text{ с}^{-1}$, при значеннях вертикальних амплітуд коливання чаші A $0,35\text{--}0,6$ мм. Такі вібропараметри отримуються при напрузі живлення вібродвигуна $3,3$ В. При всіх варіантах завантаження чаші віброживильника рух насіння характеризувався, як безвідривний від поверхні жолоба. Це відповідає проведенню попереднім аналітичним розрахункам віброживильника й чинитиме мінімальний шкідливий вплив на якість посівного насіння.

Факторним експериментом встановлені рівняння регресії другого порядку, що вказують на залежність параметрів оптимізації: вертикальної амплітуди коливань A (мм) чаші віброживильника, вертикальної віброшвидкості V (мм/с) та віброприскорення a (м/с^2) від таких незалежних факторів: маси завантаженого в чашу насіння m , г та напруги живлення вібродвигуна U (В). Проведений дисперсійний аналіз даних дав змогу довести, що отримані рівняння регресії значущі, а отже, вплив незалежних факторів на критерії оптимізації суттєвий. Отримані просторові поверхні відгуку графічно вказують на характер закономірностей впливу незалежних факторів на обрані критерії оптимізації. Дані отримані під час експериментальних досліджень роботи проєктного віброживильника добре корелюються з даними отриманими при аналітичних дослідженнях.

Список літератури

1. Підйомно-транспортні машини: підручник/ Кобець А.С. та ін.; за ред. проф. А.С. Кобця та В.І. Дирди. Луганськ: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2013, 218с.
2. Ланець, О.С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018, 612 с.
3. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Обладнання автоматизованих виробництв. Частина 2. Автоматичні лінії. Гнучкі виробничі системи. Транспортно-завантажувальні пристрої : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Р. Д. Іскович-Лотоцький, О. Д. Манжілевський – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 155 с.
4. Vrublevskiy, I. Optimization of vibratory conveying upward by inclined track with polyharmonic normal vibrations. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, 2020, № 6(2), P. 34–42. <https://doi.org/10.23939/ujmms2020.02.034>
5. Vrublevskiy, I. Y. Increasing of elevation angles in vibratory conveyor with electromagnetic drive. Military Technical Collection, 2020, Vol. 0(22), P.48–52. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.48-52>

6. Azhar, S., & Shah, S. I. A.. Modeling and Analysis of a Vibratory Bowl Feeder. 2021 Seventh International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE), 2021, P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/icase54940.2021.9904038>
7. Van-Mui Nguyen, Anh-Tuan Hoang, Ha-Manh Nguyen, Dung-Tien Nguyen. A Method of Validating and Verifying the Digital Model of the Vibratory Bowl Feeder. International Journal of Scientific Engineering and Science. 2020. Volume 4, Issue 4, pp. 18-23. DOI: 10.5281/zenodo.3782378.
8. Han, L., & Gao, J. X.. A Study on the Modelling and Simulation of Part Motion in Vibratory Feeding. Applied Mechanics and Materials, 2010, 34–35, 2006–2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.34-35.2006>
9. Aliiev, E. Numerical simulation of agricultural production processes: textbook. Kyiv: Agrarna nauka, 2023. 340 p.]. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
10. Chougule, S. M., Murali, G., & Kurhade, A. S.. Dynamic simulation and performance evaluation of vibratory bowl feeders integrated with paddle shaft mechanisms. Advances in Science and Technology Research Journal, 2025, Vol. 19(7), P.179–196. <https://doi.org/10.12913/22998624/203873>
11. Nam, L. G., Mui, N. V., & Tu, D. A. A method to desing vibratory bowl feeder by using FEM modal analysis. Vietnam Journal of Science and Technology, 2019, Vol. 57(1), P.102. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/57/1/12859>
12. Rade, D., De Albuquerque, E., Figueira, L., & Carvalho, J. Piezoelectric Driving of Vibration Conveyors: An Experimental Assessment. Sensors, 2013. Vol. 13(7), P. 9174–9182. <https://doi.org/10.3390/s130709174>
13. Choi, S. B., & Lee, D. H.. Modal analysis and control of a bowl parts feeder activated by piezoceramic actuators. Journal of Sound and Vibration, 2004. Vol. 275(1–2), P.452–458. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.10.008>
14. Su, J., Tong, J., & Shen, Y.. Analysis of amplitude-frequency characteristics of spiral vibrating feeder system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 612(3), P. 032155. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/612/3/032155>
15. Ms. Samrudhi Ramesh Shelot , Dr. K. K Dhande , Jamadar N. I , Dr. V. Singh, 2014, Modal and Harmonic Analysis in A Stepped Vibratory Bowl Feeder, International journal of engineering research & technology (IJERT). (2014). Volume 03, Issue 07.P. 121-130. DOI : 10.17577/IJERTV3IS070126
16. Czubak, P., & Klemiato, M.. Analysis of the Transport Capabilities of an Energy-Efficient Resonant Vibratory Conveyor of Classical Construction. Energies, 2025. Vol.18(10), P. 2500. <https://doi.org/10.3390/en18102500>
17. Mathiesen, S., & Ellekilde, L.-P. Configuration and validation of dynamic simulation for design of vibratory bowl feeders. 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). 2016. P. 485–492. <https://doi.org/10.1109/icca.2016.7505324>

References

1. Kobets, A.S., Dyrda, V.I., Kozub, Yu.G. (2013), *Pidymno-transportni mashyny [Lifting and conveying machines]*, Lugansk, Ukraine. [in Ukrainian].
2. Lanets, O. S. (2018). *Osnovy rozrakhunku ta konstruivannia vibratsiinykh mashyn. Knyha 1. Teoriia ta praktyka stvorennia vibratsiinykh mashyn z harmoniynym rukhom robochoho orhana: Navchal'nyi posibnyk*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivs'koi politekhniki. [in Ukrainian].
3. Iskovich-Lototsky, R. D.(2022). *Obladnannya avtomatyzovanykh vyrobnystv. Chastyna 2. Avtomatychni liniyi. Hnuchki vyrobnychi systemy. Transportno-zavantazhuval'ni prystroyi : elektronnyy navchal'nyy posibnyk kombinovanoho (lokal'noho ta merezhnoho) vykorystannya [Elektronnyy resurs]*. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].
4. Vrublevskiy, I. (2020). Optimization of vibratory conveying upward by inclined track with polyharmonic normal vibrations. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, 6(2), 34–42. <https://doi.org/10.23939/ujmems2020.02.034> [in English].
5. Vrublevskiy, I. Y. (2020). Increasing of elevation angles in vibratory conveyor with electromagnetic drive. Military Technical Collection, 0(22), 48–52. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.48-52> [in English].
6. Azhar, S., & Shah, S. I. A. (2021). Modeling and Analysis of a Vibratory Bowl Feeder. 2021 Seventh International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE), 1–13. <https://doi.org/10.1109/icase54940.2021.9904038> [in English].
7. Van-Mui Nguyen, Anh-Tuan Hoang, Ha-Manh Nguyen, Dung-Tien Nguyen. A Method of Validating and Verifying the Digital Model of the Vibratory Bowl Feeder. International Journal of Scientific Engineering and Science. 2020. Volume 4, Issue 4, pp. 18-23. DOI: 10.5281/zenodo.3782378 [in English].
8. Han, L., & Gao, J. X. (2010). A Study on the Modelling and Simulation of Part Motion in Vibratory Feeding. Applied Mechanics and Materials, 34–35, 2006–2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.34-35.2006> [in English].

9. Aliiev, E. (2023). Numerical simulation of agricultural production processes: textbook. Kyiv: Agrarna nauka, 2023. 340 p.]. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in Ukrainian]
10. Chougule, S. M., Murali, G., & Kurhade, A. S. (2025). Dynamic simulation and performance evaluation of vibratory bowl feeders integrated with paddle shaft mechanisms. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(7), 179–196. <https://doi.org/10.12913/22998624/203873> [in English].
11. Nam, L. G., Mui, N. V., & Tu, D. A. (2019). A method to desing vibratory bowl feeder by using FEM modal analysis. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 57(1), P.102. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/57/1/12859> [in English]
12. Rade, D., De Albuquerque, E., Figueira, L., & Carvalho, J. (2013). Piezoelectric Driving of Vibration Conveyors: An Experimental Assessment. *Sensors*, 13(7), 9174–9182. <https://doi.org/10.3390/s130709174> [in English]
13. Choi, S. B., & Lee, D. H. (2004). Modal analysis and control of a bowl parts feeder activated by piezoceramic actuators. *Journal of Sound and Vibration*, 275(1–2), 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.10.008> [in English]
14. Su, J., Tong, J., & Shen, Y. (2019). Analysis of amplitude-frequency characteristics of spiral vibrating feeder system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 612(3), 032155. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/612/3/032155> [in English]
15. Ms. Samrudhi Ramesh Shelot , Dr. K. K Dhande , Jamadar N. I , Dr. V. Singh, 2014, Modal and Harmonic Analysis in A Stepped Vibratory Bowl Feeder, *International journal of engineering research & technology (IJERT)*. (2014). Volume 03, Issue 07. P. 121-130. DOI : 10.17577/IJERTV3IS070126 [in English]
16. Czubak, P., & Klemiato, M. (2025). Analysis of the Transport Capabilities of an Energy-Efficient Resonant Vibratory Conveyor of Classical Construction. *Energies*, 18(10), 2500. <https://doi.org/10.3390/en18102500> [in English]
17. Mathiesen, S., & Ellekilde, L.-P. (2016). Configuration and validation of dynamic simulation for design of vibratory bowl feeders. 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), 485–492. <https://doi.org/10.1109/icca.2016.7505324> [in English]

Elchyn Aliiev, Professor, DSc. Senior Researcher

Olexandr Chernii, recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Experimental Studies of a Spiral Vibrating Feeder for Dosing Single Sunflower Seeds

The article presents the results of experimental studies of the design spiral vibrating feeder, which will be used for dosing single sunflower seeds in an automated phenotyping line. The data on the methods of design and planning of experimental studies of cup vibrating feeders are presented in detail. The results of the analysis and systematization of the main factors affecting the process of vibration movement of sunflower seeds along the trough of the vibrating feeder are presented. Using additive FDM technology, an experimental sample of a vibrating cup vibrating feeder was manufactured by 3D printing. The structure of the experimental setup for studying the amplitude-frequency characteristics (AFC) of the experimental vibrating feeder is described. To study the influence of the mass of sunflower seeds contained in the bowl of the vibrating feeder on the change in its amplitude-frequency characteristics, seed samples weighing 29 g, 58 g and 116 g were prepared. Also, in order to determine the nature of the vibration movement of seeds, batches of seed samples with different size groups were formed. The results of the research are presented in the form of graphical dependences of the change in the vertical amplitude, vibration velocity and vibration acceleration of the bowl of the designed spiral vibrating feeder, depending on the circular frequency of forced oscillations created by the unbalanced vibration drive. The experimental frequency response is displayed depending on the mass of sunflower seeds loaded into the bowl of the vibrating feeder. The optimal transportation speed, when dosing sunflower seeds, was obtained at the values of forced circular frequencies ω in the range of 150-170 s⁻¹, at the values of vertical amplitudes of oscillations of the bowl A of 0.35-0.6 mm. Such vibration parameters are obtained at a supply voltage of the vibration motor of 3.3 V. In all variants of loading the bowl of the vibration feeder, the movement of the seeds was characterized as inseparable from the surface of the chute. A factorial experiment established second-order regression equations indicating the dependence of the optimization parameters: vertical amplitude of oscillations A, mm of the bowl of the vibration feeder, vertical vibration velocity V, mm/s and vibration acceleration a, m/s² on the following independent factors: mass of seeds loaded into the bowl m, g and supply voltage of the vibration motor U, V.

seed material, phenotyping line, sunflower seeds, cup vibratory feeder, vibratory feeder model, experimental setup, operating frequency of oscillations, amplitude-frequency characteristic of the vibratory feeder, factorial experiment

Одержано (Received) 11.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

І.М. Бажан, С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф.,
канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: igor23_81@ukr.net, leshchenkosm@kntu.kr.ua, olexa74@ukr.net*

Оцінка ефективності роботи решіт зерноочисних машин із зигзагоподібним розташуванням отворів

Робота присвячена підвищенню ефективності решітної сепарації зернового вороху шляхом застосування плоских коливальних решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю досягнення нормативних показників чистоти зерна за умов обмежених технологічних можливостей традиційного обладнання.

Розроблено математичну модель руху непрохідної частки вздовж отвору похилого решета, яка враховує сили тяжіння, тертя, нормальної реакції та опору шару зернового матеріалу. Отримано аналітичний розв'язок диференційного рівняння руху, що встановлює функціональну залежність швидкості переміщення частки від кута нахилу решета та кута відхилення отворів від поздовжньої осі. Встановлено критичну умову забезпечення стабільного транспортування зернової маси. Експериментальні дослідження виконано на лабораторному сепараторі з використанням зернового вороху озимої пшениці. Реалізовано центральний композиційний план другого порядку типу 2^3 з варіюванням питомої подачі, частоти коливань та кута відхилення осей отворів. Отримано адекватну регресійну модель із коефіцієнтом детермінації $R^2=0,94$.

За методом функції бажаності Харрінгтона встановлено раціональні параметри: питома подача 900...1000 кг/(м·год), частота коливань 450...480 кол./хв, кут відхилення отворів 9...10°. Порівняно з традиційними решетами запропонована конструкція забезпечує підвищення ефективності сепарації на 12...15%, зростання питомої продуктивності на 15...18%, зменшення забивання отворів на 20...25% та зниження питомих енергозатрат на 16...18%.

зерноочисні машини, решітна сепарація, зигзагоподібні отвори, ефективність очищення, питома продуктивність, математична модель, факторний експеримент, оптимізація параметрів

Постановка проблеми. Забезпечення продовольчої безпеки України безпосередньо пов'язане із якістю зерна, що надходить на зберігання та подальшу переробку. Після збирання врожаю зернозбиральними комбайнами зерновий ворох містить значну кількість домішок як органічного, так і мінерального походження [1]. За даними досліджень багатьох вітчизняних вчених [2, 5, 8], масовий вміст прохідних часток у післякомбайновому збіжжі становить 10-15%, а при застосуванні сучасної налагодженої збиральної техніки може бути ще меншим [1]. Наявність домішок погіршує якість врожаю, знижує схожість зерна, сприяє розвитку мікроорганізмів при зберіганні, ускладнює наступні етапи переробки та негативно впливає на товарну цінність вирощеної продукції рослинництва.

Основною операцією післязбиральної обробки врожаю є очищення зерна на машинах загального призначення. ДСТУ 3768:2019 обмежує вміст домішок до 1-2%, проте традиційні плоскі решета з паралельним розташуванням отворів мають обмежені можливості щодо досягнення таких показників, особливо при роботі з вологим матеріалом [3]. Серед різних технологій видалення домішок найпоширенішим залишається решітне очищення, яке базується на розділенні компонентів зернової суміші за розмірами частинок.

Дійсними критеріями оцінки ефективності роботи зерноочисних машин є параметри технологічної ефективності – продуктивність, яка впливає на швидкість здійснення операції, та ефект очистки (повнота розділення), що характеризує якість її виконання [2, 4]. Важливим показником ефективності роботи решітних частин зерноочисних машин є питома продуктивність на одиницю ширини або площі решітної поверхні. Збільшення питомої подачі дозволяє підвищити продуктивність машини без зростання її габаритів, маси тощо, тобто інтенсифікувати процес сепарації без додаткових капітальних витрат на обладнання.

Сучасний стан проблеми характеризується суперечністю між зростаючими вимогами до якості зерна та обмеженими можливостями традиційного обладнання. Існуючі решета демонструють недостатню інтенсивність сепарації, значну схильність до забивання отворів, особливо при очищенні вологого матеріалу, а також нераціональне використання робочої поверхні. Частина площі решета залишається незадіяною для активної сепарації, що обмежує загальну продуктивність решіт. При високочастотних режимах коливань проблема забивання отворів стає ще більш гострою, що призводить не тільки до зниження якості очищення, але й до ймовірності додаткового травмування зерна [5].

Аналіз конструкцій сучасних зерноочисних машин підтверджує, що основними проблемами, які виникають при роботі класичних решіт, є: забивання отворів довгими або плоскими домішками, що знижує ефективність сепарації та потребує частих зупинок для очищення; недостатня інтенсифікація сепарації при прямому розташуванні отворів через обмежений рух частинок переважно у вертикальному напрямку; нераціональне використання робочої поверхні решета; підвищене травмування зерна при спробах інтенсифікації процесу через високочастотні коливання.

Перспективним напрямом підвищення ефективності післязбиральної обробки є застосування решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів, які забезпечують активізацію внутрішньосферних процесів переміщення часток та інтенсифікацію процесу орієнтації прохідних часток відносно робочих отворів [6, 7]. Характерною особливістю такої конструкції є відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета на певний кут, що створює додаткові траєкторії руху часток у поперечному напрямку. За рахунок цього, частинки, які знаходяться над поздовжніми перетинками решета, отримують можливість переміщення до отворів не лише під дією вертикальних коливань, але й через направляючу дію нахилених отворів.

Однак широке впровадження у виробництво подібних конструкцій стримується недостатньою вивченістю кінематики та динаміки руху зернового матеріалу по зигзагоподібній поверхні, а також відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема руху та розділення зернового матеріалу на решітних поверхнях активно досліджується науковцями, серед яких виділяються роботи Б.І. Котова, Л.М. Тіщенко, О.І. Завгороднього, С.П. Степаненка, О.В. Богомоллова, С.О. Харченка, Е.Б. Алієва. Аналіз сучасного стану досліджень розділення матеріалів на решетах дозволяє виділити кілька основних напрямків робіт, кожен з яких дозволяє поліпшити роботу решітних частин зерноочисних машин, однак ряд питань щодо якості роботи, габаритних розмірів решітних станів, необхідної амплітуди та частоти коливань, питомого зернового навантаження, конструктивних параметрів і навіть матеріалу виготовлення решіт залишаються не вирішеними.

Значний внесок у розвиток теорії вібраційної сепарації зроблено київською та харківською науковими школами. Тіщенко Л.М. у дисертаційному дослідженні

розробив наукові основи процесів вібровідцентрового розділення зернових сумішей, показавши, що підвищення частоти і зменшення амплітуди коливань дозволяє отримати необхідну віброгустину оброблюваного матеріалу для суттєвої активізації внутрішньшарових процесів [8]. Автор встановив, що при правильно підібраних параметрах вібрації можливе досягнення режиму псевдозрідження зернової маси, що значно полегшує проходження дрібних часток крізь отвори решета.

Котов Б.І., Степаненко С.П. та Пастушенко М.Г. проаналізували тенденції розвитку конструкцій машин для очищення і сортування зерноматеріалів, наголосивши на можливості досягнення значного приросту питомої подачі без зниження якості очищення зерна [9]. Дослідники показали, що оптимізація кінематичних параметрів дозволяє підвищити продуктивність на 20-30% порівняно з серійними конструкціями.

Ольшанський В.П. розглянув рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету, встановивши основні закономірності динаміки процесу [10]. Автор розробив математичну модель, що описує траєкторії руху часток різної маси та розмірів під дією вібраційних коливань, однак модель не враховувала вплив геометрії розташування отворів на характер руху.

Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S. та Selvi K.C. дослідили процес відокремлення домішок від повноцінних насінин з використанням вібруючих решіт у потоках повітря [11]. Дослідження підтвердили, що комбінація механічної вібрації та пневматичного впливу на збіжжя може підвищити ефективність сепарації на 15-25%, що насамперед є характерним для легких домішок.

Богомолів О.В. провів аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей, виявивши основні напрямки удосконалення обладнання [12]. Автор класифікував існуючі технічні рішення та визначив перспективні шляхи розвитку.

Однак при високочастотних вібраціях створюється проблема суттєвого збільшення забивання отворів решіт, що окрім зниження якості сепарації призводить до пошкодження або травмування зерна. Завгородній О.І. у дисертаційному дослідженні розробив наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин, детально вивчивши масштабність проблеми блокування отворів частками зерноsumішей [5]. Автор встановив, що при частотах коливань понад 600 кол./хв блокування отворів може досягати 40-50% від загальної кількості, що суттєво знижує ефективність роботи решета.

Значний внесок у розвиток теорії сепарації зроблено у роботах, присвячених дослідженню нетрадиційних форм отворів решіт. Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S. та ін. встановили можливості інтенсифікації просіювання зернових сумішей крізь отвори епіциклоїдної форми, показавши суттєве збільшення швидкості проходження зернової суміші порівняно з традиційними круглими отворами [13]. Дослідження показали, що криволінійна форма отворів зменшує ймовірність заклинювання часток на краях отворів.

Kharchenko S. розробив математичну модель динаміки зернових сумішей, що базувалася на гідроаналогії [14]. Модель дозволила прогнозувати швидкість проходження часток через отвори різної форми, однак була обмежена припущенням про ідеальну текучість зернової маси.

Дискретно-елементне моделювання (DEM) стало потужним інструментом для вивчення процесів сепарації на рівні окремих часток. Chen Y.H. та Tong X. використали тривимірне DEM-моделювання для дослідження зв'язку між вібраційними параметрами та ефективністю просіювання [15], а також для моделювання ефективності просіювання з вібраційними параметрами [16]. Автори встановили

оптимальні співвідношення частоти та амплітуди коливань для різних типів зернових матеріалів.

Cleary P.W. розробив масштабні промислові DEM-моделі для прогнозування руху часток у сепараційних процесах [17] та прогнозування зв'язаних потоків часток і рідини [18]. Дослідження дозволили візуалізувати процеси взаємодії часток з решетом на мікрорівні та виявити механізми блокування отворів.

Wang G. і Tong X. досліджували проходження часток через отвори решета з використанням методу дискретних елементів [19]. Автори встановили, що ймовірність проходження частки залежить не тільки від співвідношення розмірів частки та отвору, але й від кута підходу частки до отвору.

Окремий напрямок досліджень присвячений використанню додаткових пристроїв-сегрегорів для інтенсифікації процесу сепарації. Котов Б.І., Степаненко С.П. та Калініченко Р.А. теоретично обґрунтували рух частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів [20]. Автори встановили, що використання гребінок або щіток дозволяє розпушити верхні шари зернової маси та створити умови для проходження дрібних часток до отворів.

Степаненко С.П. проаналізував взаємодію пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром [21], вивчив вплив параметрів пасивних розпушувачів на ефективність вібропневматичної сепарації зерна [22]. Дослідження показали, що оптимальна відстань між розпушувачами становить 80...120 мм, а їх висота над поверхнею решета – 15...25 мм.

Недоліком використання додаткових пристроїв є зменшення площі живого перерізу решета на 10...15%, ускладнення конструкції додатковими компонентами, збільшення неврівноваженої маси, що може призводити до розбалансування механізму приводу при певних подачах. Крім того, розпушувачі вимагають регулярного обслуговування та очищення, що підвищує експлуатаційні витрати.

Певний прогрес в очищенні зернових матеріалів на решетах досягнуто шляхом створення умов неврівноваженості або нестійкої рівноваги часток на поверхні між отворами решіт. Так, в роботі [23] розроблено конструкцію та обґрунтовано параметри відцентрового решітного сепаратора зерна. У запропонованій конструкції решето виконано у вигляді циліндра, що обертається, а зернова маса подається всередину циліндра. Відцентрова сила притискає частки до решета, при цьому дрібні частки проходять через отвори під дією сил гравітації.

Співавтори даної статті працювали і над створенням концепції «ідеального» решета зернового сепаратора [24]. В ході проведення досліджень запропоновано використання струнних решіт, у яких поздовжні перетинки виконані з натягнутих струн, що вібрують з високою частотою. Це створює умови нестабільної рівноваги для часток, які знаходяться між отворами.

Характерним недоліком цього напрямку зі створення умов неврівноваженості часток на решітних поверхнях є складність конструкції та необхідність використання прецизійних технологій виготовлення. Струнні решета вимагають високоточного натягу струн та їх періодичного підтягування у процесі експлуатації, що ускладнює обслуговування обладнання.

Окрема група досліджень присвячена вивченню блокування отворів решета як одного з найбільш критичних факторів, що обмежують ефективність сепарації. Lawinska K., Wodzinski P. та Modrzewski R. розробили метод визначення ступеня блокування отворів решета [25] та математичний опис блокування решета [26]. Було встановлено, що процес блокування є складним, значною мірою випадковим і важким для математичного опису через велику кількість факторів, що впливають на нього.

Автори виявили, що основними факторами, які впливають на інтенсивність блокування, є: форма та розміри отворів, вологість матеріалу, наявність довгих та плоских часток, частота коливань решета, товщина шару матеріалу на решеті. В ході проведення досліджень підтверджено, що при вологості матеріалу понад 18% інтенсивність блокування зростає в 2-3 рази порівняно з сухим матеріалом. Однак питання впливу геометрії розташування отворів на інтенсивність їх блокування компонентами зерноsumіші залишається недостатньо вивченим.

Досить оригінальний спосіб інтенсифікації процесу сепарації на решетах запропоновано авторським колективом під керівництвом Бакума М.В., який полягає у наданні решітному полотну поперечних коливань поряд з класичними поздовжніми [27]. При певних співвідношеннях амплітуд і частот поздовжніх та поперечних коливань відбувається активізація внутрішньшарових процесів одночасно у двох площинах, що дозволяє підвищити показники технологічної ефективності на 20-30%.

Недоліком запропонованого способу є складність приводу такого решітного стану та питання надійності роботи, особливо в складі пересувних зерноочисних машин. Для реалізації двовимірних коливань необхідно використовувати два незалежні вібратори, синхронізація роботи яких потребує складної системи управління.

Більш простий спосіб активізації внутрішньшарових процесів запропоновано колективом вчених під керівництвом Харченка С.О., у якому активізація досягається специфічними виштампівками та вирізами-канавками, які починаються у площині отворів і спрямовані у бік поздовжніх перетинок [28]. Завдяки їх наявності частки, що знаходяться над поздовжніми перетинками, потрапляють до канавок і спрямовуються до отворів.

Даний спосіб дозволяє мінімізувати зміни конструкцій решітних сепараторів і механізмів їх приводу, оскільки удосконалення стосується лише решітного полотна. Недоліками є відносна складність виготовлення решета, оскільки штампування малих за розмірами вирізів-канавок вимагає прецизійної точності обладнання, а також відсутність даних щодо надійності і довговічності таких решіт.

Попри значні досягнення у вивченні процесів сепарації, залишається низка невирішених питань. По-перше, відсутня комплексна математична модель руху зернового матеріалу по похилому решету із зигзагоподібно розташованими отворами, яка б враховувала не тільки геометрію поверхні, але й опір шару зернового матеріалу. По-друге, не встановлено аналітичні залежності між кутом відхилення отворів від поздовжньої осі решета та кінематичними параметрами руху часток. По-третє, потребує експериментального підтвердження вплив геометрії розташування отворів на ефективність сепарації в реальних виробничих умовах. По-четверте, не визначено раціональні значення конструктивних параметрів та режимів роботи решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів.

Постановка завдання. Виходячи з наведеного, метою дослідження є підвищення ефективності попереднього та первинного решітного очищення зернового вороху шляхом розробки теоретичних основ та експериментального обґрунтування параметрів плоских коливальних решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів.

Виклад основного матеріалу. Для теоретичного обґрунтування параметрів решета розглянемо зернову масу і процес її переміщення по поверхні похилого решета, що має зигзагоподібно розташовані робочі отвори згідно патенту на корисну модель № 154304 [29]. Формально вся зернова маса складається з прохідних і непрохідних часток, причому прохідних у зерновій суміші на порядок менше. Відомо [30], що в сукупності максимальний масовий вміст прохідних часток становить близько 10...15%. Це дає підстави зосередитися на аналізі руху крупних непрохідних часток, які здійснюють основний вплив на швидкість переміщення маси та створюють умови для проходження дрібних часток через отвори решета.

Решето встановлене під поздовжнім кутом α до горизонту. Прямокутні отвори розташовані зигзагоподібно, під кутом $\pm\beta$ до поздовжньої осі решета, причому в сусідніх рядах отвори мають протилежний нахил, що створює характерне зигзагоподібне розміщення рядів отворів на робочій поверхні решета. Процес переміщення часток по решету можна умовно розділити на п'ять фаз, які циклічно повторюються: надходження на поверхню, контакт з отвором, зміна напрямку руху, переміщення до наступного отвору, орієнтація відносно отвору.

Частки зернового матеріалу потрапляють на сепаруючу поверхню решета, маючи початкову швидкість U_0 , напрям якої співпадає з поздовжньою віссю решета. На частку нижнього шару, яка контактує з поверхнею решета, діють наступні сили (рис. 1):

- сила тяжіння $P = m \cdot g$, яка спрямована вертикально донизу;
- сила тертя F_{mp} , направлена проти вектора швидкості руху частки;
- сила опору шару $F_{ш}$, яку при незначних швидкостях руху приймемо пропорційною швидкості частки;
- сила нормальної реакції N , направлена перпендикулярно до решітної поверхні.

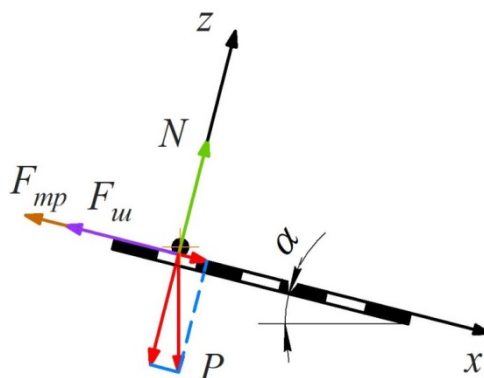


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на частку під час руху по поверхні решета

Джерело: розроблено авторами із використанням [6, 7]

Провівши ранжування діючих факторів за відомою методикою [7], на даному етапі дослідження знехтуємо силою опору повітря внаслідок її несуттєвого впливу на динаміку частки при малих швидкостях переміщення (до 0,5 м/с), а також коливаннями решета, прийнявши в якості рушія переміщення матеріалу у поздовжньому напрямку еквівалентно збільшений кут встановлення решета до горизонту α .

Диференційне рівняння руху непрохідної частки вздовж прямокутного отвору решета з урахуванням дії опору шару має вигляд:

$$m \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha - \beta) - F_{mp} - F_{ш}, \quad (1)$$

де α – кут нахилу решета до горизонталі, град; β – кут відхилення отвору до поздовжньої осі решета, град; m – маса частки, кг; v – швидкість руху частки, м/с.

Сила тертя визначається за класичною формулою:

$$F_{mp} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha - \beta), \quad (2)$$

$$F_{тр} = \mu N = \mu m g \cos(\alpha - \beta)$$

де μ – коефіцієнт тертя зерна по поверхні решета (для пшениці по сталі $\mu = 0,35 - 0,45$).

Силу опору шару зернового матеріалу при незначних швидкостях переміщення можна представити як:

$$F_{\text{ш}} = k \cdot v, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт опору шару зернового матеріалу, який чинить опір частці, що рухається вздовж отвору, кг/с. Цей коефіцієнт залежить від товщини шару, щільності укладання зерна та його фізико-механічних властивостей.

З урахуванням виразів для сили тертя та сили опору шару, диференціальне рівняння руху набуває вигляду:

$$m \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha - \beta) - \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha - \beta) - k \cdot v. \quad (4)$$

Розділимо праву частину рівняння на m та проведемо перетворення, маємо:

$$\frac{dv}{dt} = g [\sin(\alpha - \beta) - \mu \cdot \cos(\alpha - \beta)] - \frac{k}{m} \cdot v. \quad (5)$$

Враховуючи, що $\tan \varphi = \mu$, де φ – кут тертя, вираз можна записати через різницю кутів:

$$\frac{dv}{dt} = g [\sin(\alpha - \beta) - \sin \varphi \cdot \cos(\alpha - \beta) / \cos \varphi] - \frac{k}{m} \cdot v. \quad (6)$$

Позначивши $A = g [\sin(\alpha - \beta) - \mu \cdot \cos(\alpha - \beta)]$ та $B = k/m$, отримуємо стандартне лінійне диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{dv}{dt} + B \cdot v = A. \quad (7)$$

Розв'язок рівняння (7) при початковій умові $v(0) = v_0$ має вигляд:

$$v = \frac{A}{B} + \left(v_0 - \frac{A}{B} \right) e^{-Bt}. \quad (8)$$

Для отримання зв'язку швидкості з переміщенням представимо $\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$.

Підставивши це у вихідне диференціальне рівняння та розділивши змінні, після інтегрування отримаємо:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \frac{A}{B} x - 2 \frac{A}{B^2} \left(1 - e^{-Bx/v_0} \right). \quad (9)$$

При достатньо великих значеннях x експоненціальний член прямує до нуля, і залежність (9) спрощується до вигляду:

$$v^2 \approx v_0^2 + 2 \frac{A}{B} x. \quad (10)$$

Аналіз отриманих залежностей дозволяє встановити наступні закономірності процесу:

- при збільшенні кута нахилу решета α швидкість руху часток зростає за рахунок збільшення складової сили тяжіння, що діє вздовж поверхні решета. Це підвищує інтенсивність сепарації через більш активне переміщення зернової маси, однак може призводити до зменшення часу контакту часток з отворами;

- збільшення кута відхилення отворів β зменшує швидкість переміщення зернової маси. В ході досліджень встановлено, що при $\alpha = 6...8^\circ$ зростання β від 0° до 10° призводить до зменшення швидкості руху зерна по решету на $5...10\%$. Це сповільнення є позитивним фактором, оскільки збільшує час контакту часток з отворами та підвищує ймовірність проходження дрібних (прохідних) часток;

- для забезпечення стабільного переміщення зернової маси необхідно дотримуватись критичної умови: $\alpha - \beta > \varphi$, де φ – кут тертя зерна по решету. При

порушенні цієї умови частки можуть зупинятися на поверхні решета, що призводить до накопичення матеріалу та зниження ефективності сепарації;

- за умови, якщо $\alpha = 30^\circ$ і $\beta = 10^\circ$ частка зупиняється вже на відстані 13...14 мм, що обмежує застосування значних кутів відхилення отворів решета при невеликих кутах нахилу робочої поверхні решета. Це має важливе практичне значення для проектування зерноочисних машин різного призначення.

Характерною особливістю функціонування решета із зигзагоподібними отворами є забезпечення більш повного відокремлення зернового матеріалу. Частинки, які не проходять у отвори при первинному контакті, завдяки подальшому переміщенню по поверхні гарантовано потрапляють у отвори за рахунок поперечної складової руху. Це досягається завдяки нахилу отворів відносно поздовжньої осі та чергуванню отворів з лівим і правим нахилом у шаховому порядку, що створює зигзагоподібну траєкторію переміщення часток.

Розміщення отворів під нахилом створює ефект «направляючої» або «керуючої» дії на частинки зернового матеріалу, що призводить до наступних технологічних переваг:

Зменшення забивання отворів. Нахилені отвори менш схильні до забивання, оскільки частинки мають більшу ймовірність пройти крізь них, а не застрягнути на краях. Це особливо важливо для щільних отворів, де нахил може значно покращити прохідність довгих домішок типу половинок стебел, колосків тощо.

Інтенсифікація сепарації. Нахил отворів у поєднанні з коливальним рухом решета створює більш складні траєкторії руху часток, що сприяє кращому розділенню суміші. Зокрема, це покращує відділення легких домішок, які під дією повітряних потоків та коливань можуть переміщуватися через прямо розташовані отвори без проходження.

Збільшення ефективної площі просіювання. Шаховий порядок розміщення отворів з нахилом у різні сторони дозволяє більш раціонально використовувати робочу поверхню решета. Це фактично збільшує кількість активних зон просіювання на одиницю площі, що потенційно може призвести до підвищення питомої продуктивності на 15-20%.

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторному сепараторі Petkus Wutha K 294A у лабораторії кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету. Вибір даного обладнання обумовлено можливістю відтворення технологічних режимів, з якими працюють зерноочисні машини загального призначення у реальних виробничих умовах.

Лабораторний сепаратор Petkus Wutha K 294 A являє собою віброповітряний сепаратор з плоским коливальним решетом. Основні технічні характеристики: ширина робочої частини решета 200 мм, довжина 600 мм, діапазон регулювання частоти коливань 300...600 кол./хв, максимальна продуктивність до 300 кг/год. Сепаратор обладнано регульованим живильним пристроєм, що дозволяє забезпечити стабільну подачу матеріалу в широкому діапазоні, та механічним струшувачем-очисником решета для запобігання забиванню отворів.

Перед реалізацією експериментальних досліджень проведено калібрування сепаратора щодо: продуктивності подачі зернового вороху на очищення в діапазоні 100...300 кг/год з точністю $\pm 2\%$; кута нахилу решітного стану в діапазоні $3...8^\circ$ з точністю $\pm 0,5^\circ$; амплітуди коливання в діапазоні 3...8 мм з точністю $\pm 0,2$ мм; частоти коливання в діапазоні 300...600 кол./хв з точністю ± 5 кол./хв.

Для досліджень використовували зерновий ворох озимої пшениці сорту Подільська природної вологості 14...15% врожаю 2025 року, який отримано після зернозбирального комбайна класичної схеми обмолоту на полях ФГ «ЛПК». Фізико-механічні властивості матеріалу: середній розмір зернівок за довжиною 6,8 мм, за

шириною 3,4 мм, за товщиною 2,8 мм; маса 1000 зерен 42 г; натура 774 г/л; вміст основного зерна 88-90%, смітцевої домішки 6-8%, зернової домішки 4-6%.

З метою виключення забивання отворів решіт та підвищення однорідності і точності експериментів з вороху попередньо видаляли частки, які застрягали в отворах при підготовці матеріалу до експериментальних досліджень: половинки та четвиртинки зерен, окремі довгі стебла завдовжки понад 30 мм, плоскі лусочки тощо. Це дозволило скоротити загальний час на проведення експериментів та підвищити стабільність результатів. Крім того, контролювали вміст прохідної фракції в діапазоні 8...12%, що є характерним для зернових матеріалів, з якими працюють зерноочисні машини загального призначення у виробничих умовах.

Виготовлено три варіанти дослідних решіт з кутами відхилення осей отворів $\beta = 0^\circ$; $\beta = 5^\circ$ та $\beta = 10^\circ$. Решета мали наступні ідентичні геометричні параметри: довжина отворів $l = 10$ мм, ширина отворів $b = 2,2$ мм, товщина поздовжніх перетинок 2 мм, товщина поперечних перетинок 8 мм, крок розміщення отворів у поздовжньому напрямку 10 мм, крок у поперечному напрямку 12 мм. Матеріал решіт – листовая сталь товщиною 1 мм. Коефіцієнт живого перерізу для всіх варіантів решіт становив 0,28-0,30.

Для планування експерименту використано метод центрального композиційного плану другого порядку типу 2^3 , що дозволяє отримати регресійну модель з урахуванням взаємодії факторів. Після попереднього ранжування на основі аналізу літературних джерел та попередніх експериментів обрано три найбільш впливові фактори, діапазони варіювання яких встановлено на основі попередніх досліджень та представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
x_1 – питома подача q_b , кг/(м·год)	520	600	900	1200	1280
x_2 – частота коливань n , кол./хв	315	350	450	550	585
x_3 – кут відхилення осей отворів β , град	-1	0	5	10	11

Критерієм оптимізації обрано ефективність сепарації Y , яка визначалася як повнота виділення прохідної фракції:

$$Y = \frac{Q_{\text{прох}}}{Q_{\text{заг}}} \times 100\%, \quad (11)$$

де $Q_{\text{прох}}$ – маса виділеної прохідної фракції через решето, кг; $Q_{\text{заг}}$ – загальна маса прохідної фракції у вихідному матеріалі, визначена методом ситового аналізу, кг.

Методика проведення окремого дослідження включала наступні операції: підготовка навіски вихідного матеріалу масою 5 кг; встановлення необхідних параметрів роботи сепаратора згідно плану експерименту; завантаження матеріалу у бункер-живильник; проведення сепарації з фіксацією часу процесу; збирання та зважування прохідної та непрохідної фракцій з точністю до 1 г; ситовий аналіз непрохідної фракції для визначення втрат зерна; розрахунок показника ефективності сепарації.

Реалізовано 16 дослідів згідно центрального композиційного плану: 8 дослідів у вершинах куба (базовий план 2^3), 6 зіркових точок на осях ($\pm\alpha = \pm 1,682$), 2 дослідів в центрі плану для оцінки помилки експерименту. Кожен дослід повторювався тричі, результати усереднювалися для підвищення статистичної достовірності. Загальна кількість експериментальних точок склала 48.

Статистична обробка результатів проводилася з використанням програмного забезпечення STATISTICA 12 із застосуванням методів регресійного аналізу, перевірки адекватності моделі за критерієм Фішера та аналізу значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента при рівні значущості 0,05.

За результатами експериментів отримано регресійну модель другого порядку, що описує залежність ефективності сепарації від досліджуваних факторів:

$$Y = 74,2 + 4,8x_1 + 2,1x_2 + 6,3x_3 - 3,2x_1^2 - 1,8x_2^2 - 2,4x_3^2 + 0,9x_1x_2 - 0,7x_1x_3 + 0,5x_2x_3. (12)$$

Перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера показала задовільну збіжність експериментальних та розрахункових даних: $F_{\text{розр}} = 2,34 < F_{\text{табл}} = 3,29$ при рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,94$ свідчить про високу якість отриманої моделі. Перевірка за критерієм Стюдента показала статистичну значущість усіх лінійних та квадратичних членів рівняння, тоді як ефекти взаємодії виявилися менш значущими.

Аналіз впливу факторів на ефективність сепарації та графічних залежностей (рис. 2, 3, 4) дозволив встановити наступні закономірності:

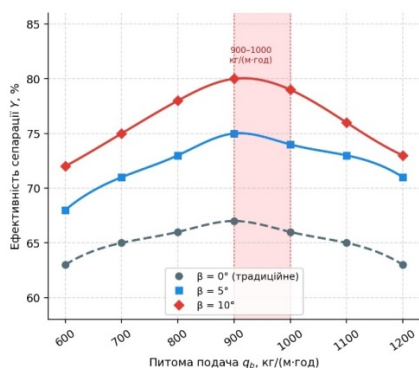


Рисунок 2 – Залежність ефективності сепарації від питомої подачі при різних кутах відхилення отворів

Джерело: розроблено авторами

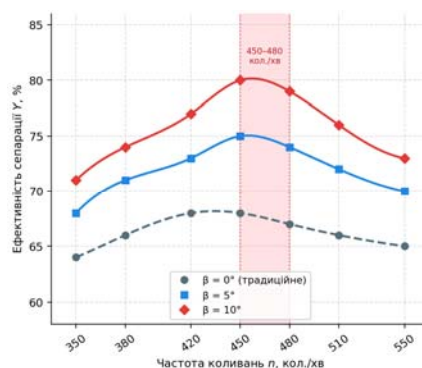


Рисунок 3 – Залежність ефективності сепарації від частоти коливань решета при різних кутах відхилення отворів

Джерело: розроблено авторами

Вплив питомої подачі (x_1). Збільшення питомої подачі від 600 до 900 кг/(м·год) призводить до зростання ефективності сепарації з 68% до 79%. Це пояснюється тим, що при малих подачах шар матеріалу на решеті є недостатньо товстим для створення необхідного тиску, що сприяє проходженню часток через отвори. При оптимальній товщині шару (15...25 мм) створюються найкращі умови для сепарації: достатній тиск верхніх шарів на нижні без надмірного ущільнення маси.

Подальше збільшення питомої подачі понад 1000 кг/(м·год) призводить до зниження ефективності до 72% через перевантаження решітної поверхні. При надмірних подачах товщина шару перевищує 35...40 мм, що призводить до ущільнення нижніх шарів, зменшення рухливості часток та збільшення часу, необхідного для проходження дрібних часток до отворів. Крім того, при великих товщинах шару зростає ймовірність проходження часток основного зерна через отвори разом з дрібними домішками, що знижує селективність процесу.

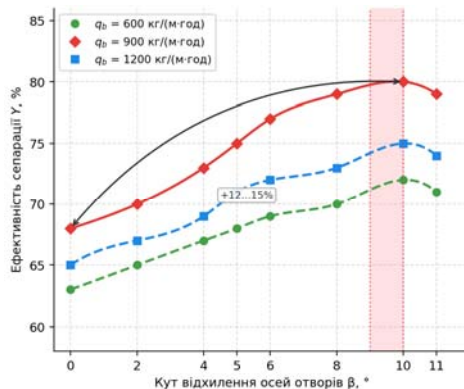


Рисунок 4 – Залежність ефективності сепарації від кута відхилення осей отворів при різних значеннях питомої подачі

Джерело: розроблено авторами

Вплив частоти коливань (x_2). Рациональна частота коливань становить 450...500 кол./хв, при якій досягається ефективність 77...80%. При цих параметрах забезпечується найкраще співвідношення між інтенсивністю розпушування зернової маси та часом контакту часток з поверхнею решета.

При менших частотах (350 кол./хв) ефективність знижується до 70% через недостатню інтенсивність розпушування матеріалу. Зернова маса рухається більш монолітним шаром з обмеженими внутрішньосферними переміщеннями, що зменшує ймовірність потрапляння дрібних часток до отворів.

При вищих частотах (550 кол./хв) ефективність також знижується до 73% через надмірну вібрацію та зменшення часу контакту часток з отворами. При високих частотах частки можуть «відскакувати» від поверхні решета, проводячи значну частину часу в підвищеному стані без контакту з отворами. Крім того, високочастотна вібрація може призводити до ущільнення матеріалу та збільшення інтенсивності забивання отворів.

Вплив кута відхилення отворів (x_3). Найбільш суттєвий вплив на ефективність сепарації має кут відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета. Збільшення β від 0° до 10° підвищує ефективність на 8...16% залежно від значень інших факторів. Цей ефект пояснюється створенням додаткових траєкторій руху часток у поперечному напрямку, що збільшує ймовірність контакту дрібних часток з отворами.

При $\beta = 0^\circ$ (традиційне решето з поздовжніми отворами) ефективність становила 64...70%. У цьому випадку переважає поздовжній рух часток, а поперечне переміщення носить випадковий характер, що обмежує можливості часток, які знаходяться над перетинками, досягти отворів.

При $\beta = 5^\circ$ ефективність зростає до 71...76%. Помірний нахил отворів створює направлену поперечну складову руху без суттєвого уповільнення загального переміщення зернової маси вздовж решета.

При $\beta = 10^\circ$ досягається максимальна ефективність 77...80%. Оптимальний кут відхилення забезпечує баланс між інтенсифікацією поперечного переміщення часток та збереженням достатньої швидкості поздовжнього руху. Зигзагоподібна траєкторія руху часток забезпечує практично 100% ймовірність контакту кожної дрібної частки з отворами на довжині решета.

Подальше збільшення кута відхилення понад 12° недоцільне, оскільки призводить до надмірного уповільнення поздовжнього руху зернової маси, що може викликати накопичення матеріалу на початку решета та зниження загальної продуктивності сепаратора.

Взаємодія між факторами виявилася статистично незначущою, що підтверджує їхній домінуючий окремий ефект. Це означає, що кожен фактор впливає на ефективність сепарації незалежно від значень інших факторів, що спрощує практичну оптимізацію параметрів.

Оптимізація параметрів за методом функції бажаності Харінгтона з використанням комплексного критерію, що враховує як ефективність сепарації (вага 0,6), так і продуктивність (вага 0,4), дозволила встановити раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів:

- питома подача $q_b = 900...1000$ кг/(м·год);
- частота коливань $n = 450...480$ кол./хв;
- кут відхилення осей отворів $\beta = 9...10^\circ$.

При цих параметрах досягається максимальна ефективність сепарації $Y = 78...80\%$ при збереженні високої продуктивності та стабільності процесу.

Порівняння експериментального решета з кутом відхилення $\beta = 10^\circ$ з традиційним решетом ($\beta = 0^\circ$) при однакових режимах роботи показало наступні переваги запропонованої конструкції:

- підвищення ефективності сепарації на 12...15% (з 68% до 78...80%);
- збільшення питомої продуктивності на 15...18% при збереженні якості очищення;
- зменшення забивання отворів на 20...25% за рахунок направляючої дії нахилених отворів;
- зниження травмування зерна на 8...10% через зменшення інтенсивності механічного впливу.

Додатково проведено оцінку енергоефективності процесу сепарації. Встановлено, що питомі енергозатрати на сепарацію 1 тони зерна на експериментальному решеті становлять 0,42...0,45 кВт·год/т проти 0,51...0,54 кВт·год/т для традиційного решета, що свідчить про зниження енергоспоживання на 16...18%.

Висновки. 1. Розроблено математичну модель руху непрохідної частки вздовж отвору похилого решета із зигзагоподібним розташуванням отворів, яка вперше враховує не лише сили тяжіння, тертя та нормальної реакції, але й силу опору шару зернового матеріалу, пропорційну швидкості руху частки. Отримано аналітичний розв'язок диференційного рівняння у вигляді залежності $v^2 = v_0^2 + 2(A/B)x$, що встановлює функціональну залежність швидкості переміщення частки від координати, кута нахилу решета α та кута відхилення отворів β від поздовжньої осі. Модель дозволяє прогнозувати кінематичні характеристики руху зернової маси та є теоретичною основою для оптимізації конструкції решітних сепараторів.

2. Встановлено, що збільшення кута нахилу решета α суттєво підвищує швидкість руху часток та інтенсивність сепарації через збільшення складової сили тяжіння, що діє вздовж поверхні, тоді як збільшення кута відхилення отворів β зменшує швидкість переміщення зернової маси, що є позитивним фактором. При $\alpha = 6...8^\circ$ збільшення β від 0° до 10° призводить до зменшення швидкості на 5...10%, що підтверджує необхідність оптимізації геометричних параметрів розташування отворів для забезпечення балансу між інтенсивністю переміщення та часом контакту часток з отворами. Визначено критичну умову забезпечення стабільного переміщення зернової маси.

3. Експериментально підтверджено гіпотезу про ефективність використання зигзагоподібного розташування отворів решета на лабораторному сепараторі Petkus Wutha K 294 A з обробкою зернового вороху озимої пшениці. Збільшення кута відхилення від 0° до 10° підвищує повноту виділення домішок на 8...16% залежно від режимів роботи обладнання. Встановлено, що найбільший вплив на ефективність сепарації мають питома подача та кут відхилення осей отворів, тоді як вплив частоти коливань є менш значущим. Отримано адекватну регресійну модель другого порядку ($R^2 = 0,94$), що описує залежність ефективності сепарації від досліджуваних факторів.

4. Встановлено раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів за методом функції бажаності Харінгтона: питома подача $q_b = 900...1000$ кг/(м·год), частота коливань $n = 450...480$ кол./хв, кут відхилення осей отворів $\beta = 9...10^\circ$. При цих параметрах досягається максимальна ефективність сепарації $Y = 78...80\%$ при збереженні високої продуктивності. Порівняння з традиційним решетом показало підвищення ефективності на 12...15%, збільшення питомої продуктивності на 15...18%, зменшення забивання отворів на 20...25% та зниження енергоспоживання на 16...18%.

Список літератури

- 1 *Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання врожаю* (за ред. Халіна С. В., Лебедева С. А.) / [Колектив авторів]; Міністерство аграрної політики та продовольства України; УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке, 2023. – 323 с. – (Серія «Сільськогосподарська техніка ХХІ: моніторинг, випробування, прогнозування»).
- 2 Алієв Е. Б., Лупко К. О. Методика симуляції процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на циліндричному чарунковому трієрі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 36-44. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-4>.
- 3 ДСТУ 3768:2019. *Пшениця. Технічні умови*. К.: УкрНДНЦ, 2019. 14 с.
- 4 Бажан І.М., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Амосов В.В. Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Вип. 54. 2024. С. 192-202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>.
- 5 Завгородній О. І. Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин: автореф. дис. на здобуття ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.05.11, Харків, 2001. 20 с.
- 6 Бажан І.М. Результати експериментального дослідження сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. І. 2025. С. 164-174. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.164-174).
- 7 Бажан І.М. Аналіз руху частки по решету з загзаговидно розташованими отворами. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія механізація та автоматизація виробничих процесів*. Вип. 4 (62), 2025. С. 8-13. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.2>.
- 8 Тіщенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Харків, 2004. 403 с.
- 9 Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2003. Вип. 33. С.53-59.
- 10 Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 2 (1). С. 17-22.
- 11 Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K.C. Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.
- 12 Богомолів О.В. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 1. С. 47-51.
- 13 Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduiev M., Miernik A., Popardowski E., Kielbasa P. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(10). 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
- 14 Kharchenko S. Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2015. Vol. 15, No. 3. P. 87-93.
- 15 Chen Y.H., Tong X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2009. Vol. 19, No. 4. P. 493-497. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60092-2).
- 16 Chen Y.H., Tong X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2010. Vol. 20, No. 4. P. 615-620. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60254-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60254-4).
- 17 Cleary P.W. Large scale industrial DEM modeling. *Eng Comput*. 2004. Vol. 21. P. 169-204. <https://doi.org/10.1108/02644400410519730>.
- 18 Cleary P.W. Prediction of coupled particle and fluid flows using DEM and SPH. *Miner Eng*. 2015. Vol. 73. P. 85-99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.005>.
- 19 Wang G., Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 451-455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>.
- 20 Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Вип. 115. С. 112–117.
- 21 Степаненко С.П. Аналіз взаємодії пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. Дослідницьке. 2005. Вип. 8(22). Кн. 2. С. 290-297.
- 22 Степаненко С. П., Котов Б. І., Попадюк І. С. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одномірного переміщення зернового потоку *Механізація та електрифікація сільського господарства: [Загальнодержавний збірник]*. 2021. Вип. №14 (113). / [ННЦ“ІМЕСГ”]. Глеваха, 2021. С. 77–87. DOI:10.37204/0131-2189-2021-14-8.
- 23 Васильковський О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.

- 24 Васильковський О. М., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Вип. 50. 2020. С. 52-58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
- 25 Lawinska K., Wodzinski P., Modrzewski R. A method for determining sieve holes blocking degree. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2015. Vol. 51, No. 1. P. 15-22.
- 26 Lawinska K., Wodzinski P., Modrzewski R. Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granul. Matter.* 2016. Vol. 18, No. 1. P. 1-10. DOI:10.1007/s10035-016-0622-4.
- 27 *Спосіб підвищення ефективності сепарації сипких матеріалів на решетах*: пат. 158059 Україна: МПК В07В 13/04 (2006.01). № u 2024 02571. М. В. Бакум, О. Б. Козій, В. Г. Маруськов, А. Д. Михайлов, М. М. Майборода, М. М. Крекот, О. В. Сіняєва; власник Держ. біотехн. ун-т.; заявл. 14.05.2024; опубл. 25.12.2024, Бюл. № 52. 4 с.
- 28 Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь / С. О. Харченко, О. І. Біловод, Ф. М. Харченко [та ін.] // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : наук. зб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – Вип. 12(43), ч. 1. – С. 265-271.* [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.265-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.265-271).
- 29 Патент на корисну модель № 154304 Україна, МПК В07В 1/00. Плоске решето / Олексієнко Д. С., Бажан І. М., Лещенко С. М., Васильковський О. М., Петренко Д. І., Мороз С. М.; заявник та власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202302258; заявл. 12.05.2023; опубл. 01.11.2023, Бюл. № 44. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1769156/>.
- 30 Кравчук, В. І. та ін. *Машини для збирання та первинної переробки сільськогосподарських культур*. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погоорілого. 2010. 280 с.

References

1. Khalin, S. V., & Lebediev, S. A. (Eds.). (2023). *Mashyny, ahrehaty ta kompleksi dlia pisliazbyralnoi obrobky i zberihannia vrozhaiu* [Machines, units and complexes for post-harvest processing and storage of crops]. UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. [in Ukrainian].
2. Aliev, E. B., & Lupko, K. O. (2023). Metodyka symulatsii protsesu separatsii nasinnievoho materialu dribnonasinnievych kultur na tsylindrychnomu charunkovomu trieri [Methodology for simulating the process of separation of seed material of small-seeded crops on a cylindrical indented cylinder]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh* [Vibrations in Engineering and Technology], (1), 36–44. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-4>. [in Ukrainian].
3. DSTU 3768:2019. (2019). *Pshenytsia. Tekhnichni umovy* [Wheat. Specifications]. UkrNDNTS. [in Ukrainian].
4. Bazhan, I. M., Vasylykivskiy, O. M., Leshchenko, S. M., & Amosov, V. V. (2024). Intensyfikatsiia protsesu separatsii zerna na ploskomu kolyvalnomu resheti iz zyzhahovydnym roztashuvanniam otvoriv [Intensification of the process of grain separation on a flat vibrating sieve with a zigzag arrangement of holes]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn* [Design, production and operation of agricultural machines], (54), 192–202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>. [in Ukrainian].
5. Zavorodnii, O. I. (2001). *Naukovi osnovy protsesiv ochyshchennia otvoriv reshit zernoochysnykh mashyn* [Scientific basis of the processes of cleaning the holes of sieves of grain cleaning machines] [Author's abstract of Doctoral dissertation, Kharkiv State Technical University of Agriculture]. [in Ukrainian].
6. Bazhan, I. M. (2025). Rezultaty eksperymentalnoho doslidzhennia separatsii zerna na ploskomu kolyvalnomu resheti iz zyzhahovydnym roztashuvanniam otvoriv [Results of experimental research on grain separation on a flat vibrating sieve with a zigzag arrangement of holes]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences], 12(43), 164–174. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.164-174). [in Ukrainian].
7. Bazhan, I. M. (2025). Analiz rukhu chastky po resheti z zyzhahovydnym roztashovanym otvoramy [Analysis of particle movement on a sieve with zigzag-arranged holes]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrrnnoho universytetu. Seriya mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv* [Herald of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes], (4), 8–13. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.2>. [in Ukrainian].
8. Tishchenko, L. M. (2004). *Naukovi osnovy protsesiv vibrovidtsentrovoho separuvannia zernovykh sumishei* [Scientific basis of the processes of vibro-centrifugal separation of grain mixtures] [Doctoral dissertation, Kharkiv State Technical University of Agriculture]. [in Ukrainian].
9. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Pastushenko, M. H. (2003). Tendentsii rozvytku konstrukttsii mashyn ta obladnannia dlia ochyshchennia i sortuvannia zerno materialiv [Trends in the development of designs of machines and equipment for cleaning and sorting grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta*

- eksploatatsiia silskohospodarskykh mashyn* [Design, production and operation of agricultural machines], (33), 53–59. [in Ukrainian].
10. Olshanskyi, V. P. (2017). Pro rukh neodnorodnoi dribnozernystoi sumishi po ploskomu vibroreshetu [On the movement of a non-homogeneous fine-grained mixture on a flat vibrating sieve]. *Inzheneriia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv* [Engineering of Processing and Food Productions], (2), 17–22. [in Ukrainian].
 11. Bracacescu, C., Gageanu, I., Popescu, S., & Selvi, K. C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*, 364–370. [in English].
 12. Bohomolov, O. V. (2017). Analiz konstrukttsii separatoriv dlia separatsii vazhkorozdilnykh zernovykh sumishei [Analysis of separator designs for separation of difficult-to-separate grain mixtures]. *Inzheneriia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv*, (1), 47–51. [in Ukrainian].
 13. Kharchenko, S., Borshch, Y., Kovalyshyn, S., Piven, M., Abduev, M., Miernik, A., Popardowski, E., & Kielbasa, P. (2021). Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. *Applied Sciences*, 11(10), 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>. [in English].
 14. Kharchenko, S. (2015). Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 15(3), 87–93. [in English].
 15. Chen, Y. H., & Tong, X. (2009). Application of the DEM to screening process: A 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 19(4), 493–497. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60092-2). [in English].
 16. Chen, Y. H., & Tong, X. (2010). Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 20(4), 615–620. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60254-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60254-4). [in English].
 17. Cleary, P. W. (2004). Large scale industrial DEM modeling. *Engineering Computations*, 21(2/3/4), 169–204. <https://doi.org/10.1108/02644400410519730>. [in English].
 18. Cleary, P. W. (2015). Prediction of coupled particle and fluid flows using DEM and SPH. *Minerals Engineering*, 73, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.005>. [in English].
 19. Wang, G., & Tong, X. (2011). Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 21(3), 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>. [in English].
 20. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Kalinichenko, R. A. (2007). Teoretychne obgruntuvannia rukhu chastynky zerna na vibropnevmoresheti pry dii rozpushuiuchykh robochykh orhaniv [Theoretical substantiation of grain particle movement on a vibro-pneumatic sieve under the action of loosening working bodies]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho ahrarynoho universytetu*, (115), 112–117. [in Ukrainian].
 21. Stepanenko, S. P. (2005). Analiz vzayemodiyi pasyvnogo rozpushuvacha iz vibrozridzhenym zernovym sharom [Analysis of the interaction of a passive loosener with a vibro-fluidized grain layer]. *Tekhniko-tehnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniki i tekhnolohiy dlya silskoho hospodarstva Ukrayiny*, 8(22), 290–297. [in Ukrainian].
 22. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Popadiuk, I. S. (2021). Doslidzhennia protsesu pnevmovibratsiinoho podilu zerna za hustynoiu pid chas odnomirnoho peremishchennia zernovoho potoku [Investigation of the process of pneumovibrational separation of grain by density during one-dimensional movement of the grain flow]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, 14(113), 77–87. DOI:10.37204/0131-2189-2021-14-8. [in Ukrainian].
 23. Vasylykivskyi, O. M. (2001). *Rozrobka konstrukttsii ta obhruntuvannia parametriv vidtsentrovoho reshitnoho separatora zerna* [Development of the design and substantiation of the parameters of the centrifugal sieve grain separator] (Unpublished doctoral dissertation summary). Kirovohrad National Technical University, Kirovohrad, Ukraine.
 24. Vasylykovskyi, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., & Nesterenko, O. V. (2020). Do stvorennia kontseptsii "idealnoho" resheta zernovoho separatora [On the creation of the concept of an "ideal" sieve of a grain separator]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta eksploatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (50), 52–58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>. [in Ukrainian].
 25. Lawinska, K., Wodzinski, P., & Modrzewski, R. (2015). A method for determining sieve holes blocking degree. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51(1), 15–22. [in English].
 26. Lawinska, K., Wodzinski, P., & Modrzewski, R. (2016). Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*, 18(1), 1–10. DOI:10.1007/s10035-016-0622-4.
 27. Bakum, M. V., Kozii, O. B., Maruskov, V. H., Mykhailov, A. D., Maiboroda, M. M., Krekot, M. M., & Siniaieva, O. V. (2024). *Sposib pidvyshchennia efektyvnosti separatsii sypanykh materialiv na reshetakh* [Method for increasing the efficiency of separation of bulk materials on sieves] (Ukrainian Patent No. 158059). State Biotechnical University. [in Ukrainian].

28. Kharchenko, S. O., Bilovod, O. I., Kharchenko, F. M., et al. (2025). Metody vyznachennia pokaznykiv nadiinosti ryflenykh perforovanykh prosiuvalnykh poverkhon [Methods for determining reliability indicators of corrugated perforated screening surfaces]. Tsentralnoukraiynskiyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 12(43/1), 265–271. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.265-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.265-271). [in Ukrainian].
29. Oleksiienko, D. S., Bazhan, I. M., Leshchenko, S. M., Vasylykovskiy, O. M., Petrenko, D. I., & Moroz, S. M. (2023). Ploske resheto [Flat sieve] (Ukrainian Patent No. 154304). Central Ukrainian National Technical University. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1769156/>. [in Ukrainian].
30. Kravchuk, V. I. ta in. (2010). Mashyny dlia zbyrannia ta pervynnoi pererobky silskohospodarskykh kultur [Machines for harvesting and primary processing of agricultural crops]. Doslidnytske: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho, 280 p. (in Ukrainian)

Ihor Bazhan, Serhii Leshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylykovsky**, Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Performance Evaluation of Grain Cleaning Machine Sieves With a Zigzag Hole Arrangement

The study aims to enhance the efficiency of preliminary and primary cleaning of grain heaps through a scientifically substantiated selection of design parameters for flat oscillating sieves with a zigzag (staggered) hole arrangement. The necessity of this work is driven by the discrepancy between the capabilities of traditional screening equipment and the requirements of the current DSTU 3768:2019 standard, which regulates the maximum impurity content in commercial grain. Furthermore, there is a lack of scientifically verified recommendations regarding the rational operational parameters of sieves with inclined holes in both domestic and foreign technical literature.

The study develops a mathematical model of the dynamics of a non-passing particle moving along an inclined rectangular sieve hole. Unlike existing approaches, the proposed model simultaneously accounts for four components: gravity, sliding friction, normal reaction of the supporting surface, and the resistance force of the grain layer, which is proportional to the instantaneous velocity of the particle. The solution to the differential equation of motion is obtained in analytical form – as a functional dependence of the squared velocity on the displacement coordinate, the sieve inclination angle α , and the hole axis deviation angle β from the longitudinal axis. A critical condition ensuring stable movement of the grain mass without stalling on the surface has been established. The experimental part of the work was conducted on a Petkus Wutha K 294A laboratory separator using a winter wheat heap (Podolianka variety) with a natural moisture content of 14–15%, obtained after direct combining. A second-order central composite design (CCD) of the 2^3 type was implemented, varying three factors: specific feed rate (600–1200 kg/(m·h)), oscillation frequency (350–550 strokes/min), and hole axis deviation angle (0–10°). The total number of experimental points was 48. Based on statistical processing in the STATISTICA 12 environment, a second-order regression model was obtained with a coefficient of determination $R^2=0.94$, its adequacy confirmed by the Fisher criterion ($F_{\text{calc}}=2.34 < F_{\text{tab}}=3.29$). Using the Harrington desirability function with a complex optimality criterion, the rational combination of design and technological parameters was determined: specific feed rate – 900–1000 kg/(m·h), oscillation frequency – 450–480 strokes/min, and hole axis deviation angle – 9–10°.

Comparative tests proved that implementing sieves with a zigzag hole arrangement at a deviation angle of $\beta = 10^\circ$ provides significant technological and energy advantages over traditional designs ($\beta = 0^\circ$): separation efficiency increases by 12–15% (from 68% to 78–80%); specific productivity rises by 15–18% without increasing the machine's overall dimensions; the orifice clogging rate (blinding intensity) is reduced by 20–25% due to the guiding effect of the inclined channels; and the specific energy consumption for separating one ton of grain is reduced by 16–18% – from 0.51–0.54 to 0.42–0.45 kWh/t. The results obtained form the theoretical foundation and practical basis for designing new and modernizing existing screening units of general-purpose grain cleaning machines.

grain cleaning machines, Sieve separation, zigzag (staggered) holes, cleaning efficiency, specific productivity, mathematical model, factorial experiment, optimization of parameters

Одержано (Received) 27.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 10.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

Б.Г. Вовнянко*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: b.vovnyanko@ukr.net, b.vovnyanko@kernel.ua*

Дослідження руху насінини в системі подачі посівної секції сошника сівалки

Досліджено фізичну природу нерівномірності розміщення насіння по глибині загортання, яка виникає внаслідок багаторазових відскоків насінин від дна борозни та хаотичного блокування ґрунтом на різних горизонтах. Розроблено конструкцію посівної секції з утримуючою п'яткою, що включає паралелограмний механізм, дисковий ніж, ущільнюючий коток, сошник з інтегрованою п'яткою та регульовальну штангу з пружинним елементом. Теоретично обґрунтовано раціональні конструкційні параметри п'ятки через аналіз балансу сил динамічного напору, тертя та прилипання ґрунту. Встановлено, що для типових ґрунтово-технологічних умов раціональне значення кута нахилу площини п'ятки до горизонту становить 15° , а кут нахилу бокових граней – 32° . В роботі доведена можливість зниження коефіцієнта варіації глибини загортання до агротехнічно допустимих значень

сошник, посівна секція, утримуюча п'ятка, глибина загортання насіння, коефіцієнт варіації, взаємодія насіння з ґрунтом, процес сівби

Постановка проблеми. Забезпечення продовольчої безпеки держави та конкурентоспроможності аграрного сектору безпосередньо залежить від ефективності технологій вирощування зернових культур. Згідно з даними Державної служби статистики України, втрати врожаю зернових через недосконалість технологічних процесів сівби щорічно становлять 8...12% від потенційно можливого рівня, що у грошовому еквіваленті складає понад 2 мільярди доларів США.

Одним із критичних факторів, що визначають врожайність зернових культур, є рівномірність розміщення насіння на заданій глибині залягання [1, 2, 3]. Багаторічні польові дослідження, проведені науковцями Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН [9, 10], підтверджують, що відхилення глибини загортання від оптимальної у межах ± 2 см призводить до зниження врожайності на 10...12% внаслідок недружніх сходів та подовження вегетаційного періоду на 5...7 днів. При більших відхиленнях ($\pm 2,5$ см) втрати врожаю досягають 25...30%, що пояснюється загибеллю частини насіння від надмірного заглиблення або пересихання верхнього шару ґрунту.

Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарського виробництва характеризуються широким впровадженням ресурсозберігаючих технологій, серед яких особливе місце займають технології прямої сівби (No-till) та мінімального обробітку ґрунту (Mini-till) [4, 7]. За даними Європейської асоціації консервативного землеробства, площі під прямою сівбою у світі зростають щорічно на 6...8%, досягнувши у 2024 році понад 180 млн гектарів. Такі технології дозволяють знизити витрати пального на 35...45%, зменшити ерозійні процеси на 60...80% та підвищити вологозабезпеченість посівів на 15...25% [1, 8, 13].

Однак за умов мінімального обробітку ґрунту або його відсутності традиційне технічне забезпечення виявляється недостатньо ефективним [6, 7]. Існуючі посівні машини, обладнані дисковими сошниками з тупим кутом входження в ґрунт (кут $\beta = 18...22^\circ$), незважаючи на свою здатність працювати на полях із значною кількістю рослинних решток (до 6...8 т/га), демонструють незадовільні показники рівномірності

загортання насіння [7, 9]. Експериментальні дослідження, проведені на дослідних полях ЦНТУ, показали, що коефіцієнт варіації глибини загортання насіння пшениці озимої при роботі серійних дискових сошників типу СЗ-3,6 становить 62...74%, що у 3...4 рази перевищує агротехнічні вимоги (не більше 20%) [5, 6, 7].

Головна причина зазначеної проблеми полягає у складному фізичному процесі багаторазового відбивання насінин від дна борозни під час сівби з подальшим блокуванням цих насінин ґрунтом на різних горизонтах. Детальний аналіз руху насінини показує, що після виходу з насіннепроводу та падіння на дно борозни насінини здійснює серію відскоків (зазвичай 3...5), висота яких залежить від пружно-фрикційних властивостей ґрунту, швидкості удару та кута падіння. Під час цих відскоків відбувається одночасне осипання стінок борозни зі швидкістю 0,08...0,15 м/с, що призводить до перерозподілу посівного матеріалу по всій глибині ходу сошника.

Для комплексного вирішення проблеми дослідники пропонують використовувати посівні секції з додатковими конструкційними елементами, зокрема – утримуючими п'ятками, призначеними для фіксації насіння на заданій глибині. Однак на сьогодні відсутнє комплексне теоретичне обґрунтування конструкційних параметрів таких п'яток, не визначені кількісні залежності між геометричними характеристиками та технологічно-режимними умовами роботи та й експериментального підтвердження ефективності їх роботи недостатньо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика забезпечення рівномірності загортання насіння є багатоаспектною і вивчалася протягом останніх кількох десятиліть. Ґрунтовно вивчали процес сівби та досліджували і вдосконалювали робочі органи для формування борозни і загортання насіння відомі вітчизняні вчені, серед яких П.М. Василенко, Л.В. Погорілий, В.В. Адамчук, В.М. Булгаков, В.І. Пастухов, П.В. Сисолін, В.М. Сало, Е.Б. Алієв, М.В. Бакум, Д.Г. Войтюк, А.І. Бойко, І.М. Бендера, А.В. Рудь та ін. Систематизація наукових публікацій дозволяє виділити кілька основні напрями досліджень.

Зокрема, Е.Б. Алієв [8] виконав ґрунтовні теоретичні дослідження переміщення насіння у пневматичних системах транспортування. Для системи JOHN DEERE 90 Series в ході досліджень обґрунтовані раціональні параметри сповільнювача: кут вильоту насіння $\alpha = 47^\circ$, висота розміщення $h_{sp} < 0,134$ м, параболічна форма робочої поверхні з фокусом у точці $F = 0,134$ м. Однак ці результати отримані для специфічних умов пневматичного транспортування при швидкості повітряного потоку 15...20 м/с і не можуть бути безпосередньо застосовані для механічних систем подачі насіння, де швидкість виходу з насіннепроводу становить лише 0,8...1,2 м/с.

Компанія AMAZONE у сівалці Condor розробила систему з подвійними дисковими сошниками та активним притискачем насіння. Особливістю конструкції є використання незалежної підвіски кожного сошника з пружинами жорсткістю 10 Н/мм та гідравлічною системою регулювання притискного зусилля. Це дозволяє адаптувати сівалку до різних типів ґрунтів без механічного переналагодження. Коефіцієнт варіації при роботі такої системи становить 24...31% залежно від умов, що є прийнятним для більшості культур, але недостатнім для систем точного землеробства [14].

Вітчизняний виробник ПАТ «ELVORTI» у посівному комплексі Otion-9,6 реалізував концепцію з металевими пружинними елементами замість гумових, що частково вирішило проблему налипання [1]. Польові випробування на чорноземах типових показали коефіцієнт варіації 32...38%, що є покращенням порівняно з традиційними сошниками, але все ще перевищує агротехнічні вимоги [4, 10]. Питома маса конструкції зазначених комплексів становить 820 кг/м ширини захвату, що потребує використання тракторів потужністю не менше 120 к.с. для їх агрегування.

Провідні світові виробники сільськогосподарської техніки активно розробляють інноваційні рішення для технологій No-till. Компанія JOHN DEERE у моделі сівалок 1890 CCS застосувала систему з еластичними гумовими пальцями для утримання насіння на дні борозни. Польові випробування цієї системи показали зниження коефіцієнта варіації з 68% до 28%. Однак ефективність системи значно залежить від вологості ґрунту, так при вологості понад 25% спостерігається налипання ґрунту на гумові елементи, що знижує якість утримання [15, 16]. Вартість однієї посівної секції з такою системою становить 1800...2200 доларів США, що обмежує широке застосування в господарствах із недостатніми фінансовими ресурсами.

С.В. Мартиненко та М.В. Личук теоретично обґрунтували та експериментально підтвердили вплив опору повітря на траєкторію руху насінини [19]. За отриманими дослідниками даними, врахування аеродинамічного опору змінює траєкторію на 15...22% залежно від форми та розмірів насінини, причому найбільший вплив спостерігається після першого відбивання від дна борозни, коли швидкість руху є максимальною. Коефіцієнт опору для насіння пшениці становить $C_d = 0,45...0,52$, для гороху $C_d = 0,38...0,44$, для сої $C_d = 0,40...0,48$.

Академіки В. Адамчук та В. Булгаков створили комплексні математичні моделі коливального руху дискових та зубчастих сошників у ґрунті [9]. Проведені дослідження показали, що амплітуда вертикальних коливань сошника може досягати 15...25 мм при швидкості руху 8...12 км/год на нерівних полях, що суттєво впливає на рівномірність глибини загортання. Для стабілізації глибини ходу необхідне застосування паралелограмних навісок з жорсткістю пружин 8...12 Н/мм.

В.І. Пастухов та М.В. Бакум дослідили динаміку руху насіння в насіннєпроводах різної конфігурації. Роботи зазначених науковців показали, що оптимальна швидкість виходу насіння з насіннєпроводу становить 0,8...1,2 м/с для забезпечення мінімальної висоти відскоку від дна борозни [12]. При швидкостях понад 1,5 м/с спостерігається зростання висоти відскоку на 35...50%, що погіршує рівномірність загортання.

Д.Г. Войтюк та А.І. Бойко розробили математичні моделі взаємодії робочих органів сівалок з ґрунтом, враховуючи його реологічні властивості, зокрема в'язко-пружну поведінку під навантаженням [2].

Отже, аналіз проведених теоретико-експериментальних досліджень і серійних конструкцій сошників та посівних секцій підтверджують, що на етапі скидання насіння в боріздку та її заробки ґрунтом має місце перерозподіл насіння в товщі ґрунту, що суттєво впливає на умови проростання рослин, і, як наслідок – на подальшу врожайність. Саме наведені явища стали передумовою до створення конструкції посівної секції, обладнаної сошником із притисочною п'яткою, що забезпечить ефективне засипання вологим ґрунтом та фіксацію його на дні борозни без хаотичного розміщення в горизонтах ґрунтового середовища.

Постановка завдання. Виходячи з наведеного, метою роботи є обґрунтування раціональної конструкції утримуючої п'ятки сошника на основі комплексу теоретичних досліджень, що дозволить забезпечити ефективну роботу посівних машин в тому числі і в умовах мінімального та нульового обробітку ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Сучасні сівалки оснащуються різноманітними типами загортаючих робочих органів, основним призначенням яких є розміщення насіння на встановленій глибині з мінімальними відхиленнями. Критерієм якісної роботи таких конструктивних елементів є показник рівномірності вертикального розподілу насінин у ґрунтовому горизонті. Цей параметр безпосередньо визначається стабільністю переміщення сошника відносно поверхні поля. Для досягнення стабільності конструктори впроваджують комплексні посівні секції, що включають

допоміжні елементи – копіювальні ролики, направляючі полози, реборди – які забезпечують фіксацію робочого органу на заданому рівні [7, 12, 13].

Проте навіть за умови рівномірного ходу сошника виникає проблема вторинного переміщення насіння. Після потрапляння на сформоване сошником дно борозни насіння продовжує рух як у поздовжньому, так і у вертикальному напрямках внаслідок удару об ґрунт [17]. У процесі осипання бокових стінок борозни насіння блокуються ґрунтовими частинками на різних висотах, що формує неприпустимо широкий діапазон глибин залягання насінин [16]. На полях господарств фіксуються випадки, коли коефіцієнт варіації розподілу насіння за глибиною залягання перевищував 70%, що суперечить чинним агротехнічним вимогам.

Для вирішення зазначеної проблеми науковці запропонували вдосконалити конструкції серійних сошників, встановлюючи в них спеціальні утримуючі елементи. Ці елементи призначені для фіксування насіння біля дна борозни протягом часу, необхідного для повного загортання насіння ґрунтом. Серед розроблених варіантів найбільшу ефективність продемонстрували сошники з утримуючою п'яткою – металевим елементом, розміщеним між бічними щокми сошника, який утримує посівний матеріал у приденному шарі товщиною близько одного сантиметра [5, 6, 19]. Незважаючи на позитивні результати польових випробувань окремих сівалок з такими сошниками, масове впровадження обмежується через недостатню надійність та відсутність науково обґрунтованих конструкційних параметрів.

Комплексний підхід до забезпечення якості сівби передбачає одночасну реалізацію двох напрямків: підтримання стабільної глибини ходу робочого органу та примусова фіксація насіння до завершення процесу його загортання ґрунтом. Це обумовлює необхідність створення інтегрованих посівних секцій, що поєднують кілька функціональних елементів.

Для досягнення поставленої мети розроблено експериментальну посівну секцію (рис. 1), яка включає наступні основні вузли: механізм паралелограма типу 7 для копіювання рельєфу, дисковий ніж 8 для перерізання рослинних решток, ущільнюючий коток 4, сошник 1 з інтегрованою утримуючою п'яткою 3, регулювальну штангу з пружинним елементом 11.

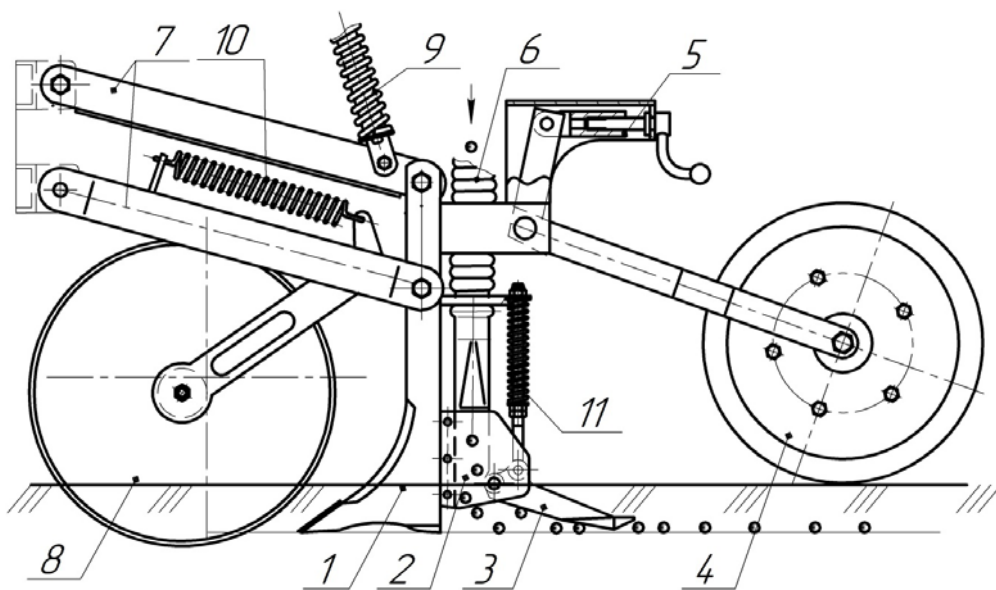


Рисунок 1 – Конструкційно-технологічна схема експериментальної посівної секції

Джерело: розроблено автором

Технологічний процес здійснюється таким чином. Під час руху агрегату дисковий ніж 8 розрізає рослинні рештки на поверхні поля. Сошник 1 формує V-подібну борозну заданої глибини та ущільнює її дно до щільності, необхідної для контакту з насінням. Насінини через насіннєспровід 6 потрапляють у міжщогоковий простір 2, де притискаються до дна та фіксуються утримуючою п'яткою 3 протягом усього періоду засипання борозни. Ущільнювальний коток 4 завершує процес загортання та формує оптимальну щільність ґрунту навколо насіння. Величину притискного зусилля п'ятки регулюють зміною ступеня стиснення пружини 11 на штанзі.

Стабільність заглиблення секції забезпечується пружинними елементами 9 та 10 у поєднанні з паралелограмним механізмом підвіски 7, який дозволяє сошнику автоматично адаптуватися до нерівностей поверхні поля.

Запропонована конструкція посівної секції створює передумови для покращення як технологічних показників сівби, так і експлуатаційної надійності всієї сівалки. Підтвердження або спростування цього припущення має бути отримане в результаті запланованого комплексу теоретичних та експериментальних досліджень.

Технологічний процес, який виконує п'ятка сошника під час роботи полягає у руйнуванні цією п'яткою стінок борозни, присипанні насіння вологим ґрунтом та ущільненню ґрунту після того як насіння присипається. Найбільш простою геометричною формою, що здатна комплексно виконати зазначені процеси є пластина, що має бути розміщеною під певним кутом до лінії горизонту. За схемою, наведеною на рис. 2, виділимо наступні технологічні параметри п'ятки сошника:

- кут нахилу п'ятки до горизонтальної площини α ;
- кут нахилу щік п'ятки до поздовжньо-вертикальної площини γ ;
- ширина захвату п'ятки (максимальна) b ;
- сумарна довжина п'ятки L .

Серед основних конструктивних параметрів п'ятки слід виділити наступні:

- ширина захвату п'ятки в її передній частині b_1 ;
- довжина горизонтальної частини п'ятки L_1 .

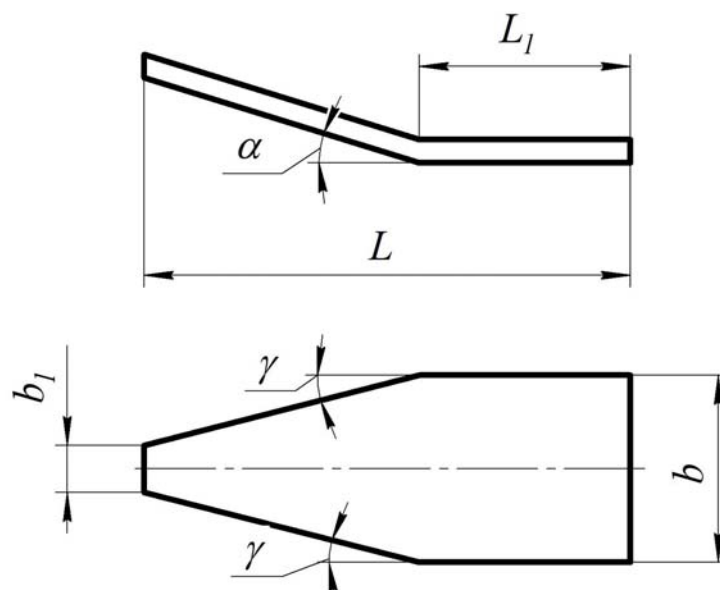


Рисунок 2 – Схема основних конструктивно-технологічних параметрів п'ятки посівної секції сошника сівалки

Джерело – розроблено автором

Кут нахилу п'ятки до горизонту у вертикальній площині є одним із важливих параметрів, оскільки саме він під час роботи цього елементу конструкції сошника впливає на можливість ущільнення ґрунту, але при цьому необхідно забезпечити умову, за якої площа п'ятки не буде залипати частками ґрунту.

З метою визначення значення кута нахилу п'ятки сошника до горизонту α слід розглянути схему сил, що діятимуть на ґрунт під час роботи (рис. 3).

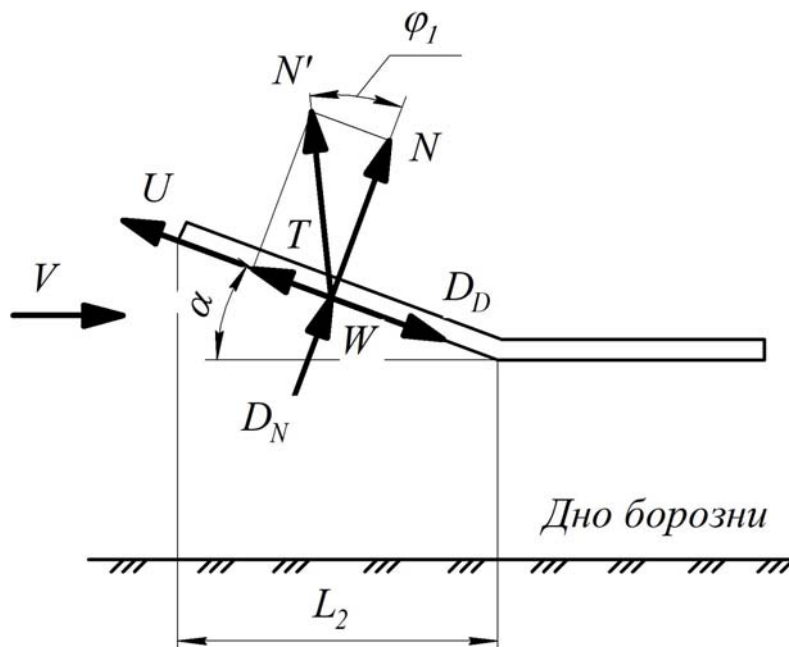


Рисунок 3 – Схема сил, що діють на ґрунт під час руху часток по площині п'ятки сошника сівалки

Джерело – розроблено автором

За наведеною схемою (рис. 3) на виділений елемент ґрунту W діятимуть такі сили:

- сила динамічного напору D ;
- сила тертя T ;
- сила прилипання U .

Зазначимо, що силу динамічного напору ґрунту D можна розкласти на дві складові – дотичну D_D і нормальну D_N до поверхні п'ятки. Далі маємо записати баланс сил, що діятиме на ґрунт під час його руху по похилій площині п'ятки, отримаємо:

$$\sum = D_D - T - U. \quad (1)$$

Як видно із наведеного балансу сил (1) безперешкодний рух ґрунту без його прилипання на площину п'ятки можливий за умови, коли дотична сила динамічного напору D_D буде більшою за сумарну силу опору, що в символічному вигляді записується так

$$D_D > (T + U). \quad (2)$$

Розглянемо далі кожну із сил окремо.

Для визначення динамічного напору скористаємося наступним відомим виразом

$$D = \rho \cdot S \cdot V^2, \quad (3)$$

із врахуванням схеми сил (рис. 3), запишемо для нормальної складової

$$D_N = D \cdot \sin \alpha = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha, \quad (4)$$

для дотичної

$$D_D = D \cdot \cos \alpha = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \cos^2 \alpha, \quad (5)$$

де ρ – щільність ґрунту, кг/м^3 ; S – площа потоку ґрунту, що набігає на похилу поверхню п'ятки сошника, м^2 ; V – швидкість руху п'ятки в товщі ґрунту, м/с .

Аналізуючи залежність (3) є очевидним, що сила динамічного напору пропорційна квадрату швидкості, тому варто розглянути як буде змінюватися швидкість руху ґрунту під час його переміщення по похилій поверхні п'ятки. Під час розгляду зміни швидкості приймемо, що ґрунт рухається вздовж площини п'ятки сошника неперервним потоком. Під час приймання такого припущення слід врахувати два вагомих фактори.

Перши фактор полягає в тому, що на етапі формування сошником борозни буде мати місце рихлення ґрунту, що супроводжуватиметься збільшенням об'єму цього ґрунту на коефіцієнт рихлення $K_p = 1,01 \dots 1,35$. Виходячи із зазначених міркувань, швидкість руху ґрунту по поверхні п'ятки сошника повинна пропорційно зростати на таку ж величину.

Другий фактор, який має бути врахованим, полягає в тому, що після контакту із п'яткою ґрунт неминуче буде ущільнюватися. Це ущільнення ґрунту пов'язане зі зменшенням перерізу в зоні його виходу з під похилої площини зазначеної п'ятки. Отже, під час переміщення сошника із п'яткою буде мати місце зниження швидкості руху часток ґрунту по п'ятці на величину K_v .

Провівши співставлення коефіцієнтів рихлення ґрунту K_p та падіння швидкості K_v стає очевидним, що повинна виконуватися умова, за якою коефіцієнт падіння швидкості K_v має бути меншим чи рівним коефіцієнту рихлення K_p . $K_v \leq K_p$. У випадку невиконання наведеної умови ступінь ущільнення ґрунту в зоні руху п'ятки сошника буде вищою за необхідну, що буде негативно впливати на подальше сходження насіння.

Керуючись в подальших обґрунтуваннях рівністю коефіцієнтів K_v і K_p припустимо, що швидкість руху ґрунту по похилій частині п'ятки сошника є постійною.

Далі в рівняння (1) підставимо значення складових сил динамічного напору D_D , тертя T та прилипання ґрунту U , що в символічному вираженні має вигляд:

$$\sum = D_D - f \cdot D_N - U = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha - P_o \cdot S_1 = 0, \quad (6)$$

де P_o – питома сила прилипання часток ґрунту, Па ; S_1 – площа прилипання ґрунту, м^2 ; f – коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні п'ятки, що враховуючи матеріал виготовлення є коефіцієнтом тертя по сталі.

Для визначення площі прилипання ґрунту S_1 скористаємося формулою:

$$S_1 = b \cdot \frac{L_2}{\cos \alpha}, \quad (7)$$

де b – конструктивна ширина захвату п'ятки сошника, м ; L_2 – довжина проекції п'ятки сошника на горизонтальну площину, м .

Якщо прийняти для плоскої задачі ширину захвату п'ятки $b = 1$ та враховуючи, що площа потоку

$$S = b \cdot L_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

отримаємо вираз балансу сил (6) в наступному вигляді:

$$\rho \cdot L_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot V^2 \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \rho \cdot L_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha - P_o \cdot \frac{L_2}{\cos \alpha} = 0. \quad (9)$$

Якщо розділити всі складові рівняння (9) на $\rho \cdot L_2 \cdot V^2$ та із врахуванням відомої

тригонометричної залежності $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$ отримаємо вираз

$$\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \frac{\sin^3 \alpha}{\cos \alpha} - \frac{P_o}{\rho \cdot V^2 \cdot \cos \alpha} = 0. \quad (10)$$

Після проведення елементарних перетворень рівняння стає наступним

$$\sin \alpha \cdot \cos \alpha - f \cdot \frac{\sin^3 \alpha}{\cos \alpha} - \frac{P_o}{\rho \cdot V^2 \cdot \cos \alpha} = 0. \quad (11)$$

Враховуючи те, що отримане рівняння є нелінійним проаналізуємо його з метою встановлення характеру залежності $\alpha = f(V)$. Спочатку розглянемо складову, яка включає коефіцієнт тертя ґрунту по сталі. Є відомим, що $f_{\max} = 0,9$ та $f_{\min} = 0,364$ [18], тобто має виконуватися нерівність $f > 1$. До того ж, кут α не може мати надто великі значення задля запобігання згортанню ґрунту. Дане припущення, з достатньою точністю дозволяє прийняти, що $\sin^3 \alpha = 0$, що може свідчити, що і один із членів рівняння 11, а саме $f \cdot \frac{\sin^3 \alpha}{\cos \alpha} = 0$. Наведені твердження дозволяють зробити висновок, що в даному випадку коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні п'ятки не має суттєвого значення.

Отже, останнє рівняння можна записати у вигляді

$$\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \frac{P_o}{\rho \cdot V^2 \cdot \cos \alpha} = 0. \quad (12)$$

Після того, як помножимо всі члени рівності на $\cos \alpha$ отримаємо

$$\sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha = \frac{P_o}{\rho \cdot V^2}. \quad (13)$$

Враховуючи те, що косинуси малих кутів наближаються до 1, можемо отримати кінцеву рівність

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{P_o}{\rho \cdot V^2} \right). \quad (14)$$

Таким чином, отримане рівняння (14) підтверджує міркування про те, що кут нахилу площини п'ятки сошника до лінії горизонту α є прямо пропорційним до питомої сили прилипання P_o та обернений пропорційним до квадрату швидкості V^2 , що фактично є прямим свідченням того, що із зростанням швидкості роботи сошника кут α повинен зменшуватися. Така залежність пов'язана із тим, що питома сила прилипання ґрунту напряду залежить від нормального тиску, а отже при високих швидкостях роботи слід забезпечити менші значення кута α для зниження нормального тиску ґрунту на похилу частину п'ятки сошника сівалки. Такий проміжний висновок підтверджує домінуюче значення швидкості при роботі посівної секції із п'яткою.

Якщо повернутися до розгляду рівняння (11), то за існуючими дослідженнями [6, 14, 17] питома сила прилипання P_0 , за умови що вологість знаходиться на рівні $W = 18 \%$, дорівнює 15 г/см^2 , що відповідає 1471 Па . Після проведення підстановки цього значення сили прилипання в наведене вище рівняння (11) та його вирішення цифровим методом, отримано значення кута α , що представлені на рис. 4 залежностями $\alpha = f(V)$. Всі проведені розрахунки виконувалися враховуючи те, що максимальне значення кута тертя ґрунту по сталі, із якої виготовляється п'ятка, складає $f = 0,9$.

Аналіз наведених графіків (рис. 4) дозволяє відмітити, що із зростанням швидкості руху кут α зменшується. Така тенденція пов'язана із тим, що за умов роботи сошника на низьких швидкостях слід долати більші зусилля для того, щоб забезпечити відрив ґрунту від поверхні п'ятки. При цьому є очевидним, що зміна щільності ґрунту в межах від $\rho_1 = 1200 \text{ кг/м}^3$ до $\rho_2 = 1400 \text{ кг/м}^3$ не має суттєвого впливу на величину кута α .

Якщо розглянути нерівність

$$\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \cos^2 \alpha - f \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha - P_0 \cdot S_1 \geq 0, \quad (15)$$

то область допустимих значень кута нахилу α знаходиться між графіком $\alpha = f(V)$ і віссю OV а тому, незалежно від типу ґрунту, під час проведення посіву в діапазоні швидкостей $V = 2,2 \dots 3,2 \text{ м/с}$ раціональне значення кута складає $\alpha \approx 15^\circ$.

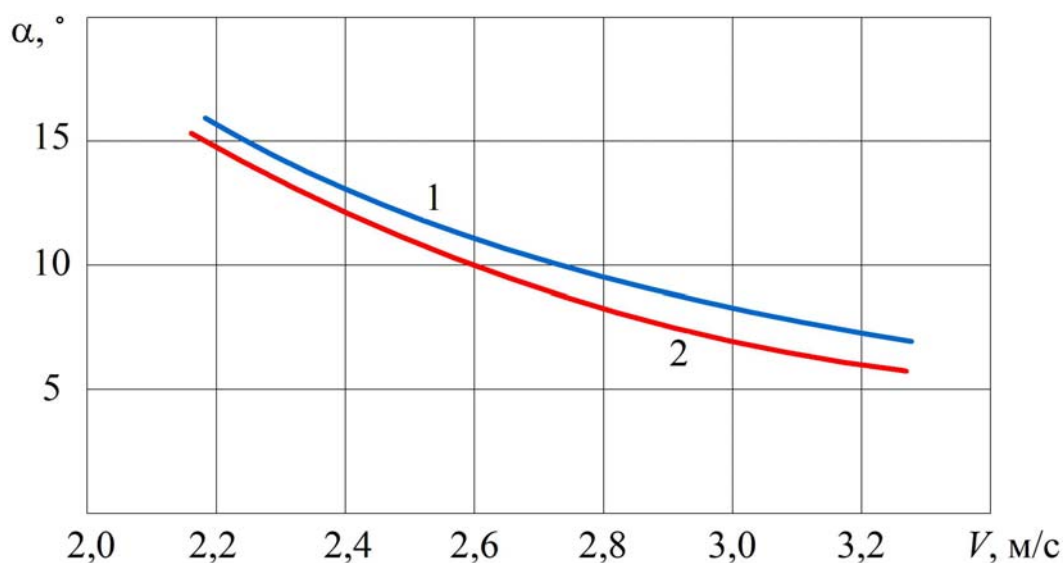


Рисунок 4 – Залежність кута нахилу п'ятки від швидкості руху:

1 – густина ґрунту $\rho_1 = 1200 \text{ кг/м}^3$ до $\rho_2 = 1400 \text{ кг/м}^3$

Джерело – розроблено із використанням [15, 19]

Параметри п'ятки у плані мають бути такими, щоб під час присипання насіння ґрунтом не відбувалося його зміщення після укладання на дно борозни. У зв'язку з цим доцільно розглянути схему на рис. 5, де наведено два конструктивні варіанти п'ятки.

У першому випадку (рис. 5, а) ширина п'ятки b_1 перевищує ширину борозни b . Така геометрія сприяє додатковому розпушуванню бокових стінок борозни. Разом з тим формування перед горизонтальною робочою частиною п'ятки призми волочіння $ABCD$ може призводити до зміщення насіння у напрямку руху E та, як наслідок, до порушення заданого інтервалу між насінинами.

Для усунення цього небажаного ефекту під час присипання насіння доцільно забезпечити розділення ґрунтового потоку на два симетричні струмені. При взаємному зіткненні такі потоки компенсують кінетичну енергію один одного, що істотно зменшує ймовірність переміщення насіння в борозні.

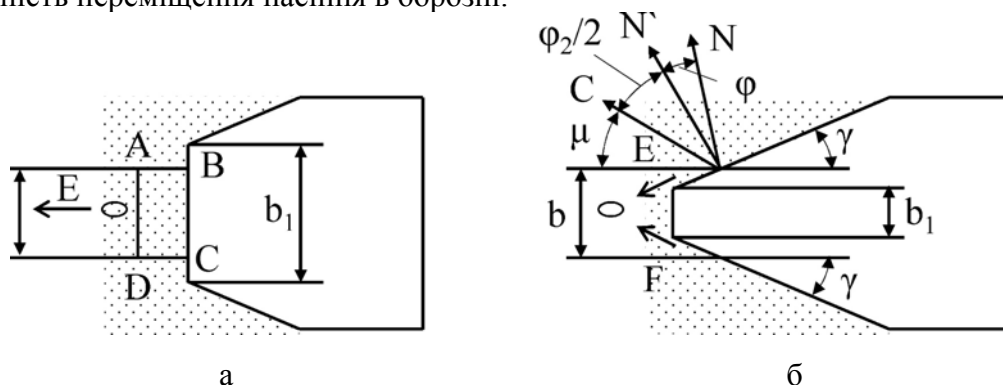


Рисунок 5 – Схема обґрунтування параметрів п'ятки сошника в плані:

а – ширина захвату більша за ширину борозни; б – ширина захвату менша за ширину борозни

Джерело – розроблено автором

Досягти цього ефекту можна за умови, що ширина b_1 передньої похилої ділянки п'ятки буде меншою за ширину борозни b (рис. 5, б). У такій конструкції бокові грані п'ятки розташовуються під кутом γ відносно осі рядка.

Із точки А проведемо нормаль N до бокової поверхні. Під час руху робочого органа в ґрунті ця нормаль відхиляється від початкового положення на величину кута тертя ґрунту по сталі φ , унаслідок чого приймає положення повної реакції N' . У точці А при цьому формуються два можливі напрямки сколювання, що розташовуються під кутом φ_2 (кут внутрішнього тертя ґрунту) до реакції N' . На схемі (рис. 5, б) для наочності наведено лише один із напрямків сколювання – лінію АС, яка утворює з напрямком поступального руху кут μ .

У такому разі можна записати суму кутів:

$$\mu + \frac{\varphi_2}{2} + \varphi + 90^\circ + \gamma = 180^\circ, \quad (16)$$

враховуючи останню залежність отримуємо вираз:

$$\mu + \frac{\varphi_2}{2} + \varphi + \gamma = 90^\circ. \quad (17)$$

Однак у наведеній залежності кут μ залишається невизначеним, тому доцільно розглянути його вплив на процес присипання.

Якщо $\mu > 0$, то напрямок сколювання АС буде направлений у глибину ґрунтового моноліту. За таких умов руйнування стінок борозни супроводжується ущільненням ґрунту, що є небажаним для якісного посіву насіння.

За умови $\mu = 0$ забезпечується руйнування стінок борозни без додаткового ущільнення, оскільки лінія сколювання проходить уздовж стінки борозни. Тоді кут нахилу бокової поверхні визначається залежністю:

$$\gamma = 90^\circ - \varphi - \frac{\varphi_2}{2}. \quad (18)$$

У цьому режимі ґрунтовий потік, сформований роботою п'ятки, розділяється на два симетричні потоки Е і F (рис. 5, б). При взаємному зіткненні вони гасять кінетичну енергію один одного, що практично виключає зміщення насіння під час присипання.

Спираючись на відомі дані [18], сформовано таблицю 1 із мінімальними та

максимальними значеннями кутів φ і φ_2 , на основі чого визначено граничні значення кута γ .

З урахуванням виконаних розрахунків рекомендованим значенням кута можна вважати $\gamma=32^\circ$.

Таблиця 1 – Можливі значення кута γ

Кут	Тип ґрунту	φ	φ_2	γ
Найбільше значення	Легкі та середньосуглинисті	35°	25°	$32^\circ 30'$
Найменше значення	Важкі суглинки та глини	42°	32°	34°

До основних конструктивних параметрів п'ятки відносять: ширину захвату її передньої частини b_1 , довжину горизонтальної частини L_1 та загальну довжину робочої поверхні.

Ширину передньої похилої частини b_1 доцільно приймати в межах $b_1 = 0,5 \cdot b$, де b – ширина борозни.

Довжина горизонтальної ділянки L_1 може задаватися довільною, оскільки ґрунт практично не проявляє залишкової пружності, а його ущільнення відбувається відразу після сходження ґрунту з похилої поверхні п'ятки.

Аналіз рівняння силового балансу дозволяє встановити, що горизонтальна проекція похилої частини п'ятки L_2 визначається дією двох основних параметрів: величиною кута γ та шириною робочої частини п'ятки b_n . При цьому значення параметра b_n слід визначати експериментально.

Висновки. 1. Доведено, що основною причиною нерівномірності розміщення насіння по глибині залягання (коефіцієнт варіації 62...74% при використанні серійних дискових сошників) є багаторазове відбивання насіння від дна борозни (3...5 відскоків висотою 8...45 мм) з одночасним осипанням стінок борозни зі швидкістю 0,08...0,15 м/с, що призводить до хаотичного засипання насіння ґрунтом на різних горизонтах та втрат врожайності зернових культур на 10...12% при відхиленні глибини загортання від заданої у межах ± 2 см.

2. Розроблено конструкцію посівної секції з утримуючою п'яткою, яка включає паралелограмний механізм для копіювання рельєфу, дисковий ніж для перерізання рослинних решток, ущільнюючий коток, сошник з утримуючою п'яткою та регульовальну штангу з пружинним елементом, що забезпечує фіксацію насіння біля дна борозни протягом часу, необхідного для повного загортання ґрунтом, та дозволяє знизити коефіцієнт варіації глибини загортання насіння до чинних агротехнічних вимог.

3. Теоретично обґрунтовано раціональні конструкційні параметри утримуючої п'ятки на основі аналізу силової взаємодії ґрунтового потоку з похилою поверхнею п'ятки. Встановлено, що кут нахилу площини п'ятки до горизонту α є прямопропорційним до питомої сили прилипання ґрунту (при вологості 20...22% $F = 1471$ Па) та обернено пропорційним до квадрату швидкості руху, внаслідок чого раціональне значення кута у діапазоні робочих швидкостей 1,5...3,0 м/с становить $\alpha = 15^\circ$, при цьому зміна щільності ґрунту від 1200 до 1600 кг/м³ не має суттєвого впливу на значення кута.

4. Обґрунтовано параметри п'ятки у плані на основі умови розділення ґрунтового потоку на два симетричні струмені, що компенсують кінетичну енергію один одного та виключають зміщення насіння під час присипання: ширина передньої

похилої частини має становити $b_1 < b$ (де b – ширина борозни), кут нахилу бокових граней визначається залежністю $\gamma = (\varphi + \varphi_2)/2$, де φ – кут тертя ґрунту по сталі ($35...42^\circ$), φ_2 – кут внутрішнього тертя ґрунту ($25...32^\circ$), що дає рекомендоване значення $\gamma = 32^\circ$, та відповідно забезпечує руйнування стінок борозни без додаткового ущільнення ґрунту.

5. Розроблена методика визначення конструкційних параметрів утримуючої п'ятки на основі аналізу балансу сил динамічного напору, тертя та прилипання ґрунту дозволяє адаптувати геометричні характеристики п'ятки до конкретних ґрунтово-технологічних умов експлуатації та забезпечує теоретичну базу для проєктування посівних секцій, здатних ефективно працювати в умовах мінімального та нульового обробітку ґрунту з рослинними рештками густотою до 6...8 т/га.

Список літератури

1. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : Навч. посіб. / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2022. 220 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307>.
2. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : Підручник / Д. Г. Войтюк, Л. В. Аніскевич, В. М. Барановський та ін. ; за ред. Д. Г. Войтюка. 2-ге вид., перероб. та допов. Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2019. 508 с.
3. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 1, ч. 2 : Машини для сівби та садіння. Харків : Око, 2002. 452 с.
4. Artemenko D., Leshchenko S., Onopa V., Majara V., Deikun V. Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2022. Vol. 24, No. 4. P. 57–71. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947>.
5. Сало В. М., Вовнянко Б. Г., Лещенко С. М., Лузан П. Г. Покращення якісних показників процесу сівби. *Сільськогосподарські машини*. 2024. Вип. 50. С. 113–119. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1398>.
6. Сало В. М., Лещенко С. М., Вовнянко Б. Г., Мороз С. М. Порівняльні показники роботи сошників двох типів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2024. Вип. 54. С. 160–167. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.160-167>.
7. Лузан О. Р. Обґрунтування параметрів загортаючих робочих органів для прямої сівби зернових культур : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2013. 184 с.
8. Алієв Е. Б., Безверхній П. С. Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2022. Вип. 52. С. 86–98. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.86-98>.
9. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Ігнат'єв Є. І. Теорія коливального руху в ґрунті дискового сошника зубчастого типу зернової сівалки прямої сівби. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва : Загальнодерж. зб.* 2022. Вип. 15 (114). С. 11–23. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-1>.
10. Заришняк А. С., Адамчук В. В., Булгаков В. М. та ін. Теорія і проєктування робочих органів сівалок для селекції та насінництва зернових культур : Монографія / [А. С. Заришняк та ін.]. Київ : Аграрна наука, 2017. 318 с.
11. Васильковська К.В. Аналіз створення рівномірного потоку насіння до борозни. *Сільськогосподарські машини*. 2025. Вип. 51. С. 24–33. DOI: [10.36910/acm.vi51.1890](https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1890).
12. Аніскевич Л. В., Росамаха Ю. О. Конструктивні особливості сошникових систем сучасних сівалок та їх відповідність вимогам точного землеробства. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 241. С. 269–278. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_241_38.
13. Шмат С.І., Лузан П.Г., Сало В.М. Оригінальні способи і засоби обробітку ґрунту та сівби сільськогосподарських культур. Харків: Мачулін, 2018. 236 с.
14. Kuş E., Yıldırım Y. Effects of seed drop height and tillage system on the emergence time and rate in the single seed planters. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*. 2020. Vol. 35, № 1. P. 69-76. DOI: [10.28955/alinterizbd.739387](https://doi.org/10.28955/alinterizbd.739387).
15. Jin G., Zhang X., Liu Y. Development and field performance evaluation of hole-fertilizing planter for precision planting of corn. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. P. 1241-1260. DOI: [10.1007/s11119-023-09988-6](https://doi.org/10.1007/s11119-023-09988-6).

16. Kubík L., Božiková M., Kažimírová V. Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>.
17. Ponjičan O., Radomirović D., Kešelj K. et al. Physical and mechanical properties of precessed pea, bean, spinach and radish seeds. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2018. Vol. 22, no. 4. P. 196–201. DOI: <https://doi.org/10.5937/jpea1804196P>.
18. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Практикум : навч. посібник / М. В. Бакум, В. І. Пастухов, О. М. Горбатовський, Ю. О. Манчинський. Харків, 2011. 193 с.
19. Вовнянко Б.Г. Теоретичне дослідження параметрів загортаючої п'ятки сошника. Вібрації в техніці та технологіях. 2025. № 4 (119). С. 131–140. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-4-16>.

References

1. Salo, V., Leshchenko, S., Luzan, P., & Salo, L. (2022). *Mashyny dlia sivby, sadinnia ta dohliadu za posivamy* [Machines for sowing, planting and crop care: Study guide]. Lysenko V. F. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307> [in Ukrainian].
2. Voitiuk, D. H., Aniskevych, L. V., Baranovskyi, V. M. et al. (2019). *Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku* [Agricultural machines. Fundamentals of theory and calculation] (D. H. Voitiuk, Ed.; 2nd ed.). Naukovo-metodychnyi tsentr VFPO [in Ukrainian].
3. Zaika, P. M. (2002). *Teoriia silskohospodarskykh mashyn: Vol. 1, Pt. 2. Mashyny dlia sivby ta sadinnia* [Theory of agricultural machines: Vol. 1, Part 2. Machines for sowing and planting]. *Oko*. [in Ukrainian].
4. Artemenko, D., Leshchenko, S., Onopa, V., Majara, V., & Deikun, V. (2022). Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(4), 57–71. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947>.
5. Salo, V. M., Vovnianko, B. H., Leshchenko, S. M., & Luzan, P. H. (2024). Pokrashchennia yakisnykh pokaznykiv protsesu sivby [Improvement of quality indicators of the sowing process]. *Silskohospodarski mashyny [Agricultural Machines]*, (50), 113–119. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1398> [in Ukrainian].
6. Salo, V. M., Leshchenko, S. M., Vovnianko, B. H., & Moroz, S. M. (2024). Porivnyalni pokaznyky roboty soshnykiv dvokh typiv [Comparative performance indicators of two types of openers]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn [Design, Production and Operation of Agricultural Machines]*, (54), 160–167. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.160-167> [in Ukrainian].
7. Luzan, O. R. (2013). *Obhruntuvannia parametriv zahortaiuchykh robochykh orhaniv dlia priamoi sivby zernovykh kultur* [Substantiation of parameters of covering working parts for direct sowing of grain crops] (Doctoral dissertation, Central Ukrainian National Technical University) [in Ukrainian].
8. Aliiev, E. B., & Bezverkhniy, P. Ye. (2022). Chyselne modelyuvannya spovilnyuvacha nasinnia pnevmatichnoi sivalky tochnoho vysivu [Numerical simulation of the seed decelerator of a pneumatic precision seeder]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn [Design, Production and Operation of Agricultural Machines]*, (52), 86–98. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.86-98> [in Ukrainian].
9. Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Holovach, I. V., & Ihnatiev, Ye. I. (2022). *Teoriia kolyvalnoho rukhu v hrunti diskovoho soshnyka zubchastoho typu zernovoi sivalky priamoi sivby* [Theory of oscillatory motion in soil of a notched disc opener of a direct seeding grain drill]. *Mekhanika ta avtomatyka ahropromyslovoho vyrobnytstva [Mechanics and Automation of Agricultural Production]*, (15), 11–23. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-1> [in Ukrainian].
10. Zaryshniak, A. S., Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Holovach, I. V., Kaletnik, H. M., & Horobei, V. P. (2017). *Teoriia i proektuvannia robochykh orhaniv sivalok dlia selektsii ta nasinnytstva zernovykh kultur* [Theory and design of seeder working parts for selection and seed production of grain crops]. *Ahrarna nauka* [in Ukrainian].
11. Vasylykovska, K. V. (2025). Analysis of the formation of a uniform seed flow to the furrow. *Agricultural Machines*, 51, 24–33. <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1890> [in Ukrainian].
12. Aniskevych, L. V., & Rosamakha, Yu. O. (2016). Design features of coulter systems of modern seed drills and their compliance with precision farming requirements. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy of the Agro-Industrial Complex*, 241, 269–278. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnu_tech_2016_241_38 [in Ukrainian].
13. Shmat, S. I., Luzan, P. H., & Salo, V. M. (2018). *Original methods and means of tillage and crop sowing*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
14. Kuş, E., & Yıldırım, Y. (2020). Effects of seed drop height and tillage system on emergence time and rate in single seed planters. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*, 35(1), 69–76. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.739387>.

15. Jin, G., Zhang, X., Liu, Y., & Chen, L. (2023). Development and field performance evaluation of hole-fertilizing planter and dynamic alignment control system for precision planting of corn. *Precision Agriculture*, 24, 1241–1260. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09988-6>.
16. Kubík L., Božiková M., Kažimírová V. Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>.
17. Ponjičan, O., Radomirović, D., Kešelj, K., Visković, J., Sedlar, A., & Bikić, S. (2018). Physical and mechanical properties of processed pea, bean, spinach and radish seeds. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 22(4), 196–201. <https://doi.org/10.5937/jpea1804196P>.
18. Bakum, M. V., Pastukhov, V. I., Horbatovskyi, O. M., & Manchinskyi, Yu. O. (2011). *Mekhaniko-tehnologichni vlastyvoli silskohospodarskykh materialiv. Praktikum* [Mechanical and technological properties of agricultural materials. Workshop]. Kharkiv [in Ukrainian].
19. Vovnianko, B. H. (2025). Teoretychne doslidzhennia parametriv zahortaiuchoi piatky soshnyka [Theoretical study of the parameters of the coulter covering heel]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh* [Vibrations in Engineering and Technology], (4), 131–140. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-4-16> [in Ukrainian].

Bohdan Vovnianko

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Investigation of Seed Movement Within the Delivery System of a Planter Sowing Unit Opener

The aim of the work is to develop a scientifically grounded methodology for determining the rational design parameters of the retaining heel of a sowing unit furrow opener, based on a comprehensive theoretical study of the physical and mechanical processes of seed-soil interaction and the force interaction between the soil flow and the working surfaces of the heel. The study is aimed at addressing the issue of non-uniform seed placement depth, which leads to a 10–12% reduction in grain crop yields when deviations from the target seeding depth occur. The relevance of the work is driven by the need to ensure the effective operation of sowing machines under minimum and zero tillage conditions, where traditional disc openers demonstrate critically unsatisfactory sowing quality indicators that exceed permissible agrotechnical requirements severalfold.

The study analyzes the physical nature of non-uniform seed placement, which involves multiple seed bounces from the furrow bottom (3–5 rebounds at a height of 8–45 mm) with simultaneous soil sloughing from the furrow walls at a velocity of 0.08–0.15 m/s, leading to chaotic seed entrapment by the soil at various horizons. A sowing unit design with a retaining heel has been developed, incorporating a parallelogram linkage, a coulter (disk cutter), a packing roller, an opener with an integrated heel, and an adjustment rod with a spring element. The rational design parameters of the heel were theoretically justified through an analysis of the balance of dynamic pressure, friction, and soil adhesion forces during soil movement along the inclined surface of the heel. It was established that the inclination angle of the heel plane to the horizon is directly proportional to the specific soil adhesion force and inversely proportional to the square of the sowing unit's operating speed. For typical soil-technological conditions (moisture content 20–22%, specific adhesion force $F = 1471$ Pa, speed 1.5–3.0 m/s), a rational angle value of $\alpha = 15^\circ$ was determined. The heel parameters in the horizontal plane were justified based on the condition of bifurcating the soil flow into two symmetrical streams, and it was confirmed that variations in soil density within the range of 1200–1600 kg/m³ do not significantly influence the optimal heel inclination angle.

The developed methodology for determining the design parameters of the retaining heel allows for adapting the geometric characteristics of the working tool to specific soil and technological operating conditions. It provides a theoretical framework for designing sowing units capable of operating effectively under minimum and zero tillage conditions with crop residue densities of up to 6–8 t/ha. The proposed sowing unit design ensures seed fixation at the furrow bottom for the duration required for complete soil coverage, reducing the coefficient of variation of seeding depth to agrotechnically permissible levels (not exceeding 20%). The theoretical relationships established between the heel design and the operating parameters of the sowing unit form the basis for further experimental research and the industrial implementation of the results. These findings can be applied to the modernization of existing seeding machinery and the development of new designs for resource-saving grain production technologies.

opener, sowing unit, retaining heel, seed placement depth, coefficient of variation, seed-soil interaction, sowing process

Одержано (Received) 20.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 06.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

В.З. Гудь, доц., д-р техн. наук, **А.Д. Довбуш**, **А.О. Брикса**, **А.Г. Никитюк**,
В.М. Бучинський

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

e-mail: vic_g@ukr.net

Розроблення гвинтових робочих органів змішувачів

У статті проведено структурно-схемний синтез гвинтових робочих органів змішувальних агрегатів. Шляхом експертного аналізу факторів, що детермінують ефективність гомогенізації, ідентифіковано ключові морфологічні ознаки та встановлено системні взаємозв'язки між ними. На основі результатів системного аналізу розроблено морфологічну матрицю конструктивних параметрів, яка стала теоретичним базисом для побудови структурно-функціональної моделі механічної системи «гвинтовий робочий орган змішувача». Визначено, що функціональні можливості гвинтових робочих органів змішувачів визначаються їх компоновальною схемою. Зокрема одиничне використання реалізує суміщення процесів переміщення та змішування матеріалу, а групове, за умови застосування декількох гвинтових робочих органів змішувачів із протилежним або різнонаправленим вектором руху в межах одного технічного пристрою, забезпечує інтенсифікацію виключно змішувальної функції. В ході реалізації структурно-схемного синтезу було виокремлено такі домінуючі морфологічні ознаки конструктивних елементів гвинтових робочих органів змішувачів: конструкція гвинта; жорсткість гвинта; комбінація гвинта; за кількістю спіралей; крок гвинта; діаметр гвинта; профіль спіралі; тип гвинта; спосіб кріплення елементів. Застосований підхід дозволив згенерувати низку високоефективних конструктивних рішень, спрямованих на інтенсифікацію процесу змішування. До них належать робочі органи з додатковими елементами, лопатеві з регульованими та нерегульованими отворами просипання, пружно-еластичні та безвальний. Наукова новизна та практична значущість розробок підтверджена 9 патентами України на корисну модель та 2 заявками на отримання охоронних документів.

синтез, морфологічний аналіз, структурно-схемний, гвинтовий робочий орган змішувача, шнек

Постановка проблеми. Гвинтові робочі органи мають широке застосування в агропромисловому комплексі, будівельній та харчовій галузях як автономні одиниці або компоненти конвеєрних ліній. Їх функціональне призначення охоплює транспортування сипких, в'язких і штучних вантажів, а також інтенсифікацію процесів гомогенізації середовищ. При експлуатації гвинтових робочих органів змішувачів (ГРОЗ) реалізується як поєднання транспортних та технологічних операцій (одночасне переміщення та змішування), так і виключно змішування компонентів. Проектування високоефективних конструкцій ГРОЗ, що відповідають критеріям високої однорідності суміші, значної продуктивності та економічної доцільності, потребує системного підходу. Обґрунтованим є генерування раціональних варіантів конструкцій з їх наступною теоретичною та експериментальною верифікацією для визначення оптимальних параметрів практичного впровадження. Методологічною основою для розробки альтернативних технічних рішень обрано морфологічний аналіз у поєднанні зі структурно-схемним синтезом. Даний підхід дозволяє систематизувати процес генерації значної кількості конструктивних варіацій, що забезпечує повноту пошуку оптимальної конфігурації ГРОЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням проектування та аналізу гвинтових змішувачів присвячено значний масив наукових праць. Дослідження у цій галузі розвиваються за двома основними напрямками: розробка методологій синтезу нових конструктивних рішень [3, 5, 13, 17, 20, 23–30] та комплексне вивчення

теоретичних і прикладних аспектів їх функціонування [3, 5, 13, 17, 20, 23–30]. Зокрема, вагомий внесок у створення методик структурного синтезу та їх практичну реалізацію для проектування гвинтових механізмів зробили І Гевко [1, 4, 6, 8–13], О. Ляшук [10, 11], В. Васильків [1] та інші дослідники. Питання функціональної ефективності, аналітичного розрахунку та оптимізації конструктивних параметрів детально висвітлені у працях Б. Гевка [15], М. Пилипця [15, 16, 18], І. Гевка [16–30], О. Ляшука [24–30], О. Гурика [2, 7], Д. Дмитріва [14, 21, 22] та. Попри значний обсяг існуючих напрацювань, специфіка вимог до змішувальних процесів у різних галузях економіки (аграрний сектор, фармація, будівництво, харчова промисловість) обумовлює необхідність подальшої диференціації технічних рішень. Висока варіативність технологічних умов зумовлює актуальність розробки та дослідження інноваційних конструкцій гвинтових робочих органів змішувачів, адаптованих до конкретних виробничих завдань.

Метою роботи є розроблення конструкцій пружно-еластичних, лопатевих та з додатковими елементами гвинтових робочих органів змішувачів шляхом проведення структурно-схемного синтезу з використанням морфологічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Гвинтові робочі органи змішувачів (ГРОЗ), робочі поверхні яких виготовлені з пружно-еластичних матеріалів або оснащені додатковими конструктивними елементами, знаходять застосування як для транспортування сипких і кускових вантажів, так і для гомогенізації в'язких та сипких середовищ [8, 10, 17, 20]. Функціональні можливості ГРОЗ визначаються їх компоувальною схемою. Зокрема одиничне використання, при інтеграції окремого робочого органу в конструкцію спеціалізованих машин реалізується суміщення процесів переміщення та змішування матеріалу, та групове використання: за умови застосування декількох ГРОЗ із протилежним або різнонаправленим вектором руху в межах одного технічного пристрою забезпечується інтенсифікація виключно змішувальної функції.

Розробка нових конструкцій ГРОЗ базується на застосуванні вдосконаленого методу структурно-схемного синтезу з використанням апарату морфологічного аналізу. Запропонований підхід передбачає залучення експертного оцінювання та ієрархічну диференціацію ознак конструктивних елементів за ступенем їхнього впливу на технологічний процес [6, 8–12]. Для інтенсифікації процесу генерації альтернатив та оптимізації їхньої чисельності було застосовано відповідний метод синтезу [13].

На основі експертного аналізу факторів, що визначають ефективність змішування, ідентифіковано ключові морфологічні ознаки та встановлено детерміновані взаємозв'язки між ними. Результатом системного аналізу стала побудова морфологічної матриці конструктивних параметрів ГРОЗ (табл. 1), що послужила базисом для розробки структурно-функціональної моделі механічної системи «Гвинтовий робочий орган змішувача» (рис. 1). В ході реалізації структурно-схемного синтезу було виокремлено такі домінуючі морфологічні ознаки конструктивних елементів гвинтових робочих органів змішувачів: конструкція гвинта; жорсткість гвинта; комбінація гвинта; за кількістю спіралей; крок гвинта; діаметр гвинта; профіль спіралі; тип гвинта; спосіб кріплення елементів.

На рис. 2 зображені конструкції синтезованих пружно-еластичних ГРОЗ, які запатентовано [31–34]. Визначальними ознаками конструкцій, зображених на рис. 2.а та рис. 2.б, які їх відрізняють з цілого масиву ГРОЗ, є ознаки 7.9 «пружно-еластична» - профіль спіралі та 8.11 «із пружно-еластичною щіткою розміщеною на периферії спіралі» - тип гвинта. Також додатковою ознакою для конструкції зображеної на рис. 2.а є ознака 8.2 «з розташованими в круглих отворах, що відтворюють гвинтову лінію, пружно-еластичних елементів», а для конструкції зображеної на рис. 2.б є ознака 8.9. «шнекова спіраль з розташованими у подвійній основі пружно-еластичних елементів».

Таблиця 1 - Ознаки конструктивних елементів ГРОЗ

1. Конструкція гвинта	2. Жорсткість гвинта	3. Комбінація гвинта	4. За кількістю спіралей	5. Крок гвинта	6. Діаметр гвинта	7. Профіль спіралі
1.1. Суцільна 1.2. Секційна 1.3. З валом 1.4. Безвальна 1.5. З планками розташованими у спіралі на певній відстані від центра гвинта 1.6. Циліндрична 1.7. Конічна 1.8. Лівостороння 1.9. Правостороння	2.1. Жорсткий 2.2. Гнучкий 2.3. Комбінований	3.1. Однотиповий 3.2. Багатотиповий	4.1. Однозахідний 4.2. Двозахідний 4.3. Багатозахідний	5.1. З одним кроком 5.2. З різним кроком	6.1. Одного діаметру 6.2. Різного діаметру	7.1. Суцільна 7.2. Стрічкова 7.3. Лопатева без регулювання величини просипання 7.4. Лопатева з регулюванням величини просипання 7.5. Гофрована 7.6. З розрізами, отворами чи вирізами 7.7. Вузькострічкова 7.8. Широкострічкова 7.9. Пружно-еластична 7.10. Із загинами на зовнішній кромці спіралі 7.11. Пружинна (кругла) 7.12. Зі змінними додатковими елементами 7.13. Нахилена 7.14. З додатковими елементами
8. Тип гвинта						9. Спосіб кріплення елементів
8.1. З гвинтоподібним прорізом основи і закріпленням у ньому пружно-еластичних елементів 8.2. З розташованими в круглих отворах, що відтворюють гвинтову лінію, пружно-еластичних елементів 8.3. З розташованими в еліпсоподібних отворах, що відтворюють гвинтову лінію, пружно-еластичних елементів 8.4. З полімерним покриттям спіралі; 8.5. З полімерним покриттям спіралі та основи шнека 8.6. З розташованими на спіралі еластичних гвинтових пелюстків 8.7. З кріпленням пружно-еластичних елементів в торцевих отворах спіралі 8.8. Із розташованими на швелероподібній основі спіралі пружно-еластичних елементів 8.9. Шнекова спіраль з розташованими у подвійній основі пружно-еластичних елементів 8.10. Із пружно-еластичними накладками встановленими на периферії спіралі 8.11. Із пружно-еластичною щіткою розміщеною на периферії спіралі 8.12. Із суцільним камероподібним пружно-еластичним елементом розміщеним на периферії спіралі 8.13. З лопатями жорстко закріпленими на вісях, що розташовані на торцевій поверхні спіралі 8.14. З лопатями встановленими з можливістю вільного обертання на вісях, що розташовані на торцевій поверхні спіралі						9.1. Додатковою внутрішньою основою 9.2. Гвинтами 9.3. Болтами 9.4. Заклепками 9.5. Клеєнням 9.6. Пресуванням 9.7. Паянням 9.10. Зварюванням

Джерело: розроблено авторами

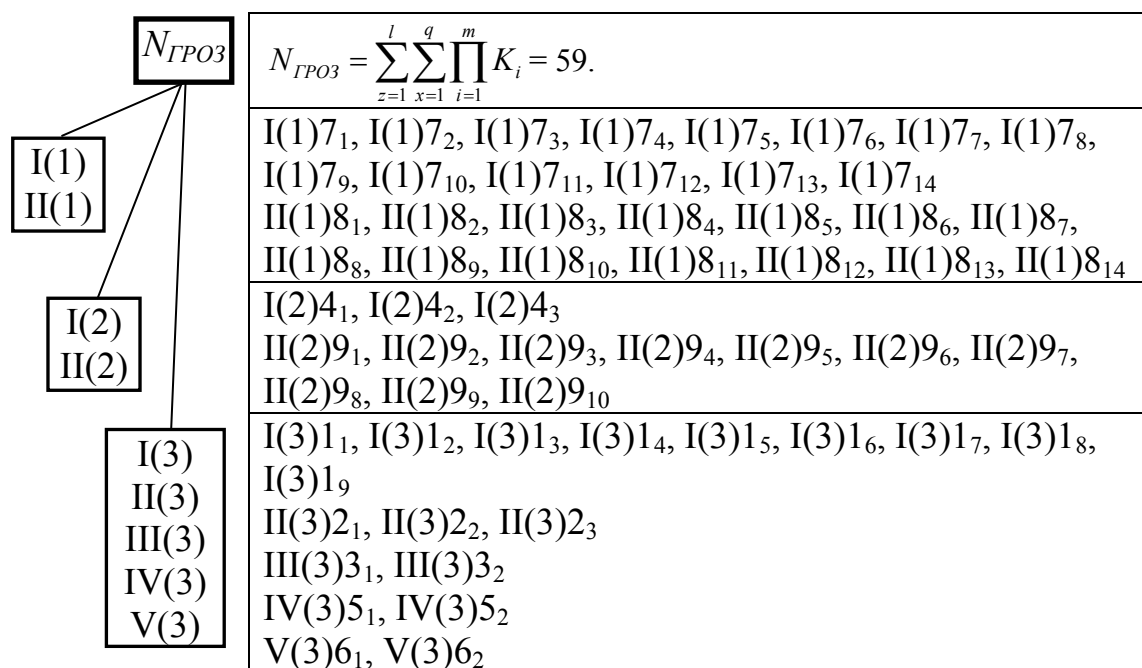


Рисунок 1 - Модель механічної системи «Гвинтовий робочий орган змішувача»:

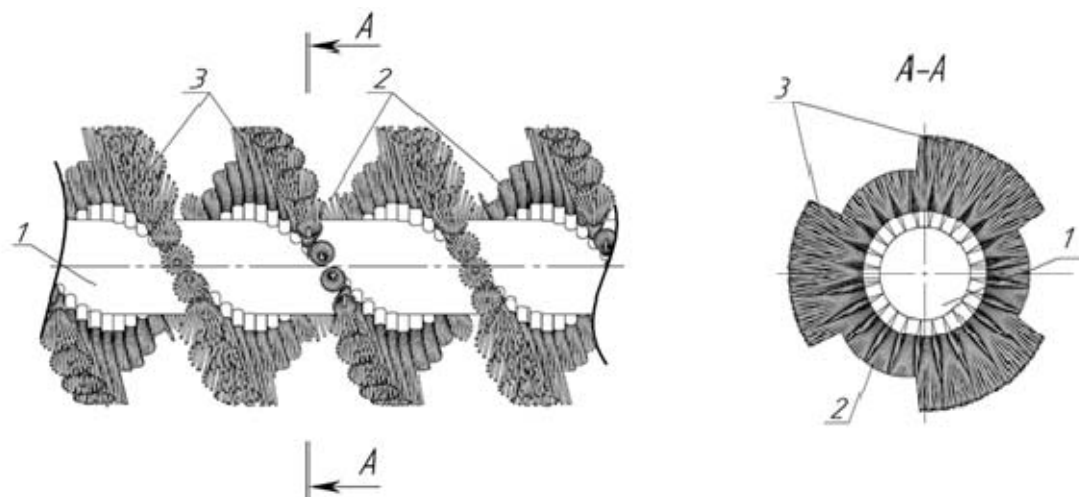
I - V – підгрупи відповідного ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні рівні

Джерело: розроблено авторами

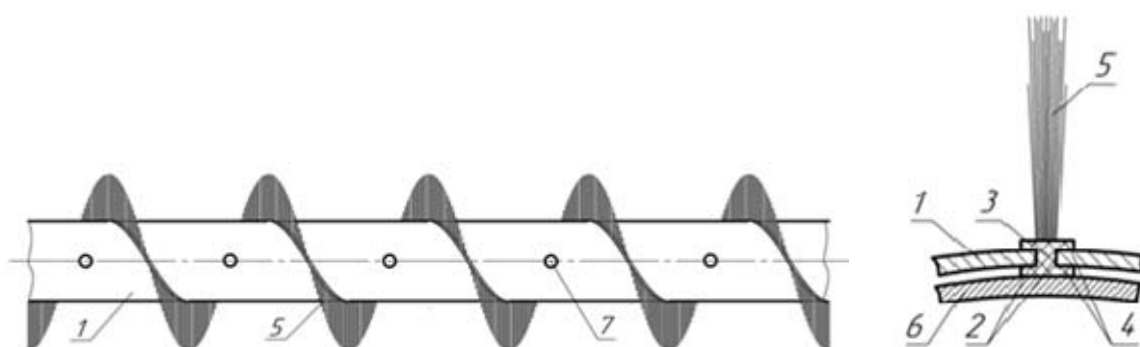
Для конструкцій, зображених на рис. 2.в та рис. 2.г, визначальними ознаками є ознаки 7.1 «суцільна», 7.14 «з додатковими елементами», 7.9 «пружно-еластична», 7.12 «зі змінними додатковими елементами», а також ознака 8.12 «із суцільним периферійним камероподібним пружно-еластичним елементом на спіралі». Різницею у них є ознака 9 - спосіб кріплення елементів, де для конструкції зображеної на рис. 2.в використовується спосіб кріплення елементів 9.4 «заклепками», а для конструкції зображеної на рис. 2.г використовується спосіб кріплення елементів 9.5 «клеєнням», що дозволяє в разі потреби заміни відповідного пружно-еластичного елемента на спіралі реалізовувати його заміну шляхом відкріплення з подальшим прикріпленням липучки до липучки.

На рис. 3 зображені синтезовані конструкції лопатевих ГРОЗ з регульованими та нерегульованими отворами просипання, які запатентовано [35-36], а на конструкцію з рис. 3.в подано заявку на отримання патенту України. Визначальною ознакою для конструкції, зображеної на рис. 3.а, є ознака профілю спіралі 7.3 «лопатева без регулювання величини просипання». Для конструкцій, зображених на рис. 3.б і рис. 3.в, є ознаки профілю спіралі 7.3 «лопатева без регулювання величини просипання» та 7.4. «лопатева з регулюванням величини просипання». Також для конструкції зображеної на рис. 3.б ознака за кількістю спіралей 4.2 «двозахідний», а для конструкції зображеної на рис. 3.в ознака 4.4 «за кількістю спіралей».

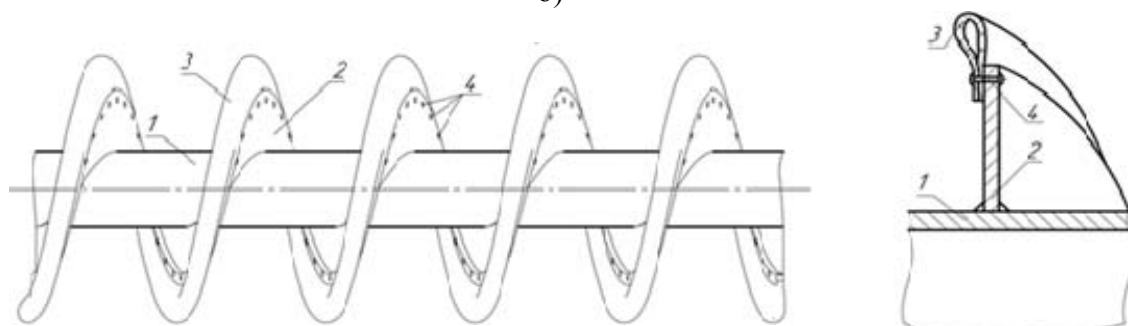
До переваг щіткоподібного пружно-еластичного ГРОЗ з рис. 2.а відноситься інтефікація міжкомпонентної дифузії у перемішувальному процесі при потраплянні сипких компонентів у пустотний простір виконаний в елементах меншої висоти, а для щіткоподібного пружно-еластичного ГРОЗ з рис. 2.б додатковою перевагою є надійність кріплення еластичних елементів. Що стосується конструкцій синтезованих лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів (рис. 3), то їхніми перевагами є створення умов підбору потрібної величини зазору, для інтенсифікації міжкомпонентної дифузії матеріалів, між лопатями спіралей 3 та 6.



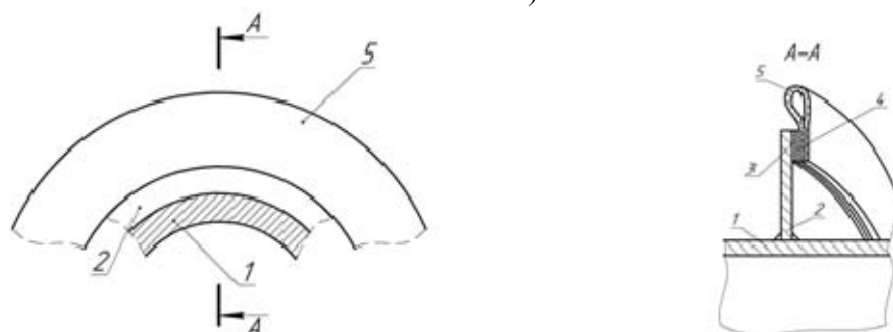
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Конструкційні рішення синтезованих пружно-еластичних гвинтових робочих органів змішувачів:

а) пат. України 157049; б) пат. України 150968; в) пат. України 150763; г) пат. України 157149

Джерело: розроблено авторами

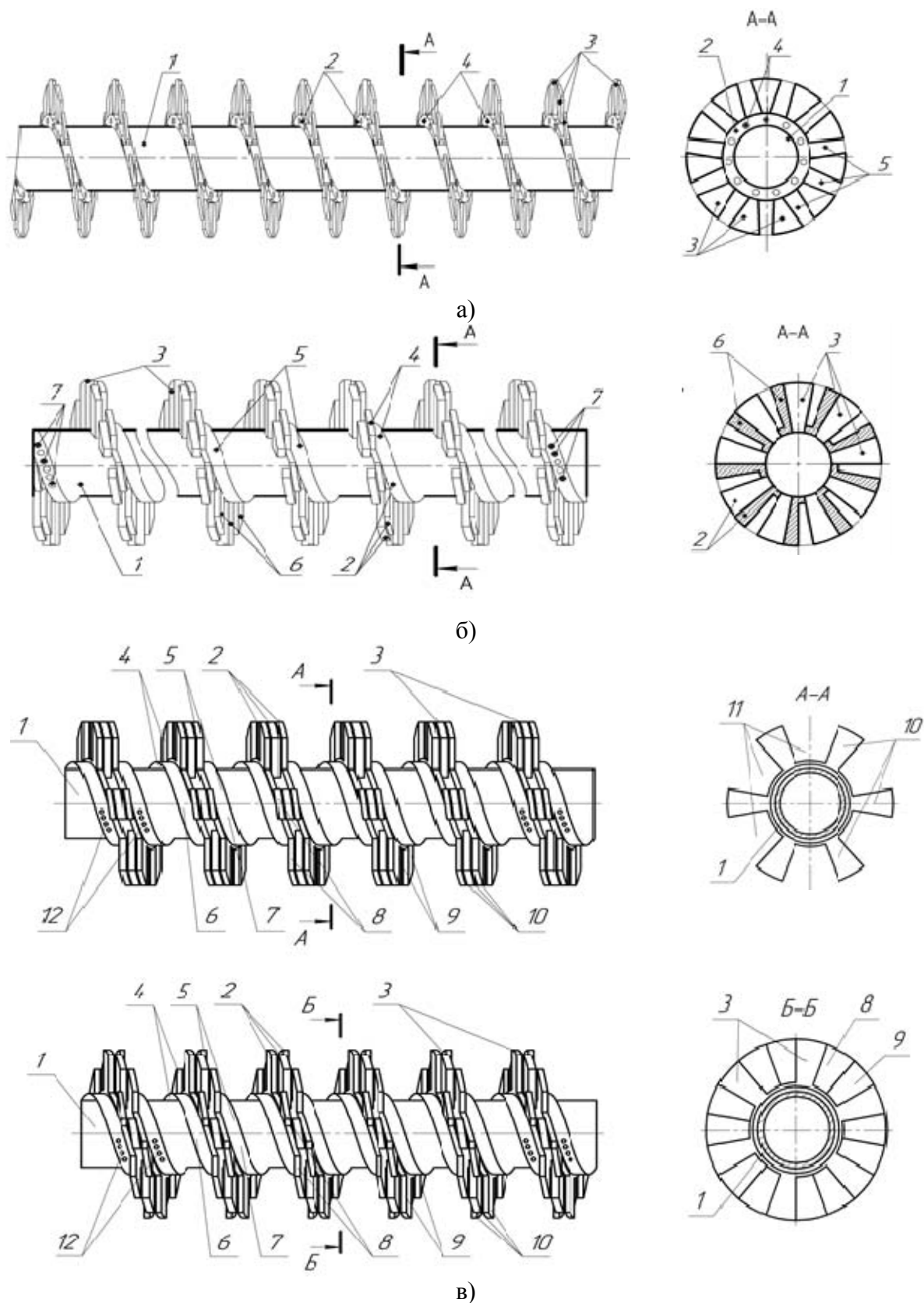


Рисунок 3 - Конструкції синтезованих лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів:

а) пат. України 153687; б) пат. України 153774; в) заявка на пат. України u202506123

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 зображені конструкції синтезованих гвинтових робочих органів змішувачів з додатковими елементами, які запатентовано [37-38], а на конструкцію з рис. 4.в подано заявку на отримання патенту України.

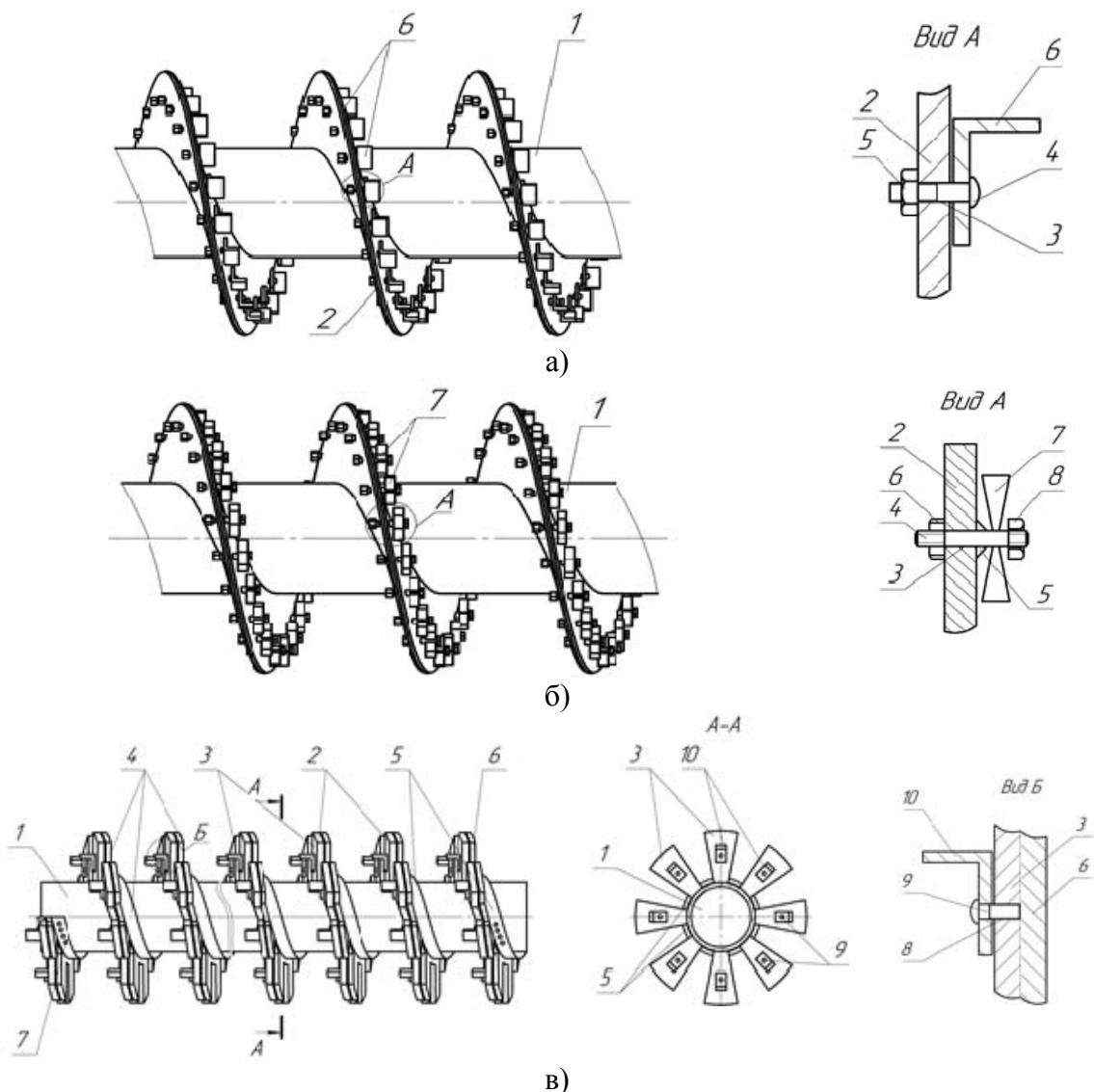


Рисунок 4 - Конструкції синтезованих гвинтових робочих органів змішувачів з додатковими елементами:

а) пат. України 161908; б) пат. України 162024; в) заявка на пат. України u202506122

Джерело: розроблено авторами

Визначальною ознакою для конструкцій, зображених на рис. 4.а та рис. 4.в, є ознака типу гвинта 8.13 «з лопатями жорстко закріпленими на вісях, що розташовані на торцевій поверхні спіралі», а для конструкції зображеної на рис. 4.б ознака 8.14 «з лопатями встановленими з можливістю вільного обертання на вісях, що розташовані на торцевій поверхні спіралі».

До переваг розроблених ГРОЗ з додатковими елементами (рис. 4) відноситься можливість забезпечення значної інтенсифікації процесу змішування матеріалів, а для конструкцій зображених на рис. 4.а та рис. 4.в передбачено можливість варіативності конфігурації, типорозмірів та просторової орієнтації робочих елементів. Це дозволяє інтенсифікувати процес гомогенізації сипких компонентів шляхом оптимізації конструктивно-технологічних параметрів системи.

На рис. 5 [39] представлено синтезовану конструкцію безвального ГРОЗ, визначальною ознакою якого є ознака конструкції гвинта 1.5 «з планками розташованими у спіралі на певній відстані від центра гвинта».

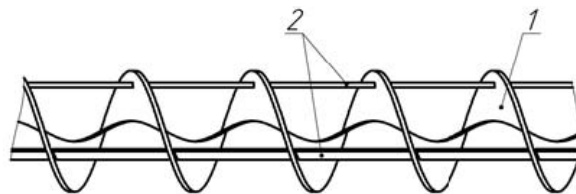


Рисунок 5 - Синтезована конструкція безвального гвинтового робочого органу змішувача (пат. України 158598)

Джерело: розроблено авторами

Загалом синтезовані конструкції гвинтових робочих органів змішувачів дають можливість забезпечити суттєву інтенсифікацію процесу змішування матеріалів. Це створює підґрунтя для розширення діапазону досліджень гвинтових змішувальних систем, дозволяючи верифікувати їхні конструктивно-технологічні параметри та здійснити обґрунтований вибір оптимальних конфігурацій обладнання.

Висновок. Проведено структурно-схемний синтез гвинтових робочих органів змішувачів. На основі експертного аналізу факторів, що визначають ефективність змішування, ідентифіковано ключові морфологічні ознаки та встановлено детерміновані взаємозв'язки між ними. Результатом системного аналізу стала побудова морфологічної матриці конструктивних параметрів гвинтових робочих органів змішувачів, що послужила базисом для розробки структурно-функціональної моделі механічної системи «Гвинтовий робочий орган змішувача». В ході реалізації структурно-схемного синтезу було виокремлено такі домінуючі морфологічні ознаки конструктивних елементів гвинтових робочих органів змішувачів: конструкція гвинта; жорсткість гвинта; комбінація гвинта; за кількістю спіралей; крок гвинта; діаметр гвинта; профіль спіралі; тип гвинта; спосіб кріплення елементів.

Це дозволило отримати ефективні варіанти конструкцій гвинтових робочих органів змішувачів які дають можливість забезпечити суттєву інтенсифікацію процесу змішування матеріалів. Зокрема конструкції гвинтових робочих органів змішувачів з додатковими елементами, лопатеві з регульованими та нерегульованими отворами просипання, пружно-еластичні та безвальний. На синтезовані конструкції гвинтових робочих органів змішувачів отримано 9 патентів України, а також подано і зареєстровано 2 заявки на одержання патентів.

Список літератури

1. Васильків В.В., Гевко І.Б., Бабарика С.Ф. Синтез нових конструкцій гвинтових робочих органів машин внесення твердих органічних добрив. Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. Дніпропетровськ, 2009, №2, с. 170-173.
2. Гевко І.Б., Гурик О.Я. Визначення динамічних навантажень у гвинтовому змішувачі. Вісник НУ «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2002, № 442, с. 90–93.
3. Гевко І.Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. Вісник ТНТУ, Тернопіль, 2011, Том 16, № 1, с. 69-77.
4. Гевко І., Любачівський Р., Дячун А. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. Львів, 2012, № 16, с. 237 – 246.
5. Гевко І.Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, спец. 05.20.01 «Механізація сільськогосподарського виробництва». Луцьк, 1997. 18 с.
6. Гевко І.Б. Структурний синтез імпульсних запобіжних муфт і шнеків методом морфологічного аналізу. Вісник ТНТУ, Тернопіль, 2012, № 3(67), с. 121-134.

7. Гевко І.Б., Вітровий А.О., Гурик О.Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей, Випуск 8. Луцьк, 2001, с. 72-82.
8. Гевко І.Б., Гудь В.З. Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2019, Вип. 2(33), с. 25-33.
9. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Любачівський Р.О. Структурний синтез гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями методом морфологічного аналізу. Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Випуск 128/2012. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь, 2012, с. 37 – 41.
10. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Клендій В.М. Синтез гвинтових конвеєрів з гнучкими робочими органами. Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. Львів, 2014, № 18, с. 112 – 121.
11. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Пік А.І., Марчук Н.М., Маруніч О.П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей, Вип. 45. Луцьк, 2020. С. 35-44.
12. Гевко І.Б., Довбуш Т., Цюнь О., Довбуш А., Станько А. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх досліджень. Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей, Випуск 47. Луцьк, 2021, с. 63-72.
13. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
14. Дмитрів Д.В., Гевко І.Б., Левенець В.Б. Надійність роботи шнеково-гвинтових змішувачів. Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей, Випуск 16. Луцьк, 2007, с. 62-74.
15. Механізми з гвинтовими пристроями. Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський та ін. Львів: Світ, 1993. 208 с.
16. Пилипець М. І., Гевко І.Б., Вітровий А.О. Оптимізація робочого органу з пружним валом для гнучких гвинтових конвеєрів. Вісник НУ «Львівська політехніка»: «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 2000, № 412, с. 84–91.
17. Рогатинський Р.М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Дячун А. Є., Мельничук А. Л., Слободян Л. М. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
18. Пилипець М. І., Гевко І.Б., Вітровий А.О. Оптимізація робочого органу з секційними елементами для гнучких гвинтових конвеєрів. Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей, Вип. 5. Луцьк, 1999, с. 207–217.
19. Рогатинський Р.О., Гевко І.Б., Рогатинська Л.Р. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. Вісник ТНТУ. 2013, № 1 (69), с. 116–125.
20. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
21. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В. Моделювання роботи малогабаритного лопатево-гвинтового змішувача. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Випуск 6. Луцьк, 2000. С. 129-135.
22. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В., Гудь В.З., Дмитрів О.Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Випуск 45. Луцьк, 2020. С. 84-93.
23. Hevko I.B., Dyachun A.Ye., Hud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M. Investigation of the stability of the torsional vibrations of a screw conveyor under the influence of pulse forces. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2015, Vol. 45, № 1, c. 77-86.
24. Hevko I.B., Lyashuk O.L., Leshchuk R.Y., Rogatynska L.R., Melnychuk A.L. Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2016, Vol. 48, № 1, c. 35-42.
25. Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyor with Hinge-Pan Operating Device. Oleg Lyashuk, Roman Rohatynskiy, Ivan Hevko, Olena Dmytriv, Oleg Tson, Ihor Tkachenko, Mariana Sokol, Roman Leshchuk, Volodymyr Kobelnyk. Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipments-2023. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Vol. 948, pp 169-182.
26. Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. INMATEH - Agricultural Engineering. V. Hud, R. Rogatynskyy, Iv. Hevko, O. Lyashuk, A. Pic, O. Huryk. Polytechnic University of Bucharest, 2020, Vol. 60, № 1, P. 29-36.
27. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. O. L., Lyashuk; I. B., Hevko; V. Z., Hud; I. G., Tkachenko; O. V., Hevko; M. O., Sokol; O. P., Tson; V. R., Kobelnyk; D. Z., Shmatko; A. I., Stanko. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2022, Vol. 68, № 3, P. 499-510.
28. Research of resonance vibrations of the system "Telescopic screw is a bulk medium" caused by torsional vibrations. V. Hud, I. Hevko, O. Lyashuk, O. Hevko, M. Sokil, I. Shust. Karaganda, 2020, № 2 (98), Ст. 119-126.

29. Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader. Karaganda State University Publishing house. I. Hevko, O. Lyashuk, M. Sokil, L. Slobodian, V. Hud, Yu. Vovk. Karaganda, 2019, № 2 (94), Ст. 73-81.
30. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.-V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A. Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. Agriculture, 2023. Vol. 13, № 4. P. 870. (<https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>).
31. Шнек для змішування з еластичною щіткоподібною поверхнею : пат. 157049 Україна : МПК B65G 33/16 / І. Б. Гевко, Т. А. Довбуш, Б. Р. Гевко, Ю. С. Никеруй, Р. В. Хорошун, А. О. Брикса, С. О. Коваль, О. Ю. Стібайло ; заявник Україна. – № u202400169 ; заявл. 11.01.2024 ; опубл. 05.09.2024, Бюл. № 36.
32. Шнек з еластичною щіткоподібною поверхнею : пат. 150968 Україна : МПК B65G 33/26 (2006.01) / Ів. Б. Гевко, О. П. Цюнь, А. Є. Дячун, Т. А. Довбуш, А. І. Станько, І. П. Сукенік, А. Д. Довбуш ; заявник Україна. – № u202106202 ; заявл. 04.11.2021 ; опубл. 18.05.2022, Бюл. № 20.
33. Шнек з еластичним камероподібним елементом : пат. 150763 Україна : МПК B65G 33/26 (2006.01), B65G 33/16 (2006.01) / Ів. Б. Гевко, О. П. Цюнь, Т. А. Довбуш, А. І. Станько, А. Д. Довбуш, Н. І. Хомик, Г. Б. Цюнь ; заявник Україна. – № u202106203 ; заявл. 04.11.2021 ; опубл. 13.04.2022, Бюл. № 15.
34. Шнек із змінним еластичним елементом : пат. 157149 Україна : МПК B65G 33/16 / І. Б. Гевко, Т. А. Довбуш, Б. Р. Гевко, А. Д. Довбуш, Р. В. Хорошун, А. О. Брикса, С. О. Коваль, О. Ю. Стібайло ; заявник Україна. – № u202400165 ; заявл. 11.01.2024 ; опубл. 05.09.2024, Бюл. № 36.
35. Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів : пат. 153687 Україна : МПК B65G 33/16, B65G 33/26 / Ів. Б. Гевко, Р. Я. Лещук, О. Я. Гурик, Т. А. Довбуш, А. Д. Довбуш, С. Ю. Мариненко, В. С. Сенчишин, С. О. Коваль, О. Ю. Стібайло, В. С. Головка ; заявник Україна. – № u202301003 ; заявл. 13.01.2023 ; опубл. 10.08.2023, Бюл. № 32.
36. Гвинтовий робочий орган змішувача : пат. 153774 Україна : МПК B65G 33/16 / Ів. Б. Гевко, Р. Я. Лещук, І. Б. Окіпний, Т. А. Довбуш, А. Д. Довбуш, О. Я. Гурик, Д. Л. Радик, С. Ю. Мариненко, С. О. Коваль, О. Ю. Стібайло ; заявник Україна. – № u202301002 ; заявл. 13.01.2023 ; опубл. 24.08.2023, Бюл. № 34.
37. Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів : пат. 161908 Україна : МПК B21D 11/06 / Р. М. Рогатинський, І. Б. Гевко, Т. А. Довбуш, А. Є. Дячун, А. О. Брикса, Н. А. Антончак, А. Г. Никитюк, В. В. Мартинюк ; заявник Україна. – № u202503401 ; заявл. 14.07.2025 ; опубл. 14.01.2026, Бюл. № 2.
38. Шнек для змішування з додатковими елементами : пат. 162024 Україна : МПК B21D 11/06 / І. Б. Гевко, Р. М. Рогатинський, Т. А. Довбуш, А. Є. Дячун, А. О. Брикса, Н. А. Антончак, А. Г. Никитюк, В. В. Мартинюк ; заявник Україна. – № u202503400 ; заявл. 14.07.2025 ; опубл. 04.02.2026, Бюл. № 5.
39. Гвинтовий робочий орган для змішування матеріалів : пат. 158598 Україна : МПК B65G 33/26 / І. Б. Гевко, Т. А. Довбуш, М. В. Бабій ; заявник Україна. – № u202403629 ; заявл. 15.07.2024 ; опубл. 26.02.2025, Бюл. № 9/2025.

References

1. Vasylyk V.V., Hevko I.B., Babaryka S.F. Synthesis of new designs of screw working bodies of machines for applying solid organic fertilizers. Bulletin of the Dnipropetrovsk State Agrarian University. Dnipropetrovsk, 2009, No. 2, p. 170-173.
2. Hevko I.B., Guryk O.Ya. Determination of dynamic loads in a screw mixer. Bulletin of Lviv Polytechnic University: Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering. 2002, No. 442, p. 90–93.
3. Hevko I.B. Modeling of the nature of the load on the screw working bodies. Bulletin of TNTU, Ternopil, 2011, Volume 16, No. 1, p. 69-77.
4. Hevko I., Lyubachivskyi R., Dyachun A. Synthesis of mixers with screw working bodies. Bulletin of the Lviv National Agrarian University: Agricultural engineering research. Lviv, 2012, No. 16, p. 237-246.
5. Hevko I.B. Development and research of low-frequency devices for performing technological processes with flexible screw conveyors: autoref. thesis for obtaining sciences. candidate degree technical sciences, special 05.20.01 "Mechanization of agricultural production". Lutsk, 1997. 18 p.
6. Hevko I.B. Structural synthesis of impulse safety couplings and screws by the method of morphological analysis. Bulletin of TNTU, Ternopil, 2012, No. 3(67), p. 121-134.
7. Hevko I.B., Vitrovyi A.O., Guryk O.Ya. A dynamic model of the process of transporting loose materials by a screw conveyor. Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 8. Lutsk, 2001, p. 72-82.
8. Hevko I.B., Gud V.Z. Synthesis of screw conveyors with the possibilities of technological transformation and mobile change of the trajectory of material overload. Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. 2019, Issue 2(33), p. 25-33.
9. Hevko I.B., Dyachun A.E., Lyubachivskyi R.O. Structural synthesis of screw conveyors with advanced technological capabilities by the method of morphological analysis. Bulletin of SevNTU: coll. of science Ave. Issue 128/2012. Series: Mechanical engineering and transport. Sevastopol, 2012, p. 37-41.

10. Hevko I.B., Lyashuk O.L., Klendiy V.M. Synthesis of screw conveyors with flexible working bodies. Bulletin of the Lviv National Agrarian University: Agricultural engineering research. Lviv, 2014, No. 18, p. 112 - 121.
11. Hevko I.B., Lyashuk O.L., Peak A.I., Marchuk N.M., Marunych O.P. Synthesis of screw conveyors-mixers. Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 45. Lutsk, 2020, p. 35-44.
12. Hevko I., Dovbush T., Tsyon O., Dovbush A., Stanko A. Synthesis of helical working bodies with elastic surfaces and the results of their research. Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 47. Lutsk, 2021, p. 63-72.
13. Hevko I. B., Leshchuk R. Ya., Gud V. Z., Dmytriv O. R., Dubynyak T. S., Navrotska T. D., Kruglik O. A. Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research. Ternopil: FOP Palyanitsa V. A., 2019. 207 p.
14. Dmytriv D.V., Hevko I.B., Levenets V.B. Reliability of screw-screw mixers. Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 16. Lutsk, 2007, p. 62-74.
15. Mechanisms with screw devices. B.M. Hevko, M.G. Danylchenko, R.M. Rohatynskyi et al. Lviv: Svit, 1993. 208 p.
16. Pylypets M.I., Hevko I.B., Vitrovyi A.O. Optimization of the working body with an elastic shaft for flexible screw conveyors. Bulletin of Lviv Polytechnic University: "Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering". 2000, No. 412, p. 84-91.
17. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Lyashuk O.L., Gud V.Z., Dyachun A.E., Melnychuk A.L., Slobodian L.M. Prospective screw conveyors: designs, calculation, research. Ternopil: FOP Palyanytsia V. A., 2019. 212 p.
18. Pylypets M.I., Hevko I.B., Vitrovyi A.O. Optimization of the working body with sectional elements for flexible screw conveyors. Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 5. Lutsk, 1999, p. 207-217.
19. Rohatynskyi R.O., Hevko I.B., Rohatynska L.R. Optimization of parameters of screw transport and technological systems. Bulletin of TNTU. 2013, No. 1 (69), p. 116-125.
20. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Dyachun A.E. Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms: monograph. Ternopil: Ivan Pulyuy TNTU, 2014. 280 p.
21. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Dmytriv D.V. Modeling the operation of a small-sized blade-screw mixer. Agricultural machinery. Collection of scientific articles. Issue 6. Lutsk, 2000. P. 129-135.
22. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Dmytriv D.V., Gud V.Z., Dmytriv O.R. Modeling of mixing of components by screw conveyors-mixers. Agricultural machinery. Collection of scientific articles. Issue 45. Lutsk, 2020. P. 84-93.
23. Hevko I.B., Dyachun A.Ye., Hud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M. Investigation of the stability of the torsional vibrations of a screw conveyor under the influence of pulse forces. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2015, Vol. 45, № 1, c. 77-86.
24. Hevko I.B., Lyashuk O.L., Leshchuk R.Y., Rogatynska L.R., Melnychuk A.L. Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyors. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2016, Vol. 48, № 1, c. 35-42.
25. Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyor with Hinge-Pan Operating Device. Oleg Lyashuk, Roman Rohatynskyi, Ivan Hevko, Olena Dmytriv, Oleg Tson, Ihor Tkachenko, Mariana Sokol, Roman Leshchuk, Volodymyr Kobelnyk. Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipments-2023. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Vol. 948, pp 169-182.
26. Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. INMATEH - Agricultural Engineering. V. Hud, R. Rogatynskyy, Iv. Hevko, O. Lyashuk, A. Pic, O. Huryk. Polytechnic University of Bucharest, 2020, Vol. 60, № 1, P. 29-36.
27. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. O. L., Lyashuk; I. B., Hevko; V. Z., Hud; I. G., Tkachenko; O. V., Hevko; M. O., Sokol; O. P., Tson; V. R., Kobelnyk; D. Z., Shmatko; A. I., Stanko. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, 2022, Vol. 68, № 3, P. 499-510.
28. Research of resonance vibrations of the system "Telescopic screw is a bulk medium" caused by torsional vibrations. V. Hud, I. Hevko, O. Lyashuk, O. Hevko, M. Sokil, I. Shust. Karaganda, 2020, № 2 (98), Ст. 119-126.
29. Resonant oscillation of vertical working part of conveyor-loader. Karaganda State University Publishing house. I. Hevko, O. Lyashuk, M. Sokil, L. Slobodian, V. Hud, Yu. Vovk. Karaganda, 2019, № 2 (94), Ст. 73-81.
30. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.-V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A. Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. Agriculture, 2023. Vol. 13, № 4. P. 870. (<https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>).
31. Screw for mixing with elastic brush-like surface : Patent 157049 Ukraine : IPC B65G 33/16 / I. B. Hevko, T. A. Dovbush, B. R. Hevko, Yu. S. Nykerui, R. V. Khoroshun, A. O. Bryksa, S. O. Koval, O. Yu. Stibailo ; applicant Ukraine. – No. u202400169 ; appl. 11.01.2024 ; publ. 05.09.2024, Bull. No. 36.
32. Screw with elastic brush-like surface : Patent 150968 Ukraine : IPC B65G 33/26 (2006.01) / Iv. B. Hevko, O. P. Tson, A. Ye. Dyachun, T. A. Dovbush, A. I. Stanko, I. P. Sukenik, A. D. Dovbush ; applicant Ukraine. – No. u202106202 ; appl. 04.11.2021 ; publ. 18.05.2022, Bull. No. 20.
33. Screw with elastic chamber-type element : Patent 150763 Ukraine : IPC B65G 33/26 (2006.01), B65G 33/16 (2006.01) / Iv. B. Hevko, O. P. Tson, T. A. Dovbush, A. I. Stanko, A. D. Dovbush, N. I. Khomyk, H. B. Tson ; applicant Ukraine. – No. u202106203 ; appl. 04.11.2021 ; publ. 13.04.2022, Bull. No. 15.

34. Screw with replaceable elastic element : Patent 157149 Ukraine : IPC B65G 33/16 / I. B. Hevko, T. A. Dovbush, B. R. Hevko, A. D. Dovbush, R. V. Khoroshun, A. O. Bryksa, S. O. Koval, O. Yu. Stibailo ; applicant Ukraine. – No. u202400165 ; appl. 11.01.2024 ; publ. 05.09.2024, Bull. No. 36.
35. Screw for mixing with mechanical fastening of elements : Patent 153687 Ukraine : IPC B65G 33/16, B65G 33/26 / Iv. B. Hevko, R. Ya. Leshchuk, O. Ya. Huryk, T. A. Dovbush, A. D. Dovbush, S. Yu. Marynenko, V. S. Senchyshyn, S. O. Koval, O. Yu. Stibailo, V. S. Holovko ; applicant Ukraine. – No. u202301003 ; appl. 13.01.2023 ; publ. 10.08.2023, Bull. No. 32.
36. Screw working body of mixer : Patent 153774 Ukraine : IPC B65G 33/16 / Iv. B. Hevko, R. Ya. Leshchuk, I. B. Okipnyi, T. A. Dovbush, A. D. Dovbush, O. Ya. Huryk, D. L. Radyk, S. Yu. Marynenko, S. O. Koval, O. Yu. Stibailo ; applicant Ukraine. – No. u202301002 ; appl. 13.01.2023 ; publ. 24.08.2023, Bull. No. 34.
37. Screw for mixing with mechanical fastening of elements : Patent 161908 Ukraine : IPC B21D 11/06 / R. M. Rohatynskiy, I. B. Hevko, T. A. Dovbush, A. Ye. Dyachun, A. O. Bryksa, N. A. Antonchak, A. H. Nykytiuk, V. V. Martyniuk ; applicant Ukraine. – No. u202503401 ; appl. 14.07.2025 ; publ. 14.01.2026, Bull. No. 2.
38. Screw for mixing with additional elements : Patent 162024 Ukraine : IPC B21D 11/06 / I. B. Hevko, R. M. Rohatynskiy, T. A. Dovbush, A. Ye. Dyachun, A. O. Bryksa, N. A. Antonchak, A. H. Nykytiuk, V. V. Martyniuk ; applicant Ukraine. – No. u202503400 ; appl. 14.07.2025 ; publ. 04.02.2026, Bull. No. 5.
39. Screw working body for mixing materials : Patent 158598 Ukraine : IPC B65G 33/26 / I. B. Hevko, T. A. Dovbush, M. V. Babii ; applicant Ukraine. – No. u202403629 ; appl. 15.07.2024 ; publ. 26.02.2025, Bull. No. 9/2025.

Victor Gud, Assoc. Prof., Dr. Tech. Sci., **Anatoliy Dovbush**, **Andriy Bryksa**, **Andriy Nikityuk**, **Volodymyr Buchinsky**

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Development of Screw Mixer Working Elements

Screw working bodies are used in the agro-industrial complex, construction and food industries as autonomous units or components of conveyor lines. Their functional purpose includes the transportation of loose, viscous and piece goods, as well as the intensification of processes of homogenization of media. When operating screw working bodies of mixers (SMW), both a combination of transport and technological operations (simultaneous movement and mixing) and exclusively mixing of components are implemented. Designing highly efficient SWM designs that meet the criteria of high mixture homogeneity, significant productivity and economic feasibility requires a systematic approach. It is justified to generate rational design options with their subsequent theoretical and experimental verification to determine the optimal parameters of practical implementation. Structural and schematic synthesis was chosen as the methodological basis for the development of alternative technical solutions. This approach allows you to systematize the process of generating a significant number of design variations, which ensures the completeness of the search for the optimal configuration of the SWM.

A significant body of scientific work is devoted to the design and analysis of screw mixers. Research in this field is developing in two main directions: the development of methodologies for the synthesis of new design solutions and a comprehensive study of the theoretical and applied aspects of their functioning.

The aim of the work is to develop designs of elastic-elastic, bladed and screw mixer working bodies with additional elements by conducting structural and schematic synthesis using morphological analysis.

Screw mixer working elements, the working surfaces of which are made of elastic materials or equipped with additional structural elements, are used both for transporting bulk and lumpy cargoes, and for homogenizing viscous and bulk media. The functional capabilities of SMW are determined by their layout scheme. In particular, single use, when integrating a separate working element into the design of specialized machines, the combination of the processes of moving and mixing the material is realized, and group use: if several SMW with opposite or multidirectional motion vectors are used within one technical device, the intensification of exclusively the mixing function is ensured.

A structural-schematic synthesis of screw working elements of mixers was carried out. During the implementation of the structural-schematic synthesis, the following dominant morphological features of the design elements of screw working elements of mixers were identified: screw design; screw stiffness; screw combination; by the number of spirals; screw pitch; screw diameter; spiral profile; screw type; method of fastening elements.

The implemented synthesis process made it possible to obtain effective variants of designs of screw working elements of mixers that make it possible to provide a significant intensification of the process of mixing materials. In particular, designs of screw working elements of mixers with additional elements, bladed with adjustable and non-adjustable spill holes, elastic-elastic and shaftless. 9 patents were obtained for the synthesized designs of screw working elements of mixers, and 2 patent applications were also filed and registered.

synthesis, morphological analysis, structural diagram, screw mixer working body, screw

Одержано (Received) 25.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 03.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

А. Є. Дячун, доц., канд. техн. наук, **В. Ю. Грасовник**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

e-mail: dyachun_andriy@ukr.net

Дослідження операції навивання стрічкових гвинтових робочих органів

Проведено проєктування, виготовлення, практична реалізація та експериментальні дослідження оснащення для операції навивання стрічки на оправку технологічного процесу виготовлення стрічкових гвинтових робочих органів. Запропоновано нові конструкції технологічного оснащення для підвищення якості та розширення можливостей навивання стрічкових гвинтових робочих органів. Представлено результати експериментальних досліджень для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних параметрів стрічкового гвинтового робочого органу та силових параметрів навивання стрічки, зокрема впливу товщини стрічки, ширини стрічки та радіуса оправки на крутний момент обертання оправки. Поведено статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з виведенням рівняння регресії у кодованих та натуральних величинах залежності моменту обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу від його конструктивних параметрів.

гвинтовий робочий орган, навивання, деформація, крутний момент, технологічне оснащення, силові параметри, експериментальні дослідження

Постановка проблеми. Технологічні параметри гвинтових робочих органів різноманітних машин забезпечують можливість їх застосування у різних виробничих процесах. Зокрема, гвинтові робочі органи використовують в сільському господарстві, будівельній, харчовій, переробній, гірничо-видобувній промисловостях. Гвинтові робочі органи виконують функції транспортуючих і технологічних робочих органів у різноманітних машинах та механізмах, зокрема у складі шнекових транспортерів. Незважаючи на тривалий період наукових досліджень і технологічного вдосконалення методів їх виготовлення, процес формоутворення таких деталей і дотепер характеризується підвищеною складністю та значною енергоємністю. Зростання вимог до експлуатаційних характеристик гвинтових робочих органів, зокрема показників якості, надійності та зносостійкості, а також до точності геометричних параметрів і стабільності технологічних параметрів обумовлює актуальність розроблення та впровадження ефективніших і технологічно досконалих методів їх виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням проєктування технологічних процесів та дослідження методів виготовлення гвинтових робочих органів різного профілю присвячено значну кількість наукових праць багатьох дослідників. Вагомий внесок у розвиток теоретичних основ та практичних аспектів розроблення і дослідження технологій одержання гвинтових робочих органів здійснили Гевко Б.М. [1, 2], Рогатинський Р.М. [9, 13, 14, 16], Пилипець М.І. [1, 3, 4], Гевко І.Б. [7-21], Васильків В.В. [3-6], Ляшук О.Л. [7-9, 12] а також інші науковці.

Особливості пластичної деформації стрічкових заготовок у процесі навивання ґрунтовно досліджено у роботах [1, 5, 7, 9], де наведено аналітичні залежності, що дають змогу визначати параметри напружено-деформованого стану матеріалу, величини згинальних моментів, а також зусилля формоутворення, необхідні для реалізації процесу.

Сучасні технології виготовлення гвинтових робочих органів ґрунтуються на методі навивання стрічкової заготовки на оправку відповідної конструкції. Формування гвинтової поверхні при цьому здійснюється шляхом поступового згинання стрічки до поверхні оправки за допомогою формоутворювальних роликів спеціальної конструкції. Відмінності між існуючими технологічними схемами полягають передусім у взаємному розміщенні ролика, оправки та стрічкової заготовки, що визначає кінематичні особливості процесу формоутворення [4, 5, 12]. Основну увагу у роботах приділено питанням конструювання спеціалізованого технологічного оснащення та забезпечення високого рівня технологічності його конструкцій [10, 11, 15, 20].

Метою роботи є проектування, практична реалізація та експериментальні дослідження оснащення для операції навивання технологічного процесу виготовлення стрічкових гвинтових робочих органів.

Виклад основного матеріалу. Серед основних операцій технологічного процесу виготовлення стрічкових гвинтових робочих органів є процес навивання металевої стрічки на оправку. Спосіб навивання стрічки на оправку представлено у роботі, використовуючи технологічне оснащення для навивання стрічкових гвинтових робочих органів, що зображено на рисунках 1-5. Основними конструктивними елементами вказаного оснащення є трубчаста конічна або циліндрична оправка 1, на лівому торці якої приєднано оправу 2, що закріплюється у кулачках 3 патрона 4 токарно-гвинторізного верстата. Друга сторона оправки 1 встановлюється отвором на конічній поверхні заднього центра 5 верстата. На зовнішній циліндричній поверхні оправи 2 приєднано Г-подібну державку 6 із пазом 7, кут α якого дорівнює куту нахилу витків на зовнішньому діаметрі гвинтового робочого органу, та гвинтом 8. У різцетримачі 9 токарно-гвинторізного верстата встановлено під кутом α у вертикальній площині державку 10 із роликом 11, що має можливість вільного обертання на підшипниках кочення відносно осі 12 із пазом 13, ширина якого дорівнює товщині стрічки із зазором 0,1 мм. Центр обертання ролика 11 повинен бути на одному рівні із центром обертання оправки 1, або бути вищим до 5 мм. При цьому глибина паза на 1 мм менша за ширину стрічки, яку навивають на оправу. Для розширення універсальності процесу навивання стрічок різних типорозмірів ширина паза 13 виконується регульована за рахунок зміщення двох торцевих поверхонь ролика 11, при цьому глибина паза регулюється за рахунок встановлення компенсаційних кілець на базову циліндричну поверхню ролика 11.

Спосіб реалізується у такій послідовності. Стрічку 14 прямокутного поперечного перерізу встановлюють у паз 7 та закріплюють гвинтом 8 при розташуванні стрічки 14 внизу оправки 1 та дотиканні її кромки до зовнішнього діаметра оправки 1. Після цього патрон 4 разом з оправкою 1 та закріпленою стрічкою 14 повертають в сторону до ролика 11, до встановлення стрічки 14 у вертикальному положенні, якщо дивитись зі сторони патрона. Зі сторони ролика кут нахилу стрічки буде відповідати куту нахилу α ролика. Після цього поперечною подачею підводять ролик 11 до стрічки 14 із заходом стрічки 14 у паз 13 ролика та із її підтисканням роликом до оправки 1 без деформації стрічки. Після цього на верстаті вмикають подачу S ролика 11, що дорівнює кроку витків гвинтового робочого органу, та обертовий рух патрона 4 із оправкою 1. Внаслідок цього виконується навивання стрічки 14 на оправку 1 у гвинтовий робочий орган 15. При завершенні процесу навивання гвинтовий робочий орган виходить із паза 13 ролика 11. Відводять задній центр 5 верстата, розкріплюють стрічку 14 за рахунок вигинчування гвинта 8 та знімають гвинтовий робочий орган 15.

Для виготовлення гвинтових робочих органів із різними кроками витків, а відповідно із різними кутами α нахилу витків у конструкції передбачено можливість

регулювання кута нахилу ролика 11 за рахунок пластин, що встановлюються під державкою у різцетримачі. Також передбачена можливість регулювання кута нахилу паза 7, у якому закріплюється стрічка 14 за рахунок встановлення додаткової поворотної вставки 18 із пазом та фіксацією необхідного кута двома гайками 19 на державці 6.

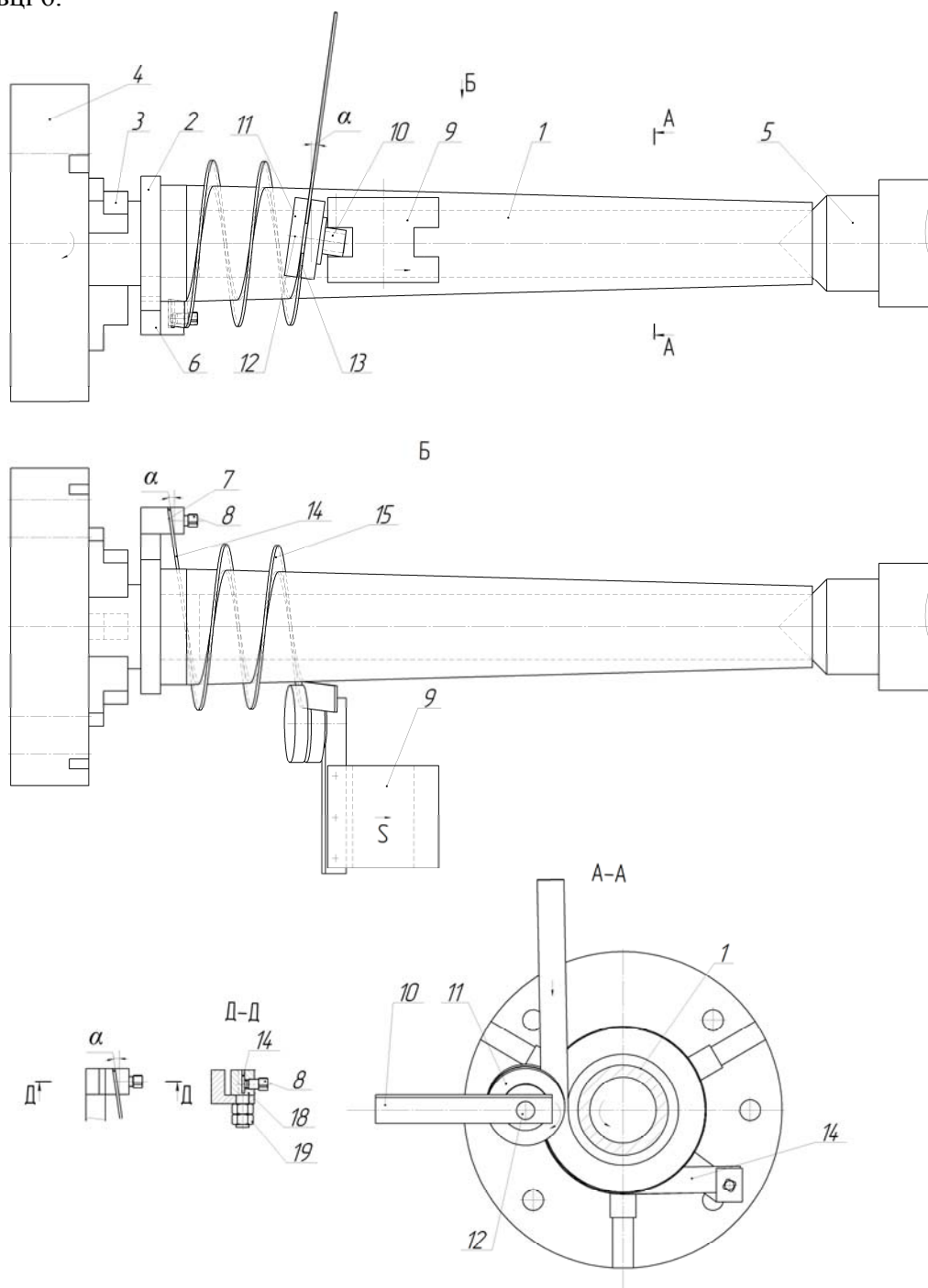


Рисунок 1 – Технологічне оснащення для навивання стрічкових гвинтових робочих органів
Джерело: розроблено авторами

На рисунку 2 представлено трьохмірне моделювання технологічного оснащення, що використовувалось при його проектуванні та аналізі міцності із збереженням усіх позицій, описаних вище.

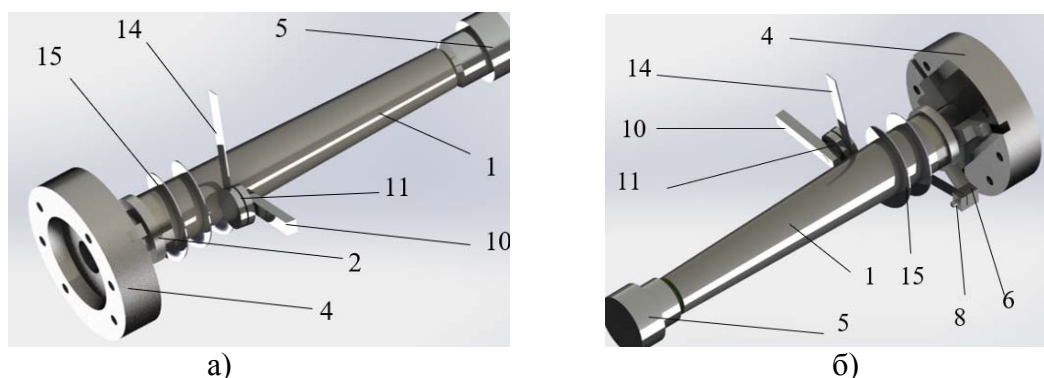


Рисунок 2 – Трьохмірне моделювання технологічного оснащення для навивання стрічкових гвинтових робочих органів: а) вигляд зі сторони ролика 11; б) вигляд зі сторони оправки 1
Джерело: розроблено авторами

При навиванні стрічок на оправку із значним співвідношенням ширини стрічки до її товщини можливе виникнення явища формування гофр на внутрішньому діаметрі гвинтового робочого органу. Для можливості уникнення цього процесу необхідно збільшувати площу бокових опор стрічки в зоні деформації в процесі її навивання на оправку. У ролику такими опорами виступають торцеві поверхні паза ролика. Тому одним із варіантів є збільшення діаметра ролика. Для збільшення площі бокових опор стрічки в зоні деформації із меншими витратами матеріалу ніж при збільшенні діаметра ролика запропоновано конструкцію ролика, що зображена на рисунку 3. Особливістю цієї конструкції є те, що під основною державкою 10 та роликом 11 під кутом α прикріплено додаткову державку 16 із пазом 17, що розміщений під пазом ролика 11 і є його продовженням. Стрічка 14 під час навивання на оправку 1 подається через пази ролика 11 та державки 16, що забезпечує збільшенні площі її бокових опор в зоні деформації та підвищує стійкість до утворення гофр на внутрішньому діаметрі гвинтового робочого органу.

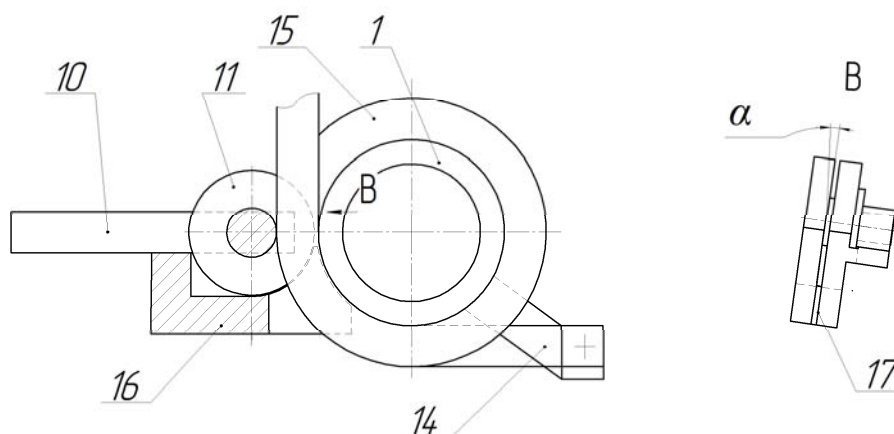


Рисунок 3 – Конструкція ролика із додатковою державкою для навивання стрічкових гвинтових робочих органів

Джерело: розроблено авторами

Для можливості навивання конічних гвинтових робочих органів та збільшення площі бокових опор стрічки в зоні деформації в процесі її навивання на оправку запропоновано конструкцію ролика, що зображена на рисунку 4.

Особливістю цієї конструкції є те, що ролик 11 для навивання стрічки встановлено на двох опорах державки 10 із зазором у горизонтальному пазі напрямної 20 з можливістю вільного обертання. Напрямна 20 встановлена пазом на виступі державки 10 з можливістю зворотно-поступального радіального переміщення до

оправки 1 за допомогою пружини стиснення 22. На вільній правій стороні напрямної 20 виконано паз 21, через який подається стрічка 14 при навиванні на оправку 1 роликом 11 для формування гвинтового робочого органу 15. На лівій боковій стороні напрямної 20 встановлено копіювальний ролик 23 з можливістю вільного обертання, що контактує із робочою поверхнею оправки 1. При навиванні гвинтових робочих органів на конічну оправку 1 за рахунок контакту ролика 23 із поверхнею оправки та деформації пружини стиснення 22 відбувається переміщення напрямної 20 у радіальному напрямку відносно оправки 1 з відслідковуванням її геометрії, внаслідок чого бокові опори паза 21 для стрічки 14 перебувають із нею в постійному контакті в зоні деформації, зменшуючи ймовірність утворення гофр на внутрішньому діаметрі гвинтового робочого органу 15 при зміні діаметра оправки відносно розташування різцетримача та ролика.

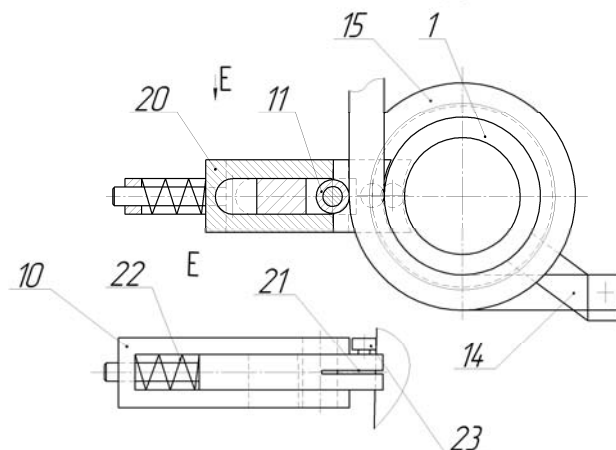


Рисунок 4 – Конструкція ролика із напрямною для навивання конічних стрічкових гвинтових робочих органів

Джерело: розроблено авторами

Для встановлення взаємозв'язків конструктивних та силових параметрів процесу навивання стрічкових гвинтових робочих органів на оправку, практичної реалізації спроектованого оснащення проведено експериментальні дослідження. Навивання стрічки 1 на конічну оправку 2 закріплену у патроні 3 верстата роликом 4 закріпленим у різцетримачі 5 для формування конічних стрічкових гвинтових робочих органів 6 виконували на токарно-гвинторізному верстаті, що зображено на рисунку 5.

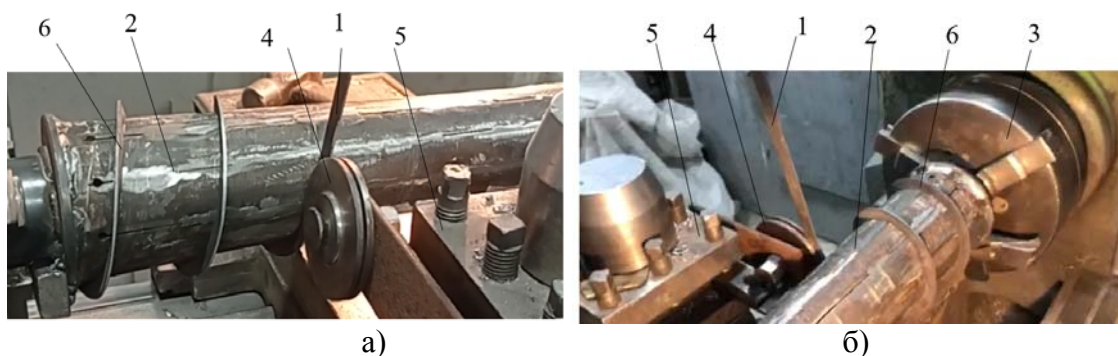


Рисунок 5 – Процес навивання стрічкових гвинтових робочих органів: а) вигляд зі сторони ролика 4; б) вигляд зі сторони оправки 2

Джерело: розроблено авторами

До програми експериментальних досліджень входило: проектування та виготовлення для виконання операції навивання стрічки на оправу спеціального технологічного оснащення, зокрема конічної оправки та ролика для навивання, вибір устаткування для вимірювання силових параметрів процесів; проведення експериментальних досліджень з метою встановлення взаємозв'язку конструктивних

параметрів стрічкового гвинтового робочого органу та силових параметрів навивання стрічки, зокрема впливу товщини стрічки H , ширини стрічки B та радіуса оправки r на крутний момент M обертання оправки; статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з виведенням рівняння регресії. Експериментальні дослідження проводили для стрічок із сталі 08 кп. Для збору даних про крутний момент M обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу використовували частотний перетворювач Altivar з програмним забезпеченням PowerSuite. Попереднє тарування виконували за допомогою динамометра.

У таблиці 1 представлено результати вибору змінних вхідних факторів та рівнів їх варіювання при дослідженні крутного моменту M обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу на основі повнофакторного експерименту.

Таблиця 1 – Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні крутного моменту обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур.(кодовані)		
	натур.	код.				
Товщина стрічки	H , мм	x_1	0,4	2,0 (+1)	1,6 (0)	1,2 (-1)
Ширина стрічки	B , мм	x_2	4	18 (+1)	14 (0)	10 (-1)
Радіус оправки	r , мм	x_3	5	45 (+1)	40 (0)	35 (-1)

Джерело: розроблено авторами

Загальний вигляд рівняння регресії моменту обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу за результатами експериментів у кодованих та натуральних величинах:

$$M_{(x_1, x_2, x_3)} = 68,73 + 18,7x_1 + 43,29x_2 + 3,06x_3 + 10,83x_1x_2 + 0,77x_1x_3 + 1,53x_2x_3 + 0,012x_1^2 + 7,542x_2^2 + 0,057x_3^2, \quad (1)$$

$$M_{(H, B, r)} = 133,264 - 63,652H - 16,266B - 1,257r + 6,768HB + 0,385Hr + 7,65 \cdot 10^{-2} Br + 7,5 \cdot 10^{-2} H^2 + 0,471B^2 + 2,28 \cdot 10^{-3} r^2. \quad (2)$$

За результатами експериментальних досліджень та рівняння регресії (2), побудовано поверхні відгуку та їх двомірні перерізи залежності моменту обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу, що представлено на рис. 6 та 7.

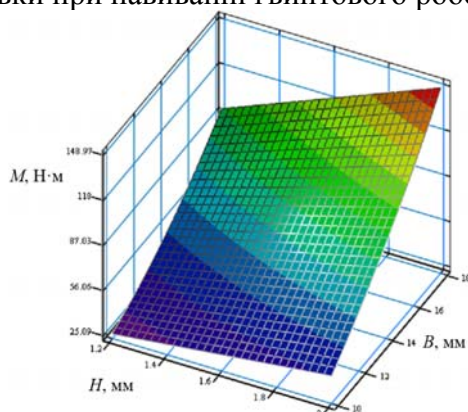


Рисунок 6 - Поверхня відгуку залежності моменту обертання оправки від товщини стрічки H та ширини стрічки B ($r=40$ мм)

Джерело: розроблено авторами

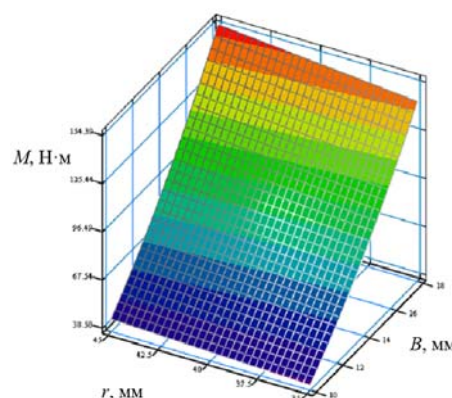


Рисунок 7 - Поверхня відгуку залежності моменту обертання оправки від ширини стрічки B та радіуса оправки r ($H=2$ мм)

Джерело: розроблено авторами

На основі рівняння регресії (1) встановлено, що основним фактором, який впливає на момент обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу є фактор $x_2(B)$. Менший вплив має фактор $x_1(H)$ і найменший - фактор $x_3(r)$. Зростання усіх факторів призводить до збільшення моменту обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу.

З рисунків 6, 7 та рівняння регресії (2) зроблено висновки, що максимальне значення моменту обертання оправки дорівнювало 155 Н·м, а мінімальне – 24 Н·м. Збільшення товщини стрічки H від 1,2 мм до 2 мм призводить до зростання моменту обертання оправки в 1,67 рази. При цьому збільшення ширини стрічки B від 10 мм до 18 мм призводить до зростання моменту обертання оправки в 3,66 рази, а зміна радіуса оправки r від 35 мм до 45 мм призводить до зростання моменту обертання оправки в 1,08 рази.

Висновки:

1. Проведено проектування, виготовлення, практична реалізація та експериментальні дослідження оснащення для операції навивання стрічки на оправку технологічного процесу виготовлення стрічкових гвинтових робочих органів. Запропоновано нові конструкції технологічного оснащення для підвищення якості та розширення можливостей навивання стрічкових гвинтових робочих органів.

2. Представлено результати експериментальних досліджень для визначення закономірностей взаємозв'язку конструктивних параметрів стрічкового гвинтового робочого органу та силових параметрів навивання стрічки, зокрема впливу товщини стрічки H , ширини стрічки B та радіуса оправки r на крутний момент M обертання оправки. Поведено статистичне оброблення даних результатів експериментальних досліджень з виведенням рівняння регресії у кодованих та натуральних величинах залежності моменту обертання оправки при навиванні гвинтового робочого органу від його конструктивних параметрів.

3. Встановлено, що максимальне значення моменту обертання оправки дорівнювало 155 Н·м, а мінімальне – 24 Н·м. Збільшення товщини стрічки H від 1,2 мм до 2 мм призводить до зростання моменту обертання оправки в 1,67 рази. При цьому збільшення ширини стрічки B від 10 мм до 18 мм призводить до зростання моменту обертання оправки в 3,66 рази, а зміна радіуса оправки r від 35 мм до 45 мм призводить до зростання моменту обертання оправки в 1,08 рази.

Список літератури

1. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок деталей машин. Тернопіль : Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с. ISBN 966-305-014-4.
2. Гевко Б. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Драган А. П., Новосад І. Я. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей. Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 367 с.
3. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. *Перспективні технології та прилади*. 2021. Вип. 18. С. 112–123.
4. Vasyuk V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil : TNTU, 2021. Vol. 104, № 4. P. 33–43.
5. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.
6. Васильків В. В., Радик Д. Л., Гевко І. Б. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату. *Наукові нотатки*. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
7. Nevko I. B., Dyachun A. Ye., Lyashuk O. L., Martsenko S. V., Gypka A. B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Polytechnic University of Bucharest, 2016. Vol. 49, № 2. P. 77–82.

8. Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference DSMIE-2021*. Lviv, 2021. Vol. 1. P. 385–394.
9. Oleg Lyashuk, Roman Rogatynskyy, Ivan Hevko, Tetiana Navrotska, Andrii Diachun. Study of power parameters of the screw spirals forming. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024*. Pilsen, Czech Republic, 2024. Vol. 1. P. 287–298.
10. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Дубиняк Т. С., Стібайло О. Ю., Гупка А. Б. Технологічні особливості виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 1. С. 75–83.
11. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Дубиняк Т. С., Стібайло О. Ю., Золотий Р. З. Дослідження операцій технологічного процесу виготовлення ножів-подрібнювачів на спіралях шнеків. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 99–108.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Гупка А. Б., Третьяков О. Л. Технологічне проектування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 457 с.
13. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л. та ін. Перспективні гвинтові конвеєри : монографія. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
14. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Дячун А. Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортнотехнологічних механізмів : монографія. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 280 с.
15. Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval. Peculiarities of technological design of Ushaped screw working bodies. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil : TNTU, 2024. Vol. 113, № 1. P. 5–15.
16. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of manufacturing method choice for screw elements. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. № 2. P. 36–41.
17. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р. та ін. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування та дослідження. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
18. Гевко І. Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. 2011. Т. 16, № 1. С. 69–77.
19. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Брикса А. О. та ін. Особливості конструкцій і проектування лопатевих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. 2. С. 24–34.
20. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Комар Р. В. та ін. Технологічне проектування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 109–116.
21. Гевко І. Б., Стібайло О. Ю., Лещук Р. Я. та ін. Техніко-економічне обґрунтування виготовлення шнекових спіралей. *Перспективні технології та прилади*. 2025. Вип. 26. С. 29–37.

References

1. Hevko, B. M., Pylypets, M. I., Vasyukiv, V. V., & Radyk, D. L. (2009). Technological fundamentals of shaping of multi-profile screw blanks of machine parts. Ternopil: Vyd-vo TDTU im. I. Puliuia. ISBN 966-305-014-4 [in Ukrainian].
2. Hevko, B. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Drahan, A. P., & Novosad, I. Ya. (2008). Technological fundamentals of shaping of special profile screw parts. Ternopil: TDTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].
3. Pylypets, M. I., Vasyukiv, V. V., Radyk, D. L., & Pylypets, O. M. (2021). Preconditions for the development of combined operations for manufacturing screw and auger blanks by metal forming. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, 18, 112–123 [in Ukrainian].
4. Vasyukiv, V., Pylypets, M., Danylchenko, L., & Radyk, D. (2021). Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*, 104(4), 33–43.
5. Vasyukiv, V. V. (2015). Development of scientific and applied foundations for the development of technologies for the production of screw and auger blanks using unification (Extended abstract of Doctoral dissertation). Lviv [in Ukrainian].
6. Vasyukiv, V. V., Radyk, L. D., & Hevko, I. B. (2004). Technological and design features of manufacturing screw blanks from sheet metal. *Naukovi notatky*, 14, 12–18 [in Ukrainian].
7. Hevko, I. B., Dyachun, A. Ye., Lyashuk, O. L., Martsenko, S. V., & Gypka, A. B. (2016). Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 49(2), 77–82.
8. Hevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., & Hupka, A. (2021). Study of dynamic and power parameters of the screw workpieces with a curved profile turning. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. Proceedings of the 4th International Conference DSMIE-2021*, 1, 385–394.

9. Lyashuk, O., Rohatynskyy, R., Hevko, I., Navrotska, T., & Diachun, A. (2024). Study of power parameters of the screw spirals forming. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. Proceedings of the 7th International Conference DSMIE-2024*, 1, 287–298.
10. Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Hupka, A. B. (2025). Technological features of manufacturing shredding knives on auger spirals. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/1), 75–83 [in Ukrainian].
11. Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Zoloty, R. Z. (2025). Research of operations of the technological process of manufacturing shredding knives on auger spirals. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 99–108 [in Ukrainian].
12. Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Hupka, A. B., & Tretiakov, O. L. (2025). Technological design and manufacturing of screw transport-technological working bodies. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
13. Rohatynskyy, R. M., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., et al. (2019). Perspective screw conveyors: monograph. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Rohatynskyy, R. M., Hevko, I. B., Diachun, A. Ye. (2014). Scientific and applied foundations of creation of screw transport-technological mechanisms: monograph. Ternopil: TNTU im. I. Puliiua [in Ukrainian].
15. Hevko, I., Pik, A., Komar, R., Stibaylo, O., & Koval, S. (2024). Peculiarities of technological design of U-shaped screw working bodies. *Scientific Journal of TNTU*, 113(1), 5–15.
16. Rogatynskiy, R., Hevko, I., Gypka, A., Garmatyk, O., & Martsenko, S. (2017). Feasibility study of manufacturing method choice for screw elements. *Acta Technologica Agriculturae*, 2, 36–41..
17. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Hud, V. Z., Dmytriv, O. R., et al. (2019). Flexible screw conveyors: design and research. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
18. Hevko, I. B. (2011). Modeling of load character on screw working bodies. *Visnyk TNTU*, 16(1), 69–77 [in Ukrainian].
19. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., et al. (2023). Features of designs and design of blade screw mixers. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39/2), 24–34 [in Ukrainian].
20. Hevko, I. B., Rohatynskyy, R. M., Komar, R. V., et al. (2025). Technological design of manufacturing methods for U-shaped screw surfaces. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 109–116 [in Ukrainian].
21. Hevko, I. B., Stibailo, O. Yu., Leshchuk, R. Ya., et al. (2025). Technical and economic justification for manufacturing auger spirals. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, 26, 29–37 [in Ukrainian].

Andrii Diachun, Assoc. Prof., PhD, **Vasyl Grasovnyk**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

The Study of the Winding Operation of Strip Helical Working Elements

The technological parameters of helical working elements of various machines ensure the possibility of their application in different production processes. In particular, helical working elements are widely used in agriculture, construction, food, processing, and mining industries. Helical working elements perform the functions of conveying and technological working bodies in various machines and mechanisms, in particular as components of screw conveyors. The aim of this work is the design, practical implementation, and experimental investigation of tooling for the winding operation in the technological process of manufacturing strip helical working elements. The design, manufacturing, practical implementation, and experimental investigation of tooling for the strip winding operation onto a mandrel in the technological process of manufacturing strip helical working elements were carried out. New designs of technological tooling are proposed in order to improve the quality and expand the capabilities of winding strip helical working elements. The results of experimental investigations aimed at determining the relationships between the structural parameters of strip helical working elements and the force parameters of strip winding are presented. In particular, the influence of strip thickness, strip width, and mandrel radius on the torque required for mandrel rotation was studied. Statistical processing of the experimental data was performed, resulting in regression equations expressed in both coded and natural variables that describe the dependence of the mandrel torque during the winding of a helical working element on its structural parameters. The maximum value of the mandrel torque was 155 N·m, while the minimum value was 24 N·m. An increase in the strip thickness from 1.2 mm to 2 mm results in a 1.67-fold increase in the mandrel torque. At the same time, an increase in the strip width from 10 mm to 18 mm leads to a 3.66-fold increase in the mandrel torque, whereas a change in the mandrel radius from 35 mm to 45 mm results in a 1.08-fold increase in the mandrel torque.

helical working element, winding, deformation, torque, technological tooling, force parameters, experimental investigations

Одержано (Received) 07.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 10.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

О. М. Іванов, доц., канд. техн. наук, **Т. Г. Лапенко**, доц., канд. техн. наук,
В. О. Крохмаль

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

e-mail: oleg.ivanov@pdau.edu.ua

Параметрично-критеріальна модель процесу садіння коренеплодів у карусельній машині

Садіння маточних коренеплодів буряків для отримання насіння потребує узгодження конструктивних і режимних параметрів карусельних садильних машин з метою забезпечення стабільності технологічного процесу та збереження посадкового матеріалу. Метою роботи є теоретичне обґрунтування процесу садіння коренеплодів у карусельній машині та розроблення параметрично-критеріальної моделі, що дозволяє визначати область допустимих параметрів її роботи. У дослідженні використано аналітичне моделювання механічних процесів, кінематичний і силовий аналіз та критеріальний підхід до оцінювання працездатності процесу садіння.

У результаті отримано інженерно-критеріальну модель процесу садіння, яка забезпечує аналітичне визначення області допустимих параметрів карусельної машини та кількісну оцінку надійності режимів її роботи. Запропоновано функцію запасу працездатності, що дозволяє ідентифікувати лімітуючі фізичні та технологічні фактори і створює основу для оптимізації режимів садіння за умови збереження стабільності процесу. Наукова новизна роботи полягає у розробленні параметрично-критеріальної моделі процесу садіння маточних коренеплодів у карусельній машині, а практична значущість — у можливості її використання при проєктуванні та раціональному налаштуванні карусельних садильних машин для насінництва буряків.

карусельна садильна машина, маточні коренеплоди буряків, процес садіння, параметрично-критеріальна модель, область допустимих параметрів, запас працездатності, аналітичне моделювання

Постановка проблеми. Садіння маточних коренеплодів буряків для отримання насіння є відповідальним технологічним етапом, що визначає рівномірність розміщення рослин, збереження посадкового матеріалу та подальшу продуктивність насінневих посівів. Для реалізації цього процесу застосовуються спеціалізовані садильні машини, робочі органи яких повинні забезпечувати поштучне дозування, стабільне утримання коренеплодів та їх контрольоване укладання у ґрунт без механічних пошкоджень.

У практиці насінництва буряків широко використовуються карусельні садильні апарати, в яких транспортування посадкового матеріалу здійснюється по круговій траєкторії із заданими геометричними та кінематичними параметрами. Особливістю таких машин є наявність взаємопов'язаних конструктивних і режимних характеристик, від узгодженості яких залежить стабільність захвату коренеплодів, відсутність їх зриву з гнізд і характер взаємодії з ґрунтом у момент скидання.

Порушення узгодженості між основними параметрами карусельного апарата призводить до виникнення ударних навантажень, нестабільності руху посадкового матеріалу та зниження якості садіння. Водночас надмірне зниження швидкісних режимів з метою уникнення пошкоджень негативно впливає на продуктивність машин, що створює протиріччя між вимогами до якості процесу та його ефективності.

У зв'язку з цим актуальною є науково-практична задача аналітичного обґрунтування режимів роботи карусельних садильних машин для буряків, яка полягає

у визначенні таких поєднань конструктивних і кінематичних параметрів, за яких процес садіння є фізично можливим, стабільним і керованим. Розв'язання цієї задачі має важливе значення для галузевого машинобудування, оскільки створює передумови для інженерного проєктування та вдосконалення карусельних садильних апаратів без надмірної залежності від багаторазових експериментальних налагоджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, присвячені садильним і трансплантаційним машинам, за останні роки характеризуються активним розвитком аналітичних, конструктивних та чисельних підходів до підвищення точності й надійності процесу садіння. Значна кількість робіт зосереджена на вдосконаленні ротаційних і карусельних механізмів, у яких аналізується вплив геометрії гнізд, траєкторій руху робочих органів і форми захватних елементів на стабільність утримання та точність укладання посадкового матеріалу. Показано, що оптимізація геометричних параметрів карусельних механізмів дозволяє зменшити відхилення положення рослин у рядку та підвищити рівномірність садіння [1, 2]. Подібні результати отримано також у дослідженнях, де встановлено залежність між геометрією гнізд і продуктивністю механізмів, однак режими роботи розглядаються як фіксовані і не аналізуються з позицій допустимих меж їх зміни [3, 4].

Паралельно з конструктивними дослідженнями активно розвивається кінематичний і динамічний аналіз садильних апаратів. Отримано аналітичні залежності для швидкостей і прискорень робочих органів, що дозволяє оцінювати інерційні навантаження на посадковий матеріал і визначати граничні режими роботи механізмів [5, 6]. Аналогічні підходи використовуються при дослідженні динамічних характеристик ротаційних механізмів за змінних швидкісних режимів [7, 8]. Разом із тим, у зазначених роботах кінематичні та динамічні залежності подаються у вигляді окремих умов без їх об'єднання в узгоджену систему параметрів, що обмежує можливість комплексної оцінки працездатності машини.

Важливим аспектом сучасних досліджень є визначення фізико-механічних властивостей коренеплодів і посадкового матеріалу, які безпосередньо впливають на допустимі режими роботи садильних машин. Експериментально встановлено граничні значення навантажень, перевищення яких призводить до механічних пошкоджень коренеплодів [9, 10]. Подальші дослідження доповнюють ці результати аналізом варіабельності геометричних і міцнісних характеристик посадкового матеріалу [11, 12]. Проте в більшості випадків отримані дані використовуються як довідкові і не інтегруються у формалізовані інженерні моделі процесу садіння.

Останніми роками зростає кількість публікацій, у яких застосовуються чисельні методи та елементи автоматизованого керування. З використанням DEM- та DEM-MBD-моделювання детально досліджується контактна взаємодія «грунт–коренеплід–машина», що дозволяє аналізувати локальні силові ефекти і прогнозувати пошкодження посадкового матеріалу [13, 14]. Показано можливість підвищення точності садіння шляхом застосування систем синхронізації приводів та алгоритмів інтелектуального керування [15, 16]. Водночас такі підходи залишаються обчислювально складними і потребують значних ресурсів, що ускладнює їх безпосереднє використання на етапі інженерного проєктування.

Узагальнення наведених досліджень свідчить, що сучасні підходи до аналізу садильних і трансплантаційних машин зосереджені на окремих конструктивних рішеннях, кінематичних залежностях або властивостях посадкового матеріалу. Отримані результати дозволяють формувати часткові рекомендації щодо вибору параметрів, однак не забезпечують узгодженого аналітичного опису процесу садіння як системи взаємопов'язаних конструктивних і режимних характеристик.

Невиришеною залишається задача аналітичного визначення таких поєднань параметрів карусельної садильної машини, за яких одночасно виконуються умови стабільного захвату, безударного транспортування та контрольованого скидання коренеплодів у ґрунт, що й зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямку.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка параметрично-критеріальної моделі процесу садіння маточних коренеплодів буряків у карусельній машині, яка дозволяє аналітично визначити область допустимих значень конструктивних і режимних параметрів, за яких забезпечуються фізична здійсненність, стабільність і керованість технологічного процесу садіння.

Об'єктом дослідження є процес садіння маточних коренеплодів буряків у карусельній садильній машині, а предметом — взаємозв'язок конструктивних і режимних параметрів, що визначають працездатність технологічного процесу. Дослідження виконано на основі аналітичного моделювання з використанням методів класичної механіки, кінематичного та силового аналізу і параметрично-критеріального підходу. Процес садіння розглянуто як фазово-структурований механічний процес, для якого сформульовано систему фізичних і технологічних обмежень. Аналіз результатів здійснено шляхом аналітичного опрацювання отриманих залежностей, визначення області допустимих параметрів та введення функції запасу працездатності, що забезпечує відтворюваність дослідження.

Виклад основного матеріалу. Процес садіння маточних коренеплодів буряків у карусельній машині розглядається як фазово-структурований механічний процес, що включає послідовні стадії захвату, примусового транспортування по круговій траєкторії та керованого скидання у ґрунт. Кожна з цих фаз характеризується власним набором силових і кінематичних факторів, а працездатність машини в цілому визначається їх сумісною реалізацією в межах одного технологічного циклу. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного аналізу окремих режимів до системного інженерного опису процесу садіння.

У межах прийнятої розрахункової схеми коренеплід масою m рухається разом із гніздом карусельного диска радіуса R , що обертається з кутовою швидкістю ω . Колова швидкість коренеплоду визначається як $v_k = \omega R$, а нормальне (центробіжне) прискорення — як $a_n = \omega^2 R$. На стадії транспортування основним чинником, що забезпечується утримання коренеплоду в гнізді, є нормальна реакція з боку робочої поверхні, яка з урахуванням інерційних і гравітаційних складових може бути подана у вигляді

$$N = m\omega^2 R - mg \cos \varphi, \quad (1)$$

де φ — поточна кутова координата гнізда.

Умова $N > 0$ визначає фізичну можливість контакту і задає нижню межу допустимих швидкісних режимів.

Окрім збереження контакту, необхідно виключити зрив коренеплоду в гнізді під дією інерційних сил. Ця вимога формулюється на основі умови сухого тертя

$$m\omega^2 R \leq \mu N, \quad (2)$$

де μ — коефіцієнт тертя між коренеплодом і поверхнею гнізда.

Разом із умовою $N > 0$ ця нерівність формує верхню межу допустимих значень кутової швидкості для заданого радіуса каруселі. Таким чином, параметри R та ω

виявляються жорстко взаємопов'язаними вже на рівні забезпечення стабільного транспортування.

Для обмеження механічних пошкоджень маточних коренеплодів вводиться динамічний критерій безударного руху

$$\omega^2 R \leq \alpha_{\text{дон}}. \quad (3)$$

Він визначає максимально допустиме нормальне прискорення з урахуванням міцності тканин коренеплоду. Даний критерій є принципово важливим саме для насіннєвих буряків, де механічні пошкодження безпосередньо впливають на схожість і продуктивність.

Контрольоване скидання коренеплоду у ґрунт відбувається у кутовій зоні, де нормальна реакція зникає, тобто за умови $N(\varphi_s) = 0$. Для забезпечення точності укладання і мінімізації ударних навантажень додатково вводиться умова кінематичної узгодженості

$$|\omega R - v_m| \leq \varepsilon, \quad (4)$$

де v_m – поступальна швидкість машини,

ε – допустиме відхилення швидкостей.

Ця умова пов'язує параметри обертального і поступального руху та формує технологічну складову моделі.

З метою узагальнення отриманих залежностей і підвищення інженерної універсальності моделі введено безрозмірні критерії, які відображають основні фізичні механізми процесу садіння.

Перший з них – інерційно-гравітаційний критерій Π_1 – характеризує співвідношення між інерційними силами, зумовленими обертальним рухом каруселі, та силою тяжіння і визначає умови стабільного контакту коренеплоду з гніздом.

$$\Pi_1 = \frac{\omega^2 R}{g}. \quad (5)$$

Другий – тертявий критерій утримання Π_2 – описує здатність контактної пари «коренеплід–гніздо» протидіяти зриву під дією інерційних навантажень.

$$\Pi_2 = \frac{m\omega^2 R}{\mu N}. \quad (6)$$

Третій – кінематичний критерій узгодженості Π_3 – відображає відносну швидкість коренеплоду у момент скидання і визначає умови безударного укладання посадкового матеріалу у ґрунт.

$$\Pi_3 = \frac{\omega R - v_m}{v_m}. \quad (7)$$

У такому поданні умови працездатності карусельної машини набувають вигляду системи критеріальних обмежень, кожне з яких має чітке фізичне та технологічне обґрунтування:

$$\Pi_1 > \cos \varphi, \quad (8)$$

$$\Pi_2 \leq 1, \quad (9)$$

$$|\Pi_3| \leq \Pi_{3, \text{дон}}, \quad (10)$$

$$\omega^2 R \leq \alpha_{\text{дон}}. \quad (11)$$

Нерівність (8) впливає з умови додатності нормальної реакції і відображає необхідність домінування інерційної складової над проекцією сили тяжіння для забезпечення стабільного контакту коренеплоду з гніздом у процесі транспортування.

Обмеження (9) є безпосереднім наслідком закону сухого тертя і визначає граничний стан, за якого утримувальна здатність контактної пари «коренеплід–гніздо» дорівнює інерційному навантаженню; перевищення цього порогу призводить до зриву коренеплоду.

Умова (10) має технологічний характер і встановлює допустимий рівень кінематичної неузгодженості між обертальним рухом каруселі та поступальним рухом машини, за якого забезпечується безударне укладання посадкового матеріалу у ґрунт.

Додаткове обмеження (11) враховує допустимий рівень динамічних навантажень, обумовлений міцністю тканин маточного коренеплоду, і запобігає їх механічному пошкодженню у процесі транспортування.

Сукупність зазначених умов визначає область допустимих параметрів

$$\Omega = \{R, \omega, v_m : \text{усі вимоги виконуються}\}. \quad (12)$$

Це є аналітичним образом працездатних режимів карусельної машини.

Введена область допустимих параметрів Ω є результатом одночасної дії всіх критеріальних обмежень і, таким чином, має перетинний характер у параметричному просторі (R, ω, v_m) .

Геометрично кожне з обмежень формує власну граничну поверхню, що відокремлює працездатні режими від непрацездатних, тоді як сама область Ω визначається як внутрішня частина простору, обмежена сукупністю цих поверхонь. Такий вигляд області є наслідком того, що порушення будь-якого з критеріїв — стабільності контакту, утримання коренеплоду, допустимого рівня динамічних навантажень або кінематичної узгодженості — призводить до втрати працездатності машини незалежно від виконання інших умов.

З інженерної точки зору форма області Ω відображає компроміс між швидкісними та геометричними параметрами карусельної машини. Збільшення кутової швидкості ω розширює зону стабільного контакту, однак одночасно звужує область допустимих режимів за рахунок обмежень на тертя і допустиме прискорення. Аналогічно, збільшення радіуса R знижує інерційні навантаження при фіксованій швидкості обертання, але впливає на кінематичну узгодженість із поступальним рухом машини. У результаті область Ω набуває обмеженого та асиметричного вигляду, що відображає складний характер взаємодії конструктивних і режимних параметрів у процесі садіння.

Таким чином, область допустимих параметрів Ω не є довільною, а формується виключно фізичними та технологічними закономірностями процесу садіння. Її аналітичне визначення дозволяє не лише встановити межі працездатності карусельної машини, але й створює основу для подальшого інженерного аналізу та оптимізації параметрів у межах гарантовано стабільних режимів роботи.

Для кількісної оцінки надійності конкретних режимів введено функцію запасу працездатності

$$S(R, \omega, v_m) = \min \{S_1, S_2, S_3, S_4\}, \text{ де} \quad (13)$$

$$S_1 = m\omega^2 R - mg \cos \varphi, \quad (14)$$

$$S_2 = \mu N - m\omega^2 R, \quad (15)$$

$$S_3 = \alpha_{\text{дон}} - \omega^2 R, \quad (16)$$

$$S_4 = \varepsilon - |\omega R - v_m|. \quad (17)$$

У складі функції запасу працездатності кожна з величин S_i має самостійне фізичне та інженерне трактування і відповідає окремому механізму можливої втрати працездатності карусельної машини. Зокрема, складова (14) характеризує запас стабільності контакту коренеплоду з гніздом у процесі транспортування. Додатне значення S_1 означає, що інерційна складова нормальної реакції переважає проєкцію сили тяжіння і контакт між коренеплодом та робочою поверхнею зберігається. Зменшення S_1 до нуля відповідає граничному стану втрати контакту, за якого транспортування коренеплоду стає неможливим.

Складова (15) відображає запас утримання коренеплоду в гнізді за умов сухого тертя. Вона показує різницю між максимально можливою утримувальною силою тертя та інерційною силою, що прагне зірвати коренеплід. При $S_2 > 0$ зрив коренеплоду не відбувається, тоді як $S_2 = 0$ визначає граничний режим, за якого контактна пара «коренеплід–гніздо» працює на межі своїх можливостей.

Складова (16) характеризує запас за допустимим рівнем динамічних навантажень і пов'язана з міцністю тканин маточного коренеплоду. Додатне значення S_3 означає, що нормальне прискорення, яке виникає внаслідок обертального руху каруселі, не перевищує допустимих значень. Зменшення S_3 до нуля свідчить про досягнення граничного рівня навантажень, за якого зростає ризик механічного пошкодження посадкового матеріалу.

Складова (17) має технологічний характер і відображає запас кінематичної узгодженості між обертальним рухом каруселі та поступальним рухом машини у момент скидання коренеплоду. Додатне значення S_4 відповідає режимам безударного укладання посадкового матеріалу у ґрунт, тоді як $S_4 = 0$ визначає граничний стан, за якого відносна швидкість контакту досягає максимально допустимого рівня.

Таким чином, кожна складова S_i відповідає окремому фізичному або технологічному механізму порушення процесу садіння, а мінімальне значення серед них визначає загальний запас працездатності режиму роботи карусельної машини. Такий підхід дозволяє не лише ідентифікувати критичний фактор для конкретного режиму, але й цілеспрямовано впливати на параметри машини з метою підвищення надійності та якості процесу садіння.

Додатне значення функції запасу працездатності S відповідає режимам, що знаходяться всередині області допустимих параметрів і характеризуються наявністю запасу за всіма критеріями. Значення $S = 0$ визначає граничні режими, які відповідають межі області допустимих параметрів та характеризують перехід до втрати працездатності за одним із фізичних або технологічних механізмів. Це дозволяє перейти від бінарної оцінки працездатності до кількісного аналізу запасів за кожним критерієм і визначати лімітуючий фактор для конкретного режиму роботи машини.

Отримана інженерно-критеріальна модель створює основу для оптимізаційної постановки задачі.

Продуктивність карусельної машини може бути подана у вигляді

$$Q = kv_m, \quad (18)$$

де k – коефіцієнт, що враховує кількість гнізд та конструктивні параметри машини. Оптимальний режим роботи визначається як розв’язок задачі

$$Q(R, \omega, v_m) \rightarrow \max \text{ за умови } S(R, \omega, v_m) > 0.$$

Це дозволяє поєднати вимоги до високої продуктивності з обмеженнями стабільності та технологічної надійності процесу садіння.

Для узагальнення отриманих аналітичних залежностей та забезпечення однозначної інтерпретації введених критеріїв доцільно встановити їхній зв’язок із фізичними механізмами процесу садіння. Оскільки кожен з критеріїв параметрично-критеріальної моделі відображає окремий аспект взаємодії коренеплоду з робочими органами карусельної машини, систематизація цих відповідей дозволяє чітко ідентифікувати роль кожного критерію у забезпеченні працездатності процесу. У наведеній нижче таблиці 1 представлено відповідність безрозмірних і розрахункових критеріїв конкретним фізичним явищам та їх технологічному значенню з точки зору стабільності, керованості і надійності процесу садіння маточних коренеплодів буряків.

Таблиця 1 – Відповідність критеріїв фізичним явищам процесу садіння

Критерій	Вираз	Фізичне явище	Технологічне значення
P_1	$\frac{\omega^2 R}{g}$	Інерційно-гравітаційний баланс	Стабільність контакту
P_2	$\frac{m\omega^2 R}{\mu N}$	Умови тертя в гнізді	Відсутність зриву
P_3	$\frac{\omega R - v_m}{v_m}$	Кінематична сумісність	Безударне скидання
$\alpha_{оп}$	$\omega^2 R$	Динамічне навантаження	Збереження коренеплоду
S	$\min S_i$	Запас працездатності	Інженерна надійність

Джерело: розроблено автором

Наведена відповідність критеріїв фізичним явищам дозволяє розглядати параметрично-критеріальну модель як інтегровану систему взаємопов’язаних обмежень, у якій кожен критерій формує окремий напрям контролю працездатності процесу садіння.

Такий підхід забезпечує можливість одночасного врахування силових, кінематичних і технологічних факторів без їх ізольованого аналізу, що є принципово важливим для карусельних садильних машин. У результаті критерії набувають не лише діагностичної, але й проектно-орієнтованої функції, оскільки дозволяють цілеспрямовано оцінювати вплив зміни конструктивних і режимних параметрів на стабільність та надійність процесу садіння.

Висновки. Отримана параметрично-критеріальна модель принципово відрізняється від наявних підходів тим, що дозволяє аналітично враховувати всі ключові фізичні механізми процесу садіння у межах єдиної системи обмежень. На

відміну від моделей, орієнтованих на окремі кінематичні або конструктивні аспекти, запропонований підхід формує чітко визначену область допустимих параметрів, у межах якої процес є фізично здійсненним і технологічно керованим.

Введення функції запасу працездатності дозволяє перейти від формального визначення граничних режимів до інженерного аналізу надійності роботи машини. Це особливо важливо для карусельних садильних апаратів, де незначні відхилення параметрів можуть призводити до різкої втрати якості садіння або пошкодження посадкового матеріалу.

Оптимізаційна постановка задачі демонструє можливість використання моделі не лише для перевірки працездатності, але й для раціонального вибору параметрів, що забезпечують максимальну продуктивність за умови збереження стабільності процесу.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для інженерного проектування, модернізації та раціонального налаштування карусельних садильних машин для насінництва буряків без необхідності багаторазових експериментальних випробувань. Аналітичне визначення області допустимих параметрів і запасу працездатності дозволяє обґрунтовано вибирати конструктивні рішення та режими роботи на етапі проектування.

Перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку пов'язані з розширенням запропонованої параметрично-критеріальної моделі за рахунок урахування стохастичної мінливості геометричних і фізико-механічних властивостей коренеплодів, дослідження впливу профілю гнізда та закону зміни кутової швидкості каруселі, а також інтеграції отриманої аналітичної моделі з чисельними методами та системами автоматизованого керування процесом садіння.

Список літератури

1. Ye B. L., Zeng G. J., Deng B., Yang C. L., Liu J. K., Yu G. H. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13(3). Pp. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20201303.5647>.
2. Wang L., Lin Z., Zhou Z., Yu G., Yang Z., Yu X., Ye B. Design and experiment of a vegetable plug seedling planting mechanism combining non-circular gear system and multi-link. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2025. Vol. 18(3). Pp. 124–134. DOI: [10.25165/ijabe.20251803.9229](https://doi.org/10.25165/ijabe.20251803.9229).
3. Reza M. N., Islam M. N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung S.-O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. 2021. Vol. 9(9). Article 183. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9090183>.
4. Wen Y., Zhang J., Tian J., Duan D., Zhang Y., Tan Y., Yuan T., Li X. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. Article 106017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106017>.
5. Ji J., Chen K., Jin X., Wang Z., Dai B., Fan J., Lin X. High-efficiency modal analysis and deformation prediction of a rice transplanter based on effective independent method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 168. Article 105126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105126>.
6. Ye B. L., Zeng G. J., Deng B., Yang C. L., Liu J. K., Yu G. H. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13(3). Pp. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20201303.5647>.
7. Sun L., Chen X., Wu C., Zhang G., Xu Y. Synthesis and design of rice pot seedling transplanting mechanism based on labeled graph theory. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 143. Pp. 249–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.021>.
8. Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the impact damage characteristics of transplanting seedlings based on pressure distribution measurement system. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8(11). Article 1080. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111080>.
9. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling soil–plant–machine dynamics using discrete element method: a review. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. Article 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>.

10. Kim Y.-S., Lee S.-D., Baek S.-M., Baek S.-Y., Jeon H.-H., Lee J.-H., Siddique M. A. A., Kim Y.-J., Kim W.-S., Yi S., Sim T., Choi Y.-S. Development of DEM–MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 202. Article 107405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107405>.
11. Tian Z., Li Y., Fan J., Yang X. Modeling the mechanical properties of root–substrate composites for transplanting applications. *Agriculture*. 2024. Vol. 14(5). Article 651. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14050651>.
12. Kołodziej P., Stropiek Z., Gołacki K. Mechanical properties of sugar beet roots under impact loading conditions. *Materials*. 2023. Vol. 16(3). Article 1281. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16031281>.
13. Nedomová Š., Kumbar V., Pytel R., Buchar J. Mechanical properties of sugar beet root during storage. *International Agrophysics*. 2017. Vol. 31. Pp. 507–513. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0081>.
14. Zhou M., Shan Y. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13(4). Pp. 85–92. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201304.5404>.
15. Sri M., et al. Experimental safety analysis for transplanting device of 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Article 1890. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081890>.
16. Cheng B. Current status and analysis of key technologies in automatic transplanters for vegetables in China. *Agriculture*. 2024. Vol. 14. Article 2168. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>.

References

1. B. L. Ye, G. J. Zeng, B. Deng, C. L. Yang, J. K. Liu, and G. H. Yu, «Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 70–78, 2020. doi: 10.25165/ijabe.20201303.5647.
2. L. Wang, Z. Lin, Z. Zhou, G. Yu, Z. Yang, X. Yu, and B. Ye, «Design and experiment of a vegetable plug seedling planting mechanism combining non-circular gear system and multi-link», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 124–134, 2025. doi: 10.25165/j.ijabe.20251803.9229.
3. M. N. Reza, M. N. Islam, M. Chowdhury, M. Ali, S. Islam, S. Kiraga, S.-J. Lim, I.-S. Choi, and S.-O. Chung, «Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter», *Machines*, vol. 9, no. 9, article 183, 2021. doi: 10.3390/machines9090183.
4. Y. Wen, J. Zhang, J. Tian, D. Duan, Y. Zhang, Y. Tan, T. Yuan, and X. Li, «Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 182, article 106017, 2021. doi: 10.1016/j.compag.2021.106017.
5. J. Ji, K. Chen, X. Jin, Z. Wang, B. Dai, J. Fan, and X. Lin, «High-efficiency modal analysis and deformation prediction of a rice transplanter based on effective independent method», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 168, article 105126, 2020. doi: 10.1016/j.compag.2019.105126.
6. B. L. Ye, G. J. Zeng, B. Deng, C. L. Yang, J. K. Liu, and G. H. Yu, «Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 70–78, 2020. doi: 10.25165/j.ijabe.20201303.5647.
7. L. Sun, X. Chen, C. Wu, G. Zhang, and Y. Xu, «Synthesis and design of rice pot seedling transplanting mechanism based on labeled graph theory», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 143, pp. 249–261, 2017. doi: 10.1016/j.compag.2017.10.021.
8. H. Bai, X. Li, F. Zeng, J. Cui, and Y. Zhang, «Study on the impact damage characteristics of transplanting seedlings based on pressure distribution measurement system», *Horticulturae*, vol. 8, no. 11, article 1080, 2022. doi: 10.3390/horticulturae8111080.
9. A. Walunj, Y. Chen, Y. Tian, and Z. Zeng, «Modeling soil–plant–machine dynamics using discrete element method: a review», *Agronomy*, vol. 13, article 1260, 2023. doi: 10.3390/agronomy13051260.
10. Y.-S. Kim, S.-D. Lee, S.-M. Baek, S.-Y. Baek, H.-H. Jeon, J.-H. Lee, M. A. A. Siddique, Y.-J. Kim, W.-S. Kim, S. Yi, T. Sim, and Y.-S. Choi, «Development of DEM–MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 202, article 107405, 2022. doi: 10.1016/j.compag.2022.107405.
11. Z. Tian, Y. Li, J. Fan, and X. Yang, «Modeling the mechanical properties of root–substrate composites for transplanting applications», *Agriculture*, vol. 14, no. 5, article 651, 2024. doi: 10.3390/agriculture14050651.
12. P. Kołodziej, Z. Stropiek, and K. Gołacki, «Mechanical properties of sugar beet roots under impact loading conditions», *Materials*, vol. 16, no. 3, article 1281, 2023. doi: 10.3390/ma16031281.

13. Š. Nedomová, V. Kumbar, R. Pytel, and J. Buchar, «Mechanical properties of sugar beet root during storage», *International Agrophysics*, vol. 31, pp. 507–513, 2017. doi: 10.1515/intag-2016-0081.
14. M. Zhou and Y. Shan, «Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 85–92, 2020. doi: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404.
15. M. Sri *et al.*, «Experimental safety analysis for transplanting device of 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter», *Agriculture*, vol. 12, article 1890, 2022. doi: 10.3390/agriculture12081890.
16. B. Cheng, «Current status and analysis of key technologies in automatic transplanters for vegetables in China», *Agriculture*, vol. 14, article 2168, 2024. doi: 10.3390/agriculture14122168.

Oleg Ivanov, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Taras Lapenko**, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Vladislav Krokmal**
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Parametric–critical Model of the Root Crop Planting Process in a Carousel Machine

Planting of mother sugar beet roots for seed production is a critical technological operation that requires stable machine performance and preservation of planting material integrity. Carousel-type planting machines are commonly used due to their high productivity; however, effective coordination of their constructive and operating parameters remains a complex engineering challenge. Insufficient coordination leads to instability of root holding, mechanical damage, inaccurate placement in soil, and deterioration of planting quality, which determines the relevance of this study.

The purpose of the work is to develop a parametric–critical model of the planting process of mother sugar beet roots in a carousel planting machine that enables analytical determination of admissible constructive and operating parameter ranges ensuring physical feasibility, stability, and controllability of the technological process. The research is theoretical and based on analytical modeling. Methods of classical mechanics, kinematic and force analysis, and a critical approach to assessing process operability are applied. The planting process is considered as a phase-structured mechanical system comprising gripping, forced transportation along a circular trajectory, and controlled release into the soil, each stage being governed by specific physical and technological constraints.

As a result, an integrated parametric–critical model has been developed that combines inertial, gravitational, frictional, kinematic, and technological factors into a unified system of operability conditions. An admissible parameter domain has been analytically defined, representing operating regimes in which stable gripping, non-impact transportation, and controlled placement of roots are simultaneously ensured. A functional measure of operability margin has also been introduced, enabling quantitative evaluation of regime reliability and identification of limiting physical or technological mechanisms.

The scientific novelty of the work lies in the development of an engineering-oriented parametric–critical model that provides an analytical description of the admissible operating domain for a carousel planting machine and introduces a quantitative operability margin for reliability assessment. The practical significance of the results is associated with their application in the design, modernization, and rational adjustment of carousel planting machines for sugar beet seed production without extensive experimental testing. Further research may focus on accounting for variability in root properties, improving working element design, and integrating the model into automated control and optimization systems.

carousel planting machine; mother sugar beet roots; planting process; parametric–critical model; admissible parameter domain; operability margin; analytical modeling

Одержано (Received) 16.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 19.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

О. М. Кобець, доц., канд. техн. наук, **Є. І. Лепеть**

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: sadjem1990@gmail.com

Лабораторні дослідження зміни коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини дефлекторним розбризкувачем при внесенні агрохімікатів

Розглянуто результати лабораторних досліджень впливу робочого тиску, висоти штанги та діаметра дросельного отвору на коефіцієнт варіації поперечного розподілу рідини дефлекторними розбризкувачами при внесенні рідких мінеральних добрив. Встановлено оптимальні параметри, що забезпечують мінімальне значення коефіцієнта варіації та підвищують рівномірність внесення добрив. Отримані моделі можуть бути використані для вдосконалення конструкцій розбризкувачів. **дефлекторний розбризкувач, карбамід-аміачна суміш, рідкі мінеральні добрива, агрохімікати, оптимізація, коефіцієнт варіації, рівномірність розподілу, тиск подачі, висота штанги**

Постановка проблеми. Підвищення ефективності використання мінеральних добрив є одним із ключових напрямів розвитку сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур. За останні роки значну частку займає карбамід-аміачна суміш (КАС), яка завдяки рідкій формі забезпечує можливість точного дозування та рівномірного розподілу по поверхні ґрунту або рослин. Водночас ефективність дії КАС значною мірою залежить від рівномірності його внесення, яка визначається технічними характеристиками розпилювальної системи обприскувача.

Одним із найважливіших показників якості розподілу робочої рідини у поперечному напрямку є коефіцієнт варіації (CV), який характеризує ступінь рівномірності подачі рідини по ширині захвату обприскувача. Збільшення значення коефіцієнта варіації свідчить про нерівномірне внесення, що призводить до надлишкового живлення окремих ділянок поля і недостатнього – інших.

Визначення закономірностей зміни коефіцієнта варіації при різних режимах подачі рідини є важливим науковим і практичним завданням, оскільки дозволяє обґрунтувати режими роботи обприскувального обладнання для забезпечення високої точності внесення агрохімікатів.

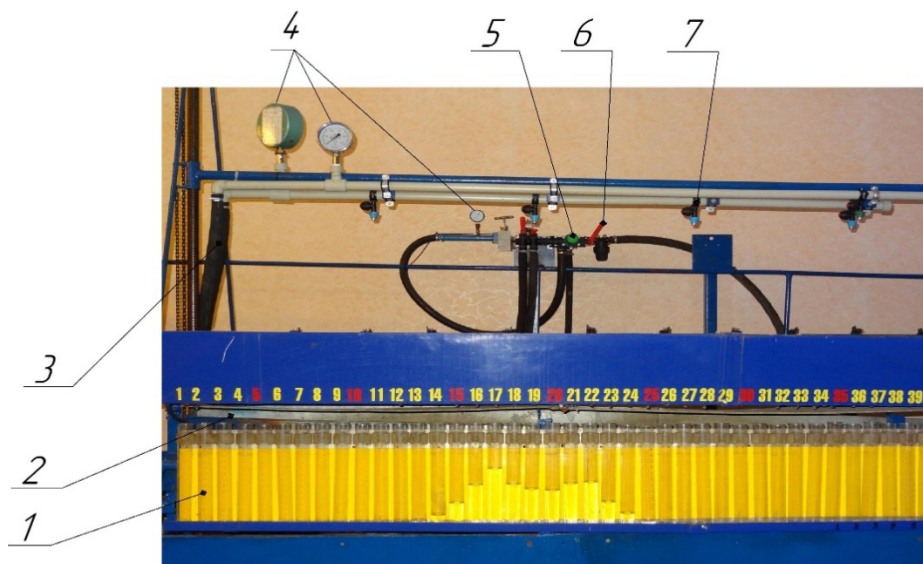
Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика рівномірності поперечного розподілу робочої рідини обприскувачами при внесенні агрохімікатів, отримала значну увагу в сучасних дослідженнях. Як зазначають [1,2], їх економічна ефективність застосування безпосередньо залежить від точності дозування та рівномірності внесення, що визначається, зокрема, конструкцією розпилювача, його робочими параметрами і стабільністю факела розпилю. Автори підкреслюють, що нерівномірність поперечного розподілу призводить до зниження коефіцієнта використання азоту, підвищення втрат поживних речовин і появи зон дефіциту чи надлишку добрив.

У працях [3-5] проведено комплексні дослідження зміни коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини для одно- та двопотокових розпилювачів. Результати показали, що конструктивні параметри розпилювача, тиск подачі та висота штанги мають істотний вплив на рівномірність розподілу.

Серія досліджень показує [6-8], що робочий тиск суттєво впливає на рівномірність розподілу: у низьких діапазонах тиску спостерігається збільшення середнього розміру крапель і нерівномірність факела, тоді як надмірне підвищення тиску може призвести до турбулентності і локальних коливань факела, що знову підвищує CV.

Постановка завдання. Попри значну кількість наукових праць, питання роботи дефлекторних розбризкувачів під час внесення КАС залишається недостатньо дослідженим. У наявних джерелах бракує систематизованих лабораторних експериментів, що враховують вплив тиску, висоти штанги та конструктивних параметрів на рівномірність розподілу. Це визначає актуальність проведення детальних стендових випробувань для встановлення закономірностей зміни коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини.

Виклад основного матеріалу. Дослідження рівномірності розподілу рідини в лабораторних умовах за допомогою гідравлічного стенда побудованого у відповідності до стандарту [9] (рис.1).



1 – мірні стакани; 2 – жолоб; 3 – трубопроводи; 4 – манометри; 5 – регулятор тиску;
6 – важіль перемикання напрямку потоку рідини; 7 – розбризкувач

Рисунок 1 – Гідравлічний стенд

Джерело: розроблено авторами на підставі [9]

Стенд складається зі стола, розділеного ребрами на канали шириною 0,1 м, блоку мірних циліндрів 1 для збору рідини з кожного каналу, насосної установки (на рис. не показано), яка забезпечує подачу рідини до розбризкувачів під тиском, рекомендованим виробником для кожного досліджуваного розбризкувача, що контролюється манометром 4, а також штанги, змонтованої над ребристою поверхнею стола, з можливістю зміни висоти. Штанга обладнана затискачами, що дають можливість фіксувати кут встановлення залежно від умов експерименту.

Для порівняння були обрані дефлекторні розбризкувачі: РД-4,0 (рис 2а) [10, с. 21] та розроблений комбінований (рис. 2б) [11]. Розбризкувачі були встановлені в штанзі стенду з відстанню 0,5 м. Середня температура води, використаної для випробувань, складала 17 °С.



а – РД-4,0; б – комбінований

Рисунок 2 – Дефлекторні розбризкувачі

Джерело: розроблено авторами

В результаті аналізу наукових публікацій [1-8] для проведення експерименту були обрані фактори, які мають найбільший вплив: робочий тиск, висота штанги обприскувача над вимірювальним столом та змінні дросельні заслінки. Межі їх варіювання були прийняті у відповідності до рекомендацій [1,2] та наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фактори та межі варіювання

Позначення	Фактор	Рівень факторів			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
X_1	Тиск p , МПа	0,2	0,25	0,3	0,05
X_2	Висота штанги h , м	0,5	0,7	0,9	0,9
X_3	Діаметр дроселя d , мм	1,0	1,5	2,0	0,5

Джерело: розроблено авторами

Для обробки отриманих експериментальних даних скористались методом Бокса-Бенкіна [12]. Адекватність отриманої математичної моделі перевіряли за допомогою F-критерію Фішера [13], що дозволяє оцінити відповідність моделі експериментальним даним. Перевірку здійснювали при п'ятивідсотковому рівні значущості, що відповідає довірчій ймовірності 0,95. У результаті розрахунків встановлено, що значення F-критерію для РД-4,0 $F_{\text{кр}}=5,9$, а для комбінованого $F_{\text{кр}}=3,7$. Отримані значення не перевищують табличних, що свідчить про адекватність математичної моделі.

Після статистичного опрацювання результатів експериментальних досліджень було отримано рівняння регресії другого порядку, які адекватно відображають вплив основних факторів на досліджувані показники процесу. Зазначені рівняння дозволяють кількісно оцінити зміну вихідних параметрів залежно від варіації вхідних факторів, а також визначити їх оптимальні значення. Розрахунки проводились з застосуванням програмного середовища Wolfram Cloud [14].

Рівняння регресії мають наступну форму:

- для РД-4,0

$$\psi = 26,51 + 0,67 \cdot d^2 + 0,60 \cdot d - 2,9 \cdot h \cdot d - 19,34 \cdot h + 11,49 \cdot h^2 - 20,94 \cdot p$$

- для комбінованого

$$\psi = 19,97 + 0,45 \cdot d + 10,93 \cdot h^2 - 22,87 \cdot h - 7,5 \cdot p \cdot h + 46,5 \cdot p - 125 \cdot p^2$$

Для наочного представлення та інтерпретації отриманих експериментальних даних були побудовані поверхні відгуку, наведені на рисунках 3-5. Вони відображають взаємозв'язок між основними досліджуваними факторами – робочим тиском p , висотою розташування штанги h та діаметром дросельного отвору d і показником рівномірності розподілу рідини, вираженим через коефіцієнт варіації ψ .

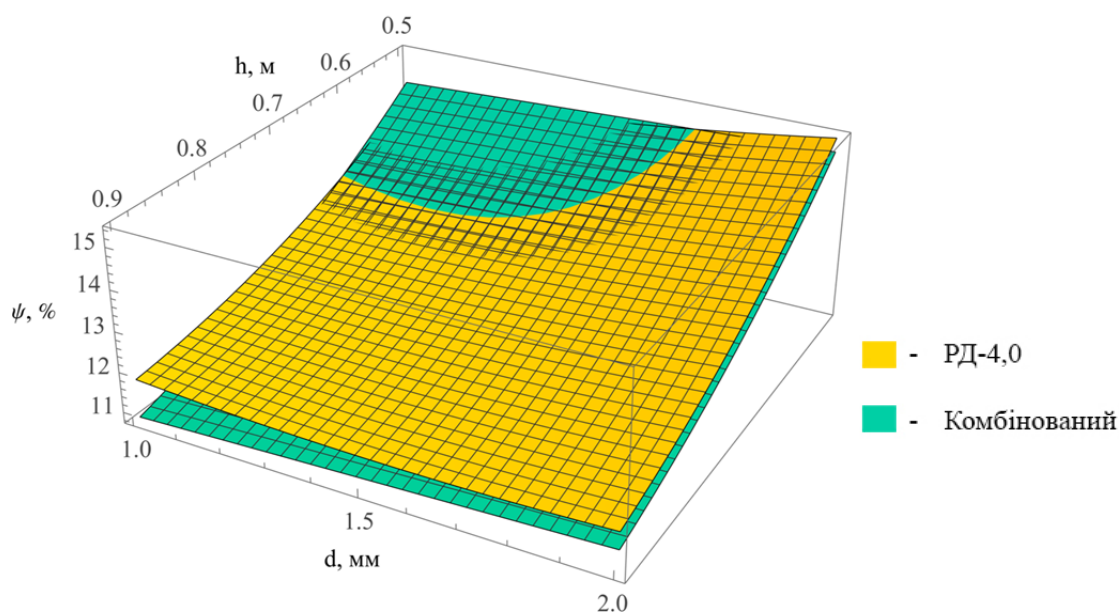


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини від h та d
 Джерело: розроблено авторами

На графіку показано залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини від висоти штанги (h , м) та діаметра змінного дроселя (d , мм). Поверхня має ядро виражену динаміку зниження коефіцієнта варіації при збільшенні висоти як для базового так і для проектного розбризкувача. Щодо діаметра дроселя то найменші показники коефіцієнта варіації для базового спостерігаються при $d = 1,5$ мм, а для проектного $d = 1,0$ мм.

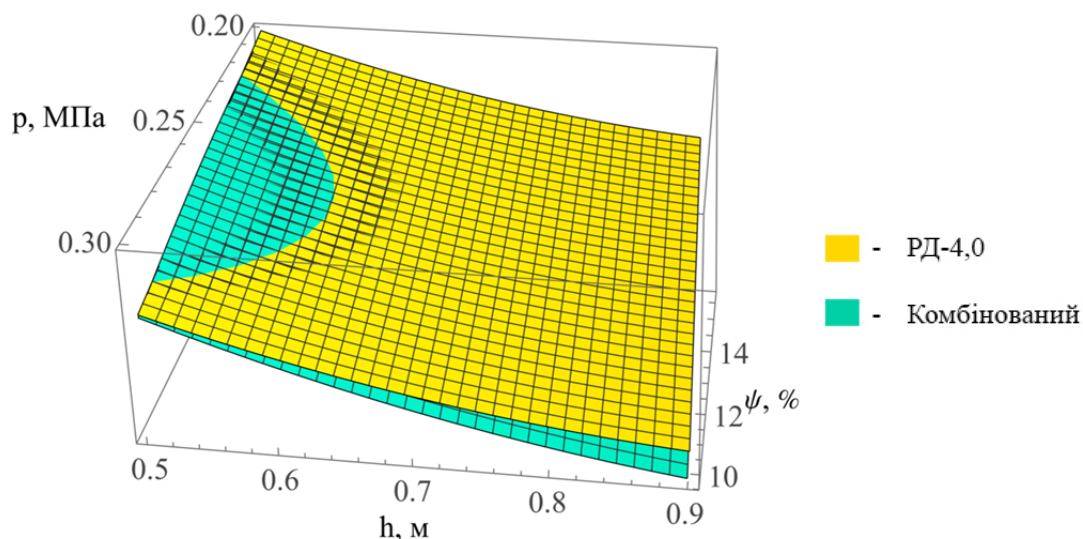


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини від p та h
 Джерело: розроблено авторами

Поверхня графіку має характерну зону мінімуму при максимальних значеннях тиску p та висоті штанги близько h . За нижчого тиску спостерігається збільшення коефіцієнта варіації через укрупнення крапель і зменшення щільності факела розпилу. Зі зменшенням висоти штанги спостерігається збільшення коефіцієнта варіації, оскільки відбувається значне перекриття суміжних факелів.

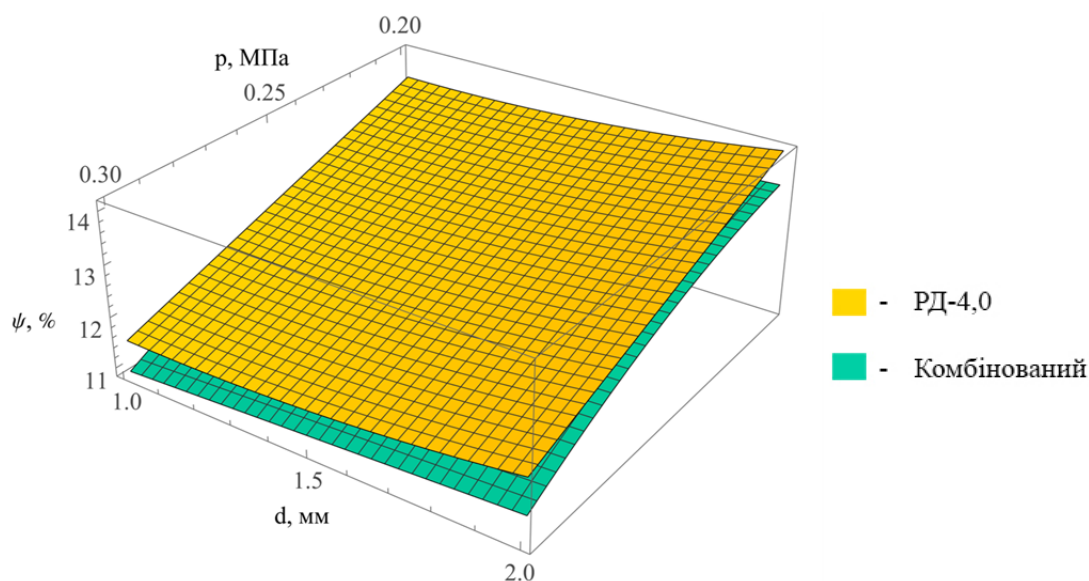


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта варіації поперечного розподілу рідини від p та d
Джерело: розроблено авторами

Поверхня графіку має плавний характер із вираженою зоною мінімуму при максимальних значеннях тиску p . Зі збільшенням діаметра дроселя d для комбінованого розбризкувача збільшується коефіцієнт варіації. Однак для базового розпилювача мінімальне значення коефіцієнта варіації досягається при $d=1,5$ мм.

Мінімальні значення коефіцієнта варіації ψ досягається за наступних досліджуваних факторів

- для РД-4,0

$\psi=10,5$, при $p=0,3$ МПа, $h=0,9$ м, $d=1,5$ мм.

- для комбінованого

$\psi=9,37$, при $p=0,3$ МПа, $h=0,9$ м, $d=1,0$ мм.

Висновки. Проведені лабораторні дослідження підтвердили істотний вплив основних досліджуваних факторів – тиску подачі, висоти штанги та діаметра дросельного отвору на рівномірність поперечного розподілу рідини дефлекторними розбризкувачами при внесенні агрохімікатів. Зі збільшенням робочого тиску до 0,3 МПа спостерігається зниження коефіцієнта варіації, що свідчить про підвищення рівномірності розподілу. При низьких значеннях тиску збільшується розмір крапель і погіршується стабільність факела розпилу. Висота розміщення штанги істотно впливає на форму і перекриття факелів. Оптимальна висота для забезпечення мінімального коефіцієнта варіації становить близько 0,9 м, за якої формується рівномірне перекриття сусідніх струменів без утворення зон надлишкового або недостатнього зволоження. Збільшення діаметра змінного дроселя призводить до зростання коефіцієнта варіації, що пояснюється зменшенням стабільності потоку рідини. Найкращі показники рівномірності для базового розбризкувача РД-4,0 досягнуто при $d=1,5$ мм, а для комбінованого – при $d=1,0$ мм.

Отримані рівняння регресії другого порядку адекватно описують залежність коефіцієнта варіації від досліджуваних факторів, що підтверджено перевіркою за F -критерієм Фішера.

Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення технологічних налаштувань та конструкції дефлекторних розбризкувачів, спрямованих на підвищення рівномірності внесення і зниження втрат агрохімікатів.

Список літератури

1. Крамарьов С.М., Крамарьов О.С., Демиденко В.Г., Хорошун К.О., Пісоцький С.С., Бондарь В.Ю., Рубан С.М., Цуркан К.П. Економічна ефективність використання карбамід-аміачних сумішей (КАС) в сучасних системах удобрення сільськогосподарських культур. Дніпро: Нова ідеологія, 2020. 195 с.
2. TeeJet Technologies. A User's Guide to Spray Technology (LI-TJ416). Wheaton, IL: TeeJet Technologies. 2023. [PDF]. Доступно за адресою: http://teejet.com/en/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/product-market-bulletin/li-tj416_user-guide-to-spray-technology.pdf
3. Nowakowski T., Chlebowski J., Kamiński J. Changes of coefficient of variation of transverse liquid distribution for single and dual stream atomizers. *Engineering for Rural Development*. 2017. Vol. 16. P. 1434-1439. DOI: 10.22616/ERDev2017.16.N324.
4. Nuytens D., Baetens K., De Schampheleire M., Sonck B. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 2007. Vol. 97, No. 3. C. 333-345. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001.
5. Parafiniuk S., Nowakowski T., Koszel M., Chlebowski J., Findura P. Influence of chosen working parameters of sprayer on coefficient of variation of transverse liquid distribution for twin fan nozzle. *Acta Technologica Agriculturae*. 2024. Vol. 27, No. 3. P. 173–178. DOI: 10.2478/ata-2024-0023.
6. Dorr G.J., Hewitt A.J., Adkins S.W., Hanan J., Zhang H., Noller B. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. *Crop Protection*. 2013. Vol. 53. P. 109-117. DOI: 10.1016/j.cropro.2013.06.017.
7. Marangoni Junior A., Costa Ferreira M. Influence of working pressure and spray nozzle on the distribution of spray liquid in manual backpack sprayers. *Arquivos do Instituto Biológico*. 2019. Vol. 86, No. 2. P. e0442018. DOI: 10.1590/1808-1657000442018.
8. Szewczyk A., Łuczycka D., Lejman K. 2011: Wpływ parametrów opryskiwania wybranym rozpylaczem dwustrumieniowym na stopień pokrycia opryskiwanych obiektów. (The impact of spraying parameters of chosen dual stream atomizer on the cover degree of spraying objects). *Inżynieria Rolnicza* 4(129): pp. 265-271 (in Polish).
9. ДСТУ ISO 5682-2:2019. Устаткування для захисту рослин. Обприскувальне устаткування. Частина 2. Методи випробовування гідралічних обприскувачів. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 11 с.
10. Мележик О. І. Покращення дисперсності розпилення пестицидів: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Мележик Олександр Іванович ; Дніпропетр. держ. аграр. ун-т. Дніпро, 2009. 180
11. Заявка u 2025 04632 Україна. Дефлекторний розпилювач / О. М. Кобець, Є. І. Лепеть (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ «Дніпровський державний аграрно-економічний. ун-т». № u 2025 04632; заявл. 22.09.25.
12. Кисельов О. В., Комарова І. Б., Мілько Д. О., Бакарджієв Р. О.. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): навч. посіб.; за заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 1181 с.
13. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
14. Wolfram S. *An Elementary Introduction to the Wolfram Language* (3rd ed.). [електронний ресурс]. Wolfram Research. Доступно за адресою: <https://www.wolfram.com/language/elementary-introduction/3rd-ed/>

References

1. Kramarov, S. M., Kramarov, O. S., Demydenko, V. H., Khoroshun, K. O., Pisotskyi, S. S., Bondar, V. Yu., Ruban, S. M., & Tsurkan, K. P. (2020). *Economic efficiency of using urea-ammonium mixtures (UAN) in modern fertilization systems for agricultural crops*. Dnipro: Nova Ideolohiia [in Ukrainian].
2. TeeJet Technologies. (2023). *A User's Guide to Spray Technology (LI-TJ416)* [PDF]. Wheaton, IL: TeeJet Technologies. Retrieved from http://teejet.com/en/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/product-market-bulletin/li-tj416_user-guide-to-spray-technology.pdf
3. Nowakowski, T., Chlebowski, J., & Kamiński, J. (2017). Changes of coefficient of variation of transverse liquid distribution for single and dual stream atomizers. *Engineering for Rural Development*, 16, 1434–1439. <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N324>
4. Nuytens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M., & Sonck, B. (2007). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*, 97(3), 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.001>
5. Parafiniuk, S., Nowakowski, T., Koszel, M., Chlebowski, J., & Findura, P. (2024). Influence of chosen working parameters of sprayer on coefficient of variation of transverse liquid distribution for twin fan nozzle. *Acta Technologica Agriculturae*, 27(3), 173–178. <https://doi.org/10.2478/ata-2024-0023>

6. Dorr, G. J., Hewitt, A. J., Adkins, S. W., Hanan, J., Zhang, H., & Noller, B. (2013). A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. *Crop Protection*, 53, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.017>
7. Marangoni Junior, A., & da Costa Ferreira, M. (2019). Influence of working pressure and spray nozzle on the distribution of spray liquid in manual backpack sprayers. *Arquivos do Instituto Biológico*, 86(2), e0442018. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000442018>
8. Szewczyk, A., Łuczyska, D., & Lejman, K. (2011). Wpływ parametrów opryskiwania wybranym rozpylaczem dwustrumieniowym na stopień pokrycia opryskiwanych obiektów [The impact of spraying parameters of chosen dual stream atomizer on the cover degree of spraying objects]. *Inżynieria Rolnicza*, 4(129), 265–271 [in Polish].
9. Ukrainian Research and Training Center of Standardization, Certification and Quality. (2019). *DSTU ISO 5682-2:2019 Equipment for plant protection. Spraying equipment. Part 2: Test methods for hydraulic sprayers*. Kyiv: UkrNDNC [in Ukrainian].
10. Melezhyk, O. I. (2009). *Improving the dispersion of pesticide spraying* (Candidate's thesis, Dnipro State Agrarian University). Dnipro [in Ukrainian].
11. Kobets, O. M., & Lepet, Ye. I. (2025). *Deflector sprayer* (Utility model application No. u 2025 04632). Dnipro State Agrarian and Economic University. Filed September 22, 2025 [in Ukrainian].
12. Kyselov, O. V., Komarova, I. B., Milko, D. O., & Bakardzhiiev, R. O. (2017). *Statistical processing and presentation of experimental research results (based on the experience of writing dissertations): textbook*. Zaporozhzhia: STATUS, Institute of Mechanization of Animal Husbandry of NAAS [in Ukrainian].
13. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes: textbook*. Kyiv: Ahrarna nauka. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> ISBN 978-966-540-584-9 [in Ukrainian].
14. Wolfram, S. (2023). *An Elementary Introduction to the Wolfram Language* (3rd ed.) [Electronic resource]. Wolfram Research. Retrieved from <https://www.wolfram.com/language/elementary-introduction/3rd-ed/>

Oleksandr Kobets, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Yevhen Lepet**

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Laboratory Studies of Changes in the Coefficient of Variation of the Transverse distribuTion of Liquid by a Deflector Sprayer When Applying Agrochemicals

The article presents the results of laboratory studies aimed at determining the effect of main technological and structural parameters of deflector-type sprayers on the uniformity of liquid distribution when applying urea-ammonium nitrate (UAN) solutions. The purpose of the study is to identify the influence of working pressure, boom height, and throttle orifice diameter on the coefficient of variation (CV) of the transverse distribution of liquid fertilizer and to establish optimal operating parameters that ensure high distribution uniformity and minimize fertilizer losses.

Experimental studies were carried out on a hydraulic test bench designed in accordance with ISO 5682-2. Two types of deflector sprayers were tested: the standard RD-4.0 and an improved combined design. The Box–Behnken experimental method was used to process the results, and regression equations of the second order were obtained using Wolfram Cloud software. The adequacy of the models was verified by the Fisher criterion at a 5 % significance level. Based on the obtained equations, three-dimensional response surfaces were constructed to visualize the relationship between the studied factors and the CV value. The results showed that the coefficient of variation decreases with increasing pressure up to 0,3 MPa and optimal boom height around 0,7–0,9 m, providing stable spray overlap. The influence of the throttle diameter was also significant: an excessive increase in its size led to turbulence and a higher CV.

The performed studies confirmed that the developed combined deflector sprayer ensures a more uniform transverse distribution compared to the standard model. The minimal CV value ($\approx 9.4\%$) was achieved at $p = 0,3$ MPa, $h = 0,9$ m, and $d = 1,0$ mm. The obtained regression models adequately describe the interaction of factors and can be used for optimizing sprayer design and operational parameters in the application of liquid fertilizers. The research results provide a scientific basis for improving deflector sprayers to enhance the efficiency and environmental safety of agricultural chemical application.

deflector sprayer, UAN, CV, liquid distribution uniformity, liquid mineral fertilizers, working pressure, boom height, laboratory experiment, optimization. Wolfram Cloud

Одержано (Received) 10.11.2025

Прорецензовано (Reviewed) 04.12.2025

Прийнято до друку (Approved) 30.12.2025

П.Г. Лузан, доц., канд. техн. наук, В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, О.Р. Лузан, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: luzanpg@gmail.com

Теоретичне обґрунтування конструкції механізму регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки

У статті наведено теоретичне обґрунтування механізму регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки з ексцентриковим кулачком та опорною лижею. Отримано аналітичні залежності між робочою глибиною ходу сошника та геометричними параметрами ексцентрикового механізму, що забезпечують дискретне та відтворюване регулювання. На основі динамічної моделі вертикального руху досліджено вплив нерівностей мікрорельєфу поверхні ґрунту на стабільність глибини сівби. Показано роль демпфувальних властивостей системи «сошник-опорна лижа-ґрунт» у зменшенні динамічних відхилень робочої глибини. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації посівних секцій сівалок.

посівна секція, сошник, робоча глибина ходу сошника, ексцентриковий кулачок, опорна лижа

Постановка проблеми. Рівномірність загортання насіння за глибиною є одним із визначальних факторів формування дружних сходів та реалізації потенційної врожайності сільськогосподарських культур. Відомо, що відхилення робочої глибини сошника навіть на незначну величину призводить до нерівномірного проростання насіння, що особливо важливо для просапних та овочевих культур [1-4].

У сучасних сівалках робоча глибина ходу сошників, як правило, регулюється за допомогою опорних лиж або копіювальних коліс шляхом їх переміщення відносно сошника. Такі конструктивні рішення забезпечують можливість зміни глибини сівби, однак мають суттєвий недолік – трудомісткість та великі витрати часу на регулювання, особливо на сівалках з великою кількістю посівних секцій [5-7].

Крім того, у реальних польових умовах нерівності поверхні ґрунту та зміна його фізико-механічних властивостей ускладнюють забезпечення однакової глибини загортання насіння всіма посівними секціями сівалки. Це зумовлює необхідність створення таких конструкцій посівних секцій, які дозволяли б швидко та надійно встановлювати задану робочу глибину сошника без застосування додаткового інструменту [8-11].

У зв'язку з цим актуальною є задача вдосконалення конструкції посівної секції сівалки шляхом впровадження простого та надійного механізму швидкого регулювання робочої глибини сошника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних посівних машинах забезпечення стабільної робочої глибини ходу сошника є одним із визначальних чинників рівномірності загортання насіння та формування дружних сходів. Аналіз наукових публікацій і серійних конструкцій посівних секцій свідчить, що найбільш поширеним технічним рішенням є застосування копіюючих коліс у поєднанні з механізмами регулювання відносного положення «копіююче колесо-сошник» [12-18]. Такі системи реалізовані у посівних секціях сівалок ParaLink 3820 BourGault, Vitasem, Astra 6 New, Centaya Super Amazone, Morris Quantum, Monosem та Sfoggia, (рис. 1, а-г) та ін.



1 – копіююче колесо, 2 – механізм регулювання глибини ходу сошника, 3 – сошник

Рисунок 1 – Механізми регулювання робочої глибини сошника посівних секцій сівалок:
 а) ParaLink 3820 BourGault (Канада), б) Vitasem (Австрія), в) Astra 6 New AT "Ельворті" (Україна),
 д) Centaya Super Amazone (Німеччина), е) Morris Quantum (Канада),
 ф) Monosem Meca V4/4E (Франція), г) Sfoggia (Італія)

Джерело: розроблено на підставі [12-18]

Використання копіюючих коліс дозволяє зменшити вплив нерівностей мікрорельєфу поверхні ґрунту на глибину ходу сошника, однак результати експлуатаційних досліджень і практичний досвід свідчать, що ефективність таких рішень значною мірою залежить від кінематичної схеми регульовального механізму та його жорсткості. Для важких посівних комплексів характерні важільні або паралелограмні підвіски з підвищеним притискним зусиллям, які забезпечують прийнятну стабільність глибини за складних ґрунтових умов, але водночас відзначаються конструктивною складністю, значною масою та чутливістю до люфтів у шарнірних з'єднаннях.

Аналіз наведених конструкцій дозволяє зробити висновок, що переважна більшість існуючих механізмів регулювання глибини ґрунтується на зміні положення копіюючого колеса відносно сошника, тоді як безпосередній контакт регульовального елемента з ґрунтом у зоні формування борозни використовується обмежено. Це зумовлює необхідність пошуку альтернативних технічних рішень, здатних поєднати точність регулювання глибини, кінематичну простоту та зменшення впливу зношування шарнірів і колісних опор.

Такі способи регулювання забезпечують необхідний діапазон зміни глибини сівби, однак характеризуються високою трудомісткістю, низькою оперативністю та значною залежністю результату від кваліфікації оператора. У багаторядних сівалках, що мають 8-12 і більше посівних секцій, процес налаштування робочої глибини потребує значних витрат часу, що негативно впливає на загальну продуктивність посівних робіт.

Аналіз конструкцій показує, що перспективним напрямом удосконалення посівних секцій є застосування механізмів з фіксованими дискретними положеннями, які дозволяють швидко встановлювати однакову робочу глибину сошників на всіх секціях сівалки.

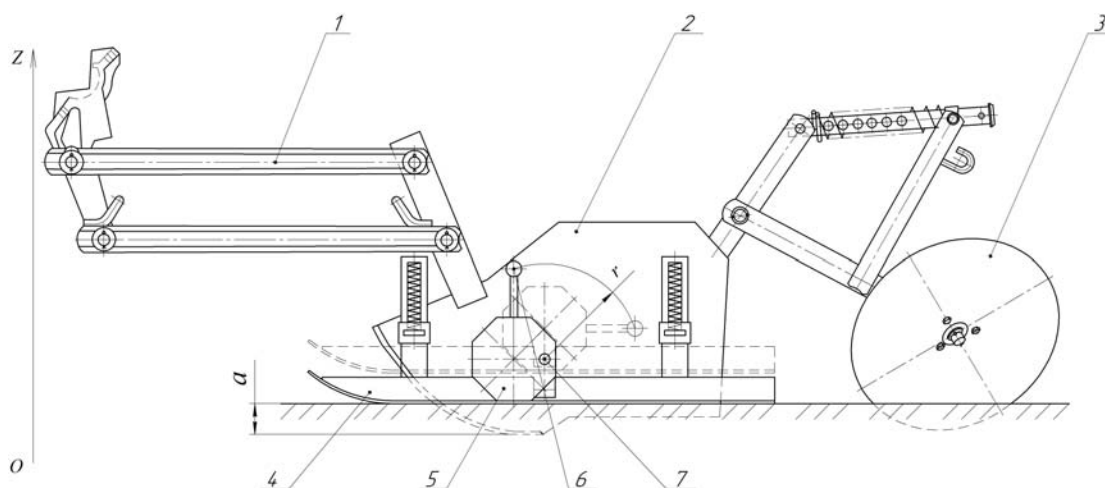
У цьому напрямку перспективним є застосування опорних лиж, розташованих безпосередньо в зоні роботи сошника, які забезпечують стабільну опору на ґрунт і зменшують залежність глибини ходу від вертикальних коливань посівної секції. Водночас ефективність таких рішень значною мірою визначається способом регулювання положення лижі відносно сошника та надійністю фіксації обраного положення.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і серійних конструкцій посівних секцій свідчить про актуальність розроблення механізмів регулювання робочої глибини сошника, які поєднують паралелограмну підвіску, локальну опорну поверхню у вигляді лижі та простий, жорсткий і надійний фіксований регулятор положення. Саме це стало передумовою створення запропонованої конструкції посівної секції з опорною лижею та ексцентриковим кулачком із індексованими положеннями, що дозволяє підвищити точність і стабільність регулювання глибини ходу сошника за різних ґрунтових умов, (рис. 2).

Постановка завдання. Виходячи з наведеного, постановка задачі дослідження полягає у створенні та дослідженні конструкції посівної секції сівалки з жорстко фіксованим механізмом регулювання робочої глибини сошника, що забезпечує скорочення часу налаштування та підвищення відтворюваності заданої глибини сівби.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування конструкції посівної секції сівалки з ексцентриковим індексованим механізмом регулювання робочої глибини сошника.

Виклад основного матеріалу. На відміну від відомих конструкцій, у яких регулювання здійснюється шляхом зміни положення копіюючого колеса, у запропонованій конструкції посівної секції сівалки, яка містить паралелограмну підвіску з кронштейном кріплення до рами, сошник та загортачі, механізм регулювання робочої глибини сошника виконаний у вигляді опорної лижі, встановленої з можливістю поступального переміщення у вертикальному напрямку відносно сошника.



1 – паралелограмна підвіска з кронштейном кріплення до рами, 2 – сошник, 3 – загортачі, 4 – опорна лижа, 5 – ексцентриковий кулачок, 6 – важіль повороту ексцентрикового кулачка, 7 – вал

Рисунок 2 – Загальний вигляд запропонованої посівної секції

Джерело: розроблено авторами

Лижі взаємодіє з ексцентриковим кулачком, який жорстко закріплений на сошнику та має індексовані фіксовані положення. Зміна положення ексцентрикового кулачка здійснюється поворотом важеля, після чого обране положення фіксується.

Таким чином, робоча глибина сошника визначається геометричним співвідношенням між положенням робочої кромки сошника та опорної лижі. При кожному фіксованому положенні ексцентрикового кулачка встановлюється відповідне значення робочої глибини, що забезпечує її відтворюваність на всіх посівних секціях сівалки.

З конструктивно-кінематичної точки зору механізм регулювання робочої глибини можна розглядати як систему з одним керованим ступенем вільності, де вихідною координатою є вертикальне положення ріжучої кромки сошника відносно поверхні ґрунту, а керуючою – кут повороту ексцентрикового кулачка. При цьому всі робочі положення механізму є дискретними та жорстко фіксованими, що виключає випадкову зміну глибини сівби під час роботи агрегату.

Запропонована конструктивно-кінематична схема дозволяє швидко встановлювати задану робочу глибину сошника без застосування додаткового інструменту та забезпечує однаковість налаштування для багаторядних сівалок.

Для теоретичного обґрунтування процесу регулювання робочої глибини розглянемо кінематичну схему посівної секції у вертикальній площині. Введемо нерухому систему координат з вертикальною віссю OZ , спрямованою вгору, та приймемо рівень поверхні ґрунту за нульовий – $z = 0$. Оскільки опорна лижа постійно контактує з ґрунтом, лінія контакту лижі збігається з поверхнею ґрунту і використовується як базова лінія відліку.

Положення ріжучої кромки сошника у вертикальному напрямку характеризується координатою z_s . Робоча глибина ходу сошника a визначається як вертикальна відстань від поверхні ґрунту до ріжучої кромки сошника та за прийнятого напрямку осі OZ має вигляд

$$a = -z_s. \quad (1)$$

Регулювання робочої глибини здійснюється ексцентриковим кулачком з індексованими положеннями, що змінює взаємне положення сошника відносно опорної лижі (поверхні ґрунту). Геометричний зв'язок між положенням ріжучої кромки сошника та положенням ексцентрика можна подати у вигляді:

$$z_s(\theta) = -(C + r(\theta)), \quad (2)$$

де C – величина, яка визначає сталу вертикальну відстань між віссю обертання ексцентрикового кулачка та базовою контактною лінією опорної лижі з ґрунтом, $r(\theta)$ – радіальна функція ексцентрикового кулачка, θ – кут повороту кулачка.

У виразі (2) величина C є сталою конструктивною складовою, що описує незмінне взаємне вертикальне зміщення між базовою лінією контакту опорної лижі з ґрунтом та опорною точкою (або віссю) ексцентрикового кулачка в системі «сошник-лижа». Таким чином, C визначається геометрією монтажу елементів механізму (положенням осі обертання кулачка відносно лижі та ріжучої кромки сошника) і не залежить від кута повороту θ . Радіальна функція $r(\theta)$ характеризує зміну миттєвого радіуса кулачка у напрямку дії сили контакту з лижею; саме ця зміна визначає переміщення лижі (або сошника) та, відповідно, робочу глибину.

Підставляючи (2) у (1), отримуємо залежність робочої глибини від кута повороту ексцентрикового кулачка

$$a(\theta) = C - r(\theta). \quad (3)$$

Оскільки ексцентриковий кулачок має індексовані фіксовані положення, то кут θ приймає дискретні значення

$$\theta = \theta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

де n – кількість індексованих положень.

Відповідно, робоча глибина також набуває дискретних значень

$$a_i = a(\theta)_i = C - r(\theta)_i. \quad (5)$$

Крок регулювання робочої глибини між суміжними положеннями

$$\Delta a_i = a_{i+1} - a_i. \quad (6)$$

Таким чином, запропонований ексцентриковий кулачок забезпечує дискретне, відтворюване встановлення робочої глибини сошника, оскільки кожному індексованому положенню θ_i відповідає однозначне значення a_i , визначене геометрією механізму.

З отриманих залежностей випливає, що стабільність та відтворюваність робочої глибини сошника забезпечуються жорстким геометричним зв'язком між опорною лижею та ексцентриковим кулачком, а також фіксацією його положень. Такий підхід виключає вплив люфтів і похибок, характерних для болтових та гвинтових механізмів регулювання.

Отримана теоретична модель дозволяє на етапі проєктування визначати діапазон та крок регулювання робочої глибини сошника шляхом вибору геометричних параметрів ексцентрикового кулачка та кількості його індексованих положень.

Для оцінки впливу нерівностей поверхні ґрунту на стабільність робочої глибини сошника розглянемо спрощену динамічну модель вертикального руху посівної секції. Посівну секцію подаємо у вигляді одномасової системи з пружними та демпфувальними властивостями, яка здійснює вертикальні коливання відносно поверхні ґрунту.

Вертикальне переміщення ріжучої кромки сошника відносно його середнього положення позначимо через $z(t)$. Нерівності поверхні ґрунту описуються функцією $z_g(t)$, яка задає вертикальні збурення, що передаються на сошник через опорну лижу, яка постійно контактує з ґрунтом. У прийнятій моделі величина $z(t)$ характеризує відхилення ріжучої кромки сошника від середнього положення, що відповідає

встановленій робочій глибині, а функція $z_g(t)$ описує профіль поверхні ґрунту. Оскільки опорна лижа безперервно контактує з поверхнею ґрунту, збурення $z_g(t)$ передаються безпосередньо на сошник.

З огляду на інженерний характер дослідження та з метою отримання аналітично інтерпретованих залежностей, система зведена до одномасової моделі з еквівалентними параметрами. Рівняння руху системи може бути записане як

$$m\ddot{z} + c(\dot{z} - \dot{z}_g) + k(z - z_g) = 0, \quad (7)$$

де m – приведена маса рухомих елементів посівної секції; c – коефіцієнт в'язкого демпфування, що враховує втрати енергії при взаємодії з ґрунтом; k – приведений коефіцієнт жорсткості системи.

Нерівності мікрорельєфу поверхні ґрунту є основним джерелом зовнішніх збурень, що впливають на стабільність робочої глибини ходу сошника під час руху посівної секції. У процесі роботи агрегату мікрорельєф поверхні ґрунту діє як кінематичне збурення, яке через опорну лижу безпосередньо передається на сошник у вигляді змінної функції профілю $z_g(t)$. Унаслідок цього виникають вертикальні коливання ріжучої кромки сошника відносно його середнього положення, що відповідає встановленій робочій глибині.

Передача збурень від мікрорельєфу поверхні ґрунту призводить до появи інерційних сил, пропорційних приведеній масі рухомих елементів посівної секції, а також до змінної реакції ґрунту на опорну лижу. Амплітуда вертикальних коливань сошника та відповідні відхилення фактичної глибини його ходу визначаються співвідношенням між інерційними параметрами системи, приведеною жорсткістю контакту «опорна лижа-ґрунт» та демпфувальними властивостями підвіски і ґрунту.

За недостатнього демпфування або малої жорсткості контакту опорної лижі з ґрунтом збурення, викликані мікрорельєфом, можуть призводити до значного зростання амплітуди вертикальних коливань сошника. У граничних випадках це може супроводжуватися частковою або короточасною втратою контакту опорної лижі з поверхнею ґрунту, що спричиняє різке та неконтрольоване збільшення робочої глибини ходу сошника під дією власної ваги та притискного зусилля посівної секції.

Таким чином, нерівності мікрорельєфу поверхні ґрунту викликають динамічні відхилення робочої глибини сошника від заданого значення, величина яких визначається не лише геометрією механізму регулювання, але й динамічними характеристиками системи «сошник-опорна лижа-ґрунт». Це обґрунтовує необхідність урахування демпфувальних властивостей та раціонального вибору параметрів опорної лижі з метою зменшення впливу мікрорельєфу на стабільність глибини сівби.

Для забезпечення стабільної робочої глибини сошника необхідною умовою є безперервний контакт опорної лижі з поверхнею ґрунту. Втрата контакту призводить до різкого зменшення реакції опори та неконтрольованого заглиблення сошника.

Реакція ґрунту на лижу може бути записана у вигляді

$$R(t) = k[z_g(t) - z(t)] + c[\dot{z}_g(t) - \dot{z}(t)], \quad (8)$$

де $z(t)$ – переміщення сошника; $z_g(t)$ – профіль поверхні ґрунту.

Умова збереження контакту має вигляд

$$R(t) \geq 0. \quad (9)$$

З цієї умови випливає, що для зменшення ймовірності відриву лижі необхідно забезпечити достатню приведену жорсткість контакту та наявність демпфування, яке обмежує амплітуду швидкісних складових руху.

Для оцінювання динамічних властивостей системи «сошник-опорна лижа-грунт» та впливу параметрів демпфування на стабільність робочої глибини проведемо частотний аналіз рівняння руху. У цьому випадку розглянемо гармонічне збурення поверхні ґрунту у вигляді

$$z_g(t) = Z_g \sin(\omega t), \quad (10)$$

де Z_g – амплітуда збурення; ω – кутова частота.

З урахуванням рівняння (10) отримаємо амплітудно-частотну характеристику системи, яка описує залежність амплітуди коливань сошника від частоти збурення. Передавальна функція системи за амплітудами має вигляд

$$|H(\omega)| = \frac{Z}{Z_g} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}. \quad (11)$$

де Z – амплітуда усталених коливань ріжучої кромки сошника.

Отримана залежність (11) дозволяє оцінити вплив параметрів жорсткості та демпфування на динамічну реакцію посівної секції. Зі збільшенням коефіцієнта демпфування c спостерігається зменшення амплітуди коливань сошника в області резонансних частот, що сприяє підвищенню стабільності робочої глибини ходу сошника під час руху агрегату по нерівній поверхні ґрунту.

Таким чином, результати частотного аналізу підтверджують доцільність урахування демпфувальних властивостей системи при проєктуванні посівної секції та виборі параметрів опорної лижі і підвіски сошника з метою зменшення динамічних відхилень робочої глибини.

Для аналізу впливу демпфувальних властивостей системи результати розрахунків подано з використанням безрозмірного коефіцієнта демпфування ξ , який пов'язаний із фізичним коефіцієнтом в'язкого демпфування c співвідношенням

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad (12)$$

де m – приведена маса рухомих елементів посівної секції; k – приведений коефіцієнт жорсткості системи. Зміна значень ξ дозволяє узагальнено оцінити вплив демпфування на динамічну реакцію сошника незалежно від абсолютних значень параметрів m і k .

Аналіз частотної характеристики показує, що за недостатнього демпфування амплітуда вертикальних коливань сошника суттєво зростає, що може призводити до нестабільності робочої глибини, рис. 3. Зі збільшенням коефіцієнта демпфування амплітуда коливань зменшується, а рух сошника стає більш стабільним. Разом з тим, надмірне демпфування може призводити до зниження здатності посівної секції копіювати мікрорельєф поверхні ґрунту.

З теоретичного аналізу випливає, що опорна лижа повинна забезпечувати достатню приведену жорсткість контакту з ґрунтом, яка визначається її площею опори та формою робочої поверхні. Наявність демпфувальних властивостей системи зменшує амплітуду коливань сошника та підвищує стабільність робочої глибини. Таким чином, параметри опорної лижі мають істотний вплив на динамічну поведінку посівної секції та повинні враховуватися на етапі проєктування.

Зміна вертикального переміщення сошника при гармонічному збуренні поверхні ґрунту для різних значень безрозмірного коефіцієнта демпфування системи, рис. 4. Зі збільшенням демпфування амплітуда коливань зменшується, що сприяє підвищенню стабільності робочої глибини сошника.

Аналіз динамічної моделі показує, що параметри демпфування істотно впливають на характер вертикальних коливань сошника. За малих значень демпфування амплітуда коливань зростає, що може призводити до нестабільності робочої глибини. Зі збільшенням демпфування коливання згладжуються, а рух сошника стає більш стабільним. Разом з тим, надмірне демпфування може погіршувати здатність посівної секції копіювати мікрорельєф поверхні ґрунту, що необхідно враховувати при виборі параметрів опорної ліжі

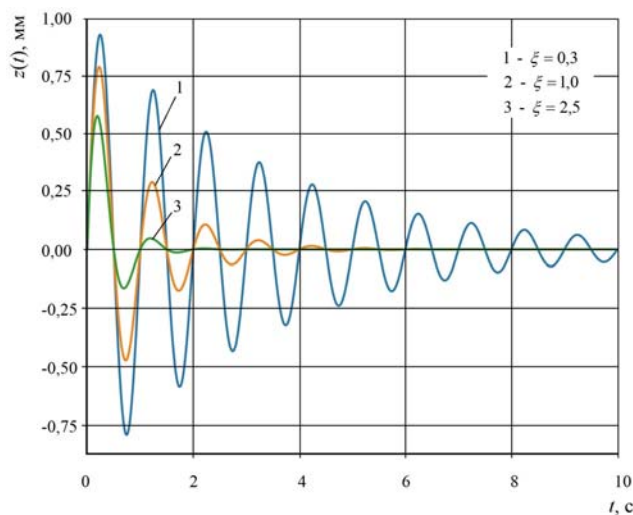


Рисунок 3 – Залежність нормалізованого вертикального переміщення сошника від часу при різних значеннях безрозмірного коефіцієнта демпфування ξ : $\xi = 0,3$ – слабе демпфування (великі коливання); $\xi = 1,0$ – близько до критичного демпфування; $\xi = 2,5$ – надмірне демпфування

Джерело: розроблено авторами

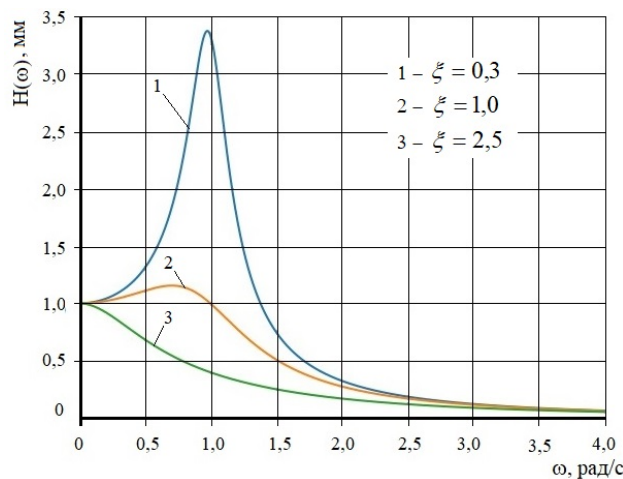


Рисунок 4 – Вплив безрозмірного коефіцієнта демпфування ξ на вертикальні коливання сошника

Джерело: розроблено авторами

Отримані теоретичні залежності та графічні результати показують, що демпфувальні властивості системи істотно впливають на характер вертикальних коливань сошника. За недостатнього демпфування амплітуда коливань зростає, що може призводити до нестабільності робочої глибини. Зі збільшенням демпфування рух сошника стає більш згладженим, а відхилення робочої глибини зменшуються. Разом з тим, надмірне демпфування може погіршувати здатність посівної секції копіювати мікрорельєф поверхні ґрунту, що необхідно враховувати при виборі параметрів опорної ліжі.

Проведений теоретичний аналіз конструкції механізму регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки показав, що застосування ексцентрикового індексованого механізму дозволяє забезпечити жорстко фіксовані значення робочої глибини без використання різбових або болтових з'єднань. Такий підхід істотно зменшує трудомісткість і тривалість налаштування посівної секції, особливо у багаторядних сівалках.

Отримані геометричні та динамічні залежності свідчать, що робоча глибина сошника визначається виключно геометричними параметрами механізму та не залежить від суб'єктивних факторів, пов'язаних з процесом налаштування. Індексовані фіксовані положення ексцентрикового кулачка забезпечують відтворюваність встановлення глибини сівби на всіх посівних секціях агрегату.

Аналіз динаміки руху сошника з опорною лижею показав, що параметри лижі істотно впливають на стабільність робочої глибини під час руху агрегату. Рациональний вибір площі опорної поверхні лижі та демпфувальних властивостей системи дозволяє зменшити амплітуду вертикальних коливань сошника, що сприяє покращенню рівномірності загортання насіння.

Запропонований механізм регулювання робочої глибини є конструктивно простим, не потребує складного обслуговування та може бути реалізований як у нових посівних секціях, так і при модернізації існуючих сівалок. Застосування такого механізму доцільне для сівалок різних типів, у тому числі просапних та овочевих, де висуваються підвищені вимоги до точності та повторюваності глибини сівби.

Таким чином, результати теоретичного дослідження підтверджують доцільність використання ексцентрикового механізму з індексованими положеннями для регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки.

Висновки. Запропоновано та теоретично обґрунтовано конструкцію механізму регулювання робочої глибини сошника посівної секції сівалки, виконаного на основі ексцентрикового кулачка з індексованими фіксованими положеннями.

Показано, що робоча глибина сошника у запропонованій конструкції визначається виключно геометричними параметрами механізму та є функцією кута повороту ексцентрикового кулачка, що забезпечує відтворюваність установлених значень глибини сівби.

Отримано аналітичні залежності, які дозволяють визначати діапазон та крок регулювання робочої глибини сошника на етапі проектування шляхом вибору геометричних параметрів ексцентрикового механізму та кількості його індексованих положень.

На основі динамічної моделі руху сошника з опорною лижею встановлено, що параметри лижі та демпфувальні властивості системи істотно впливають на стабільність робочої глибини під час руху посівної секції по нерівній поверхні ґрунту.

Теоретичний аналіз показав, що рациональний вибір конструктивних параметрів опорної лижі дозволяє зменшити амплітуду вертикальних коливань сошника та підвищити рівномірність загортання насіння.

Запропонований механізм регулювання робочої глибини відрізняється конструктивною простотою та забезпечує скорочення часу налаштування посівних секцій, що є особливо важливим для багаторядних сівалок.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових та модернізації існуючих посівних секцій сівалок різного призначення, а також служити основою для подальших експериментальних досліджень.

Список літератури

- 1 Аніскевич Л. В., Росамаха Ю. О. Конструктивні особливості сошникових систем сучасних сівалок та їх відповідність вимогам точного землеробства. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 241. С. 269–278. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_241_38 (дата звернення: 15.01.2026).

- 2 Драйер Х. Детальний розгляд сошника сівалки Primera DMC. AMAZONE-WERKE H. DREYER GmbH & Co. KG. 2010. 2 с. URL: <http://www.amazone.de> (дата звернення: 15.01.2026).
- 3 Kuş E., Yıldırım Y. Effects of seed drop height and tillage system on the emergence time and rate in the single seed planters. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*. 2020. Vol. 35, № 1. P. 69-76. DOI: 10.28955/alinterizbd.739387.
- 4 Васильковська К.В. Аналіз створення рівномірного потоку насіння до борозни. *Сільськогосподарські машини*. 2025. Вип. 51. С. 24–33. DOI: 10.36910/acm.vi51.1890.
- 5 Jin G., Zhang X., Liu Y. Development and field performance evaluation of hole-fertilizing planter for precision planting of corn. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. P. 1241-1260. DOI: 10.1007/s11119-023-09988-6.
- 6 Гринько Ю. Класифікація сошників. Їхні переваги і недоліки. *Агроном: веб-сайт*. URL: <https://www.agronom.com.ua/klasyfikatsiya-soshnykiv-yihni-perevagy-i-nedoliky/> (дата звернення: 10.12.2025).
- 7 Загортаючи робочі органи для прямої сівби зернових культур: монографія / Сало В.М., Лузан О.Р., Лузан П.Г., Мачок Ю.В. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В. Ф., 2012. 164 с. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5473> (дата звернення: 15.01.2026).
- 8 Шмат С.І., Лузан П.Г., Сало В.М. Оригінальні способи і засоби обробітку ґрунту та сівби сільськогосподарських культур. Харків: Мачулін, 2018. 236 с.
- 9 Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навчальний посібник / Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2022. 220 с.
- 10 Wan L., Li Y., Song J. Vibration response of soil under low-frequency vibration using the discrete element method. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. Article 1958. DOI: 10.3390/agriculture13101958.
- 11 Сало В. М., Вовнянко Б. Г., Лещенко С. М., Лузан П. Г. Покращення якісних показників процесу сівби. *Сільськогосподарські машини*. 2024. Вип. 50. С. 113-119. DOI: 10.36910/acm.vi50.1398.
- 12 Дискові посівні комплекси 3820 ParaLink: веб-сайт. URL: <https://www.bourgault.com/en-us/products/paralink-coulter-drills/plr-coulter-opener> (дата звернення: 15.01.2026).
- 13 Основні характеристики модельного ряду ALFA. Нова конструкція повідкової системи CoultSystem. Elvorti. 2023. URL: https://elvorti.com/upload/ua_KATALOG_2023_mini.pdf (дата звернення: 15.01.2026).
- 14 Vitasem – механічні сівалки. Продумана система сошників. Pöttinger. 2015. С. 18-19. URL: https://www.pottinger.at/download/prospekte/21398/0/POETTINGER_232.uk.1215.pdf (дата звернення: 15.01.2026).
- 15 Cataya harrow-mounted seed drill. RoTeC coulter – the universal single disc coulter. Amazone: веб-сайт. URL: <https://amazone.net> (дата звернення: 15.01.2026).
- 16 Operator's Manuals QUANTUM Air Drill. Morris Industries Ltd. Canada, 2025. 94 p. URL: https://morrisequipment.ca/wp-content/uploads/QUANTUM_Operators_S66250-05.pdf (дата звернення: 15.01.2026).
- 17 Обладнання Monosem. Висівна секція Меса V4/4E: веб-сайт. URL: <https://ua.monosem.com/sivalky-tochnoho-vysivu/mekhanichna-sivalka/meca-v4-4e> (дата звернення: 15.01.2026).
- 18 Сівалка Gamma plus. Sfoggia – Agriculture Division: веб-сайт. URL: <https://sfoggia.com/en/semina-di-precisione-3/gamma-plus/> (дата звернення: 15.01.2026).

References

1. Aniskevych, L. V., & Rosamakha, Yu. O. (2016). Design features of coulter systems of modern seed drills and their compliance with precision farming requirements. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy of the Agro-Industrial Complex*, 241, 269–278. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_241_38 [in Ukrainian].
2. Dreyer, H. (2010). *Detailed review of the Primera DMC seed drill opener*. AMAZONEN-WERKE H. DREYER GmbH & Co. KG. <http://www.amazone.de>.
3. Kuş, E., & Yıldırım, Y. (2020). Effects of seed drop height and tillage system on emergence time and rate in single seed planters. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*, 35(1), 69–76. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.739387>.
4. Vasylovskaya, K. V. (2025). Analysis of the formation of a uniform seed flow to the furrow. *Agricultural Machines*, 51, 24–33. <https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1890> [in Ukrainian].
5. Jin, G., Zhang, X., Liu, Y., & Chen, L. (2023). Development and field performance evaluation of hole-fertilizing planter and dynamic alignment control system for precision planting of corn. *Precision Agriculture*, 24, 1241–1260. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-09988-6>.
6. Hrynko, Yu. (n.d.). Classification of coulters: advantages and disadvantages. *Agronom*. <https://www.agronom.com.ua/klasyfikatsiya-soshnykiv-yihni-perevagy-i-nedoliky/> [in Ukrainian].
7. Salo, V. M., Luzan, O. R., Luzan, P. H., & Machok, Yu. V. (2012). *Covering working bodies for direct seeding of grain crops*. Kirovohrad: SPD FO Lysenko V. F. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5473> [in Ukrainian].

8. Shmat, S. I., Luzan, P. H., & Salo, V. M. (2018). *Original methods and means of tillage and crop sowing*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].
9. Salo, V., Leshchenko, S., Luzan, P., & Salo, L. (2022). *Machines for sowing, planting and crop care*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. Publisher [in Ukrainian].
10. Wan, L., Li, Y., Song, J., Ma, X., Dong, X., Zhang, C., & Song, J. (2023). Vibration response of soil under low-frequency vibration using the discrete element method. *Agriculture*, 13, 1958. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101958>.
11. Salo, V. M., Vovnianko, B. H., Leshchenko, S. M., & Luzan, P. H. (2024). Improvement of qualitative indicators of the sowing process. *Agricultural Machines*, 50, 113–119. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1398> [in Ukrainian].
12. Bourgault Industries Ltd. (2026). *ParaLink 3820 disc seeding systems*. <https://www.bourgault.com/en-us/products/paralink-coulter-drills/plr-coulter-opener>.
13. Elvorti. (2023). *Main characteristics of the ALFA model range. New CoultSystem linkage design*. https://elvorti.com/upload/ua_KATALOG_2023_mini.pdf.
14. Pöttinger Landtechnik GmbH. (2015). *Vitasem mechanical seed drills: Advanced coulter system*. https://www.poettinger.at/download/prospekte/21398/0/POETTINGER_232.uk.1215.pdf.
15. Amazone. (2026). *Cataya harrow-mounted seed drill. RoTeC coulter – the universal single disc coulter*. <https://amazone.net/en/products-digital-solutions/agricultural-technology/seeding/conventional-seed-drills>.
16. Morris Industries Ltd. (2025). *QUANTUM air drill operator's manual*. https://morrisequipment.ca/wp-content/uploads/QUANTUM_Operators_S66250-05.pdf.
17. Monosem. (2026). *Meca V4/4E seeding unit*. <https://ua.monosem.com/sivalky-tochnoho-vysivu/mekhanichna-sivalka/meca-v4-4e>.
18. Sfoggia S.r.l. (2026). *Gamma Plus precision seed drill*. <https://sfoggia.com/en/semina-di-precisione-3/gamma-plus/>.

Petro Luzan, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Aulin**, Prof., Dr. tech. sci., **Olena Luzan**, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Substantiation of the Design of a Working Depth Adjustment Mechanism for the Opener of a Seeding Unit

The aim of the study is the theoretical substantiation of the design of a mechanism for adjusting the working depth of the opener of a seeding unit, which ensures increased accuracy and reproducibility of the preset seeding depth under various soil conditions. The research is focused on eliminating the shortcomings of traditional adjustment mechanisms associated with high labor intensity of settings, the presence of clearances in joints, and the dependence of the result on the operator's subjective actions. Particular attention is paid to reducing the influence of soil surface microrelief irregularities on the stability of the opener working depth.

The article considers a seeding unit design with a gauge skid and an eccentric cam with indexed fixed positions, which provides discrete and rigidly fixed adjustment of the opener working depth. A kinematic model of the adjustment mechanism is proposed, on the basis of which analytical relationships between the working depth of the opener and the geometric parameters of the eccentric cam are obtained. It is shown that each indexed position of the cam corresponds to a unique value of the working depth, which ensures its reproducibility on all seeding units of the machine. To evaluate the influence of soil surface irregularities, a simplified dynamic model of the vertical motion of the opener with a gauge skid is developed in the form of a single-mass system with elastic and damping properties. On the basis of this model, a frequency analysis is performed and the amplitude–frequency characteristic of the system is obtained, allowing the assessment of the influence of stiffness and damping parameters on the stability of the working depth.

The results of the theoretical study have shown that the use of an eccentric indexed mechanism significantly reduces the time and labor required for adjusting seeding units and ensures high repeatability of setting the opener working depth. It is established that the stability of seeding depth is determined not only by the geometry of the adjustment mechanism but also by the dynamic characteristics of the “opener – gauge skid – soil” system. A rational selection of the gauge skid parameters and the damping properties of the system makes it possible to reduce the amplitude of vertical oscillations of the opener and to improve the uniformity of seed placement. The obtained results can be used in the design of new and modernization of existing seeding units of various types and serve as a basis for further experimental research.

seeding unit, opener, working depth of the opener, eccentric cam, gauge skid

Одержано (Received) 15.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

О.О. Матвієнко, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. досл., канд. техн. наук,
О.М. Лівіцький, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: richdad.ua@gmail.com

Методика вибору робастних моделей вібродіагностики за доменного зсуву та шуму міток

У статті розглянуто проблему зниження якості моделей машинного навчання для вібродіагностики вузлів мобільних машин за умов доменного зсуву (зміна режимів роботи, навантаження, стендових/польових умов, датчиків) та шуму міток (неточні записи технічного сервісу, помилки класифікації станів, перехідні режими). Запропоновано умовну методику вибору архітектури моделі у вигляді матриці рішень, яка пов'язує тип і “суворість” доменного зсуву, обсяг і якість розмічених даних, рівень зашумлення сигналу та міток із доцільним класом моделей (класичні моделі на інженерних ознаках, гібридні підходи, ансамблеві та напівнаглядкові стратегії). Методика підтверджена експериментами на задачах діагностики підшипників і редукторів: для помірного доменного зсуву показано перевагу робастифікованих ансамблів за високого шуму міток, тоді як для сильного доменного зсуву встановлено обмежену ефективність складних ансамблевих стратегій і доцільність простіших рішень із доменною адаптацією. Отримані результати формують практичні рекомендації для побудови інтелектуальної системи технічного сервісу, орієнтованої на обслуговування за станом у реальних польових умовах.

мобільні машини, вібродіагностика, доменний зсув, шум міток, робастність, ансамблеві моделі, напівнаглядкове навчання, псевдорозмітка, підшипники кочення, редуктор, інтелектуальна система технічного сервісу

Постановка проблеми. Підвищення надійності мобільних машин підприємств агропромислового виробництва потребує переходу від регламентного та реактивного обслуговування до обслуговування за технічним станом [1]. У таких умовах ключову роль відіграють дані сенсорної діагностики (зокрема, вібраційні сигнали вузлів обертання), за якими методи машинного навчання можуть виявляти перехідні та несправні стани. Однак практичне впровадження моделей діагностики у польових умовах ускладнюється двома системними чинниками: доменним зсувом та шумом міток.

У цій роботі терміни «робастна модель» і «робастність» використовуються у загальноприйнятому для технічних і прикладних наук значенні: це здатність моделі зберігати прийнятну якість за малих або помірних змін умов (режимів роботи, параметрів знімання сигналу) та за наявності помилок/неточностей у розмітці. Відповідно «робастифікація» — це цілеспрямоване підвищення робастності моделі (наприклад, через двоступеневе навчання з псевдорозміткою та фільтрацією за впевненістю).

Доменний зсув виникає через зміну режимів роботи, навантажень, швидкостей, типів датчиків і способів монтажу, а також через відмінності між стендовими та експлуатаційними умовами. Внаслідок цього статистичні властивості ознак і сигналів у цільовому домені відрізняються від навчального, що призводить до деградації якості моделі при перенесенні. Другим чинником є шум міток, обумовлений неповнотою або неточністю записів технічного сервісу, помилками класифікації станів, а також наявністю перехідних режимів, що погано піддаються однозначній розмітці. За таких умов «універсальний» вибір моделі (наприклад, фіксований вибір глибокої мережі) є недостатнім: доцільність архітектури повинна визначатися умовно, залежно від характеристик доменного зсуву та якості даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередніх роботах [2–3] було окреслено, по-перше, які саме діагностичні сигнали доцільно використовувати для оцінки технічного стану мобільних машин та вузлів (вібраційні, акустичні, температурні, струмові тощо), а по-друге — як організувати дані (збір, передавання, зберігання, «паспорт» набору даних, версійність, відтворюваність) так, щоб вони реально підтримували інтелектуальний технічний сервіс і машинне навчання. У роботі [2] наголошено на необхідності переходу від порогових підходів до інтелектуальних алгоритмів і системи технічного сервісу, що інтегрує сенсорну базу та моделі для онлайн-оцінки стану. У роботі [3] підкреслено практичну проблему: профільні набори даних часто є фрагментарними й слабо задокументованими, тому потрібна узгоджена «доріжка» від польового збору до аналітики з контролем якості, метаданими та відтворюваними релізами даних.

У літературі з діагностики роторних машин і підшипників важливим є висновок про підвищення інформативності за рахунок поєднання каналів спостереження: вібрації, акустичної емісії та аналізу продуктів зносу в мастилі [4]. Водночас найбільш поширеною практикою у прикладних роботах залишається схема “вібрація → ознаки → класифікація стану”, де інформацію про дефект витягують через часові та спектральні характеристики [5]. Оглядові роботи з вібродіагностики підкреслюють, що методики моніторингу стану зазвичай добре працюють у контрольованих умовах, однак їх результативність істотно залежить від режимів роботи, навантаження та особливостей вимірювальної постановки (тип датчика, монтаж, параметри знімання сигналу) [6]. Окремо зростає інтерес до застосування методів машинного навчання в акустико-емісійних вимірюваннях як до додаткового (або альтернативного) джерела діагностичної інформації [7].

Загалом можна виділити два “пласти” підходів. Перший — класичний ML на інженерних ознаках, де головну роль відіграють якісне виділення інформативних характеристик у часовій, частотній і часо-частотній областях та їх відбір (зменшення розмірності, відсів зайвих ознак). Другий — глибоке навчання, яке прагне автоматизувати побудову ознак із сирих сигналів, але є більш вимогливим до репрезентативності даних і ресурсів. Для задач промислової діагностики нерідко застосовують також гібридні інженерні рішення (наприклад, поєднання спектральних уявлень з нечіткою логікою), що дозволяють формалізувати евристики експертів [8].

Показовим прикладом “прагматичного” підходу є робота [9], де запропоновано схему діагностики на базі LightGBM із багатодоменим виділенням ознак та ітеративним відбором (модифікований RFE), а також спеціальною валідацією за режимами навантаження (leave-one-loading-out), що підсилює здатність моделі узагальнювати на нові, не представлені під час навчання умови. У цій роботі автори прямо фіксують проблему: при зміні режиму між навчанням і тестом якість різко падає, а контроль відбору ознак і валідації за режимами дозволяє зробити модель стійкішою.

Окремою лінією досліджень є діагностика за змінних умов роботи (швидкість, навантаження, інші датчики/стенди), що в сучасних термінах описують як доменний зсув (domain shift). Суть проблеми проста: модель навчають на «джерельних» даних (source domain), а застосовують на «цільових» (target domain), і ці дані вже не з одного розподілу. У роботі [10] ця ситуація описана як порушення базового припущення “train і test з одного розподілу”, що особливо проявляється при зміні робочих умов. Як вихід пропонується доменна адаптація, зокрема безнаглядне узгодження доменів через вирівнювання підпросторів (subspace alignment), щоб класифікатор, навчений на source, працював на target без повної перенавчальної розмітки.

Близькими за ідеологією є підходи domain-adversarial transfer learning, де модель навчається так, щоб ознаки були “схожими” між доменами. У роботі [11] доменна

адаптація розглядається як спосіб перенесення діагностичних моделей між машинами/умовами з економією розмітки. Автори вводять у контекст діагностики Domain-Adversarial Neural Networks (DANN) та наголошують, що без таких механізмів моделі схильні перенавчатися й деградувати на нових машинах і режимах. Також запропоновано уніфікований протокол експериментальної перевірки для порівняння методів адаптації.

Лінію доменної адаптації розвивають роботи зі спеціалізованими варіантами адаптації для підшипників: domain-conditioned adaptation для складних режимів [12], dynamic domain adaptation для змінних умов [13], multi-domain adversarial transfer із урахуванням інформації про механізми відмов [14], а також комбіновані схеми з одночасним використанням CNN, метрик розбіжності розподілів і domain-adversarial навчання [15]. Такі підходи важливі тим, що вони підсилюють переносимість моделей, але водночас підвищують вимоги до даних: потрібні узгоджені протоколи експериментів, відслідковування доменів і метаданих, а також контроль якості розмітки та релізів даних.

Другий критичний чинник практики — шум міток (label noise). На відміну від шуму сигналу (перешкоди датчика), шум міток означає, що частина прикладів у навчальному наборі має неправильний клас: помилки в журналах сервісу, «перехідні» стани, суб'єктивність експертної розмітки, змішані режими. Через це модель може вчитися на суперечливих прикладах і втрачати узагальнюваність. У роботі [16] прямо зазначено, що в реальних застосуваннях дані часто є дисбалансними (мало прикладів рідкісних відмов) і водночас сильно зашумленими, через що традиційні схеми діагностики демонструють низьку якість. В якості відповідей на ці виклики розглядаються покращення підготовки даних, стратегії балансування, а також робастні схеми навчання з використанням синтетичних даних і гібридних моделей.

Поряд із повною класифікацією станів у літературі розвиваються й підходи виявлення аномалій (anomaly detection), де модель навчається переважно на «нормі», а відхилення трактуються як потенційні несправності. Для акустичних і вібраційних даних промислових процесів показано ефективність автоенкодерів, у яких аномалії проявляються через зростання похибки реконструкції [17]. Для транспортних застосувань розглядаються й сценарії раннього виявлення несправностей за звуковими сигналами автомобіля [18]. Окремо підкреслюється важливість явного врахування доменного зсуву при оцінюванні систем виявлення аномалій у машинному моніторингу (зокрема, у постановці DCASE 2021 Task 2 навчальні та тестові дані належать до різних доменів) [19]. Також показано, що синтетичне розширення вибірки може підвищувати стійкість підходів до нових умов та варіацій запису [20]. Як приклад модальності, що добре масштабуються на транспортні задачі, наведено й підхід аудіодіагностики двигуна з підбором ознак та оптимізованими класифікаторами [21].

Для мобільних машин агропромислового виробництва зазначені проблеми часто посилюються організаційними обмеженнями: сезонність, різноманітність умов, обмежена сенсорна оснащеність, розподіленість даних між власником техніки, сервісом і виробником. У роботі [22] звертається увага, що в агросекторі дані про машини часто розпорошені, а сенсорні дані можуть бути недостатні для сервісних провайдерів; як альтернатива пропонується організація прогностичного обслуговування на основі сервісних записів і платформи взаємодії «фермер–сервіс».

Таким чином, огляд показує: існує значний спектр моделей — від ознакового машинного навчання (зокрема моделей градієнтного бустингу) до глибоких нейронних мереж; активно розвиваються методи перенесення і адаптації між режимами та стендами; окремо розробляються підходи до дисбалансу й шуму розмітки та до виявлення аномалій. Проте в багатьох публікаціях ці напрями подані як «окремі

рішення”, і рідше — як інженерна методика вибору, що підказує: коли достатньо простішої моделі з контролем якості даних, а коли без доменної адаптації і робастифікації вже не обійтися. Саме цей розрив між “наявністю методів” і “наявністю зрозумілих правил вибору під реальні обмеження” і формує мотивацію нашої роботи, де доменний зсув і шум міток розглядаються спільно в контексті інтелектуального технічного сервісу.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення умовної методики (правил) вибору робастних моделей вібродіагностики вузлів мобільних машин за наявності доменного зсуву та шуму міток, придатної для практичного впровадження в інтелектуальній системі технічного сервісу [1–3].

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі завдання:

1. Формалізувати основні фактори, що визначають складність діагностичної задачі в польових умовах: тип/рівень доменного зсуву (зміна режимів, навантажень, датчиків, стенд–експлуатація), обсяг і якість розмічених даних, рівень зашумлення сигналів і міток;

2. Визначити класи моделей і стратегій навчання, доцільні за різних комбінацій зазначених факторів: моделі на інженерних ознаках (зокрема, моделі градієнтного бустингу), гібридні рішення, робастні ансамблеві підходи, напівнаглядові схеми, а також методи доменної адаптації/перенесення [9–15];

3. Побудувати матрицю рішень як інженерний інструмент вибору моделі та процедури навчання з урахуванням умов недоцільності застосування складних стратегій (дефіцит даних, відсутність контролю якості, ресурсні обмеження);

4. Перевірити працездатність методики на задачах діагностики підшипників кочення та редукторів із контрольованим варіюванням доменного зсуву й шуму міток, порівнявши базові та робастифіковані підходи за узгодженими метриками якості;

5. Сформулювати практичні рекомендації щодо інтеграції методики в контур технічного сервісу (зокрема, вимоги до даних, метаданих і процедур контролю якості, необхідних для відтворюваного застосування матриці рішень) [3].

Об’єктом дослідження є процес інтелектуальної оцінки технічного стану вузлів мобільних машин за вібраційними сигналами. Предметом дослідження є методи та правила вибору робастних моделей діагностики за умов доменного зсуву і шуму міток.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг та обслуговування за станом (CBM – condition-based maintenance) у цій роботі розглядаються як практична основа підвищення надійності мобільних машин: рішення про обслуговування приймається не лише за напрацюванням, а за фактичними ознаками деградації вузлів, що визначаються за сенсорними сигналами та моделями діагностики [1–3]. Нижче подано підхід, який дозволяє “прив’язати” вибір моделі та процедури навчання до реальних умов збору даних — насамперед до доменного зсуву та шуму міток.

Нехай маємо джерельний домен S (source domain) — набір даних, на якому навчається модель, та цільовий домен T (target domain) — дані, на яких модель застосовується. Доменний зсув означає, що розподіл даних у S і T різниться: змінюються режими роботи, навантаження, швидкості, датчики, умови монтажу, або ж відрізняються стендові та експлуатаційні умови. Наслідок цього — зниження якості при перенесенні моделі, навіть якщо в S вона показує високу точність.

У прикладній діагностиці доцільно розрізняти принаймні два “типи” зсуву: зсув за режимом/умовами (зміна навантаження, частоти обертання, режиму редуктора або стенду) і зсув за ступенем деградації, коли джерельних даних представлено одну “глибину” дефекту, а в цільових — іншу.

За інженерним змістом ці два типи впливають на модель по-різному: при зсуві за режимом/умовами змінюється “фон” і співвідношення компонент у сигналі, тоді як при

зсуві за ступенем деградації змінюється власне прояв дефекту. Саме тому в літературі активно розвиваються методи доменної адаптації та перенесення, які намагаються узгодити S і T без повної повторної розмітки [10–15].

Шум міток трактуємо як ситуацію, коли частина прикладів у навчальному наборі має неправильний клас. На практиці це наслідок помилок у сервісних журналах, неоднозначності “перехідних” режимів, людського фактору, а також зміни критеріїв віднесення стану до класу. Важливо відрізнити шум міток від шуму сигналу (перешкоди датчика): перший “ламає” навчальну ціль, тоді як другий знижує інформативність ознак. У поєднанні з доменним зсувом шум міток робить небезпечним пряме застосування складних моделей без перевірки їхньої стійкості, що особливо актуально для польових умов [3,16].

Виходячи з практики прикладної вібродіагностики та огляду літератури, розглянуто наступні базові сімейства рішень.

1. Класична модель на інженерних ознаках: формування набору часових і спектральних характеристик (статистичні моменти, енергії в діапазонах, спектральні індекси тощо) та навчання класифікатора типу градієнтного бустингу дерев (LightGBM). Цей підхід є відносно стійким до помірного шуму міток і дає відтворюваний базовий рівень якості за помірних ресурсів; додатково перевагою є можливість контролю/відбору ознак та інтерпретації їхнього внеску [9].

2. Ансамблеві/розширені ознаки (naive ensemble): збільшення розмірності простору ознак (наприклад, за рахунок поєднання груп ознак або їхніх взаємодій) і навчання більш “ємної” моделі. Практичний ризик такого підходу — підвищена чутливість до помилок розмітки та до несумісності масштабів ознак, тому нормалізація/стандартизація стає обов’язковою умовою (це прямо узгоджується з вимогами до відтворюваного пайплайна, сформульованими у [3]).

3. Двоступенева робастифікація з псевдорозміткою: на першому кроці базова “стійка” модель (зазвичай на інженерних ознаках) формує псевдомітки для даних, де розмітка ненадійна або відсутня. На другому кроці навчається більш “ємна” модель (ансамбль/гібрид), але вже на псевдомітках, які додатково контролюються за рівнем впевненості. Така схема є простим інженерним компромісом між робастністю (1-й крок) і здатністю моделі витягувати складні закономірності (2-й крок), але її ефективність залежить від якості псевдоміток.

4. Доменна адаптація для ознак: коли зсув домену значний, навіть “стійкі” класичні моделі можуть різко деградувати. У такому разі доцільно застосовувати прості та відтворювані засоби узгодження доменів (наприклад, CORAL для вирівнювання коваріацій), а вже після цього — навчання моделі на узгоджених ознаках [10–15]. У нашій роботі цей елемент використано саме як інженерний «мінімум» для сильного доменного зсуву.

Запропонована методика реалізована як матриця рішень, що поєднує три групи умов:

- характер доменного зсуву (тип і «суворість»: зсув за режимом/умовами або за ступенем деградації; помірний чи сильний);
- стан розмітки (обсяг розмічених даних, очікуваний рівень шуму міток);
- обмеження впровадження (можливість валідації на цільових умовах, вимоги до відтворюваності пайплайна, ресурсні обмеження).

Логіка матриці має форму правил «якщо... то...» і включає також умови недоцільності застосування окремих стратегій. Узагальнено це можна подати так:

- якщо доменний зсув помірний, а в наявності є хоча б мінімальна можливість контролю якості (валідація/калібрування), то доцільно починати з класичної моделі на ознаках; при зростанні шуму міток переходити до двоступеневої робастифікації

(псевдорозмітка + фільтрація за впевненістю), оскільки «ємні» моделі більш чутливі до помилкових класів [9, 16].

– якщо доменний зсув сильний (наприклад, інший режим редуктора або інший стенд), то «переускладнення» архітектури без адаптації домену часто не дає вигаду. У такому разі базовим рішенням є класична модель + доменна адаптація ознак (мінімально інвазивний і відтворюваний крок), а робастифіковані ансамблі застосовуються лише як другий рівень — за наявності достатньої впевненості у псевдомітках.

– якщо базова модель у цільових умовах демонструє занадто низьку якість (або немає можливості її оцінити), псевдорозмітка здатна «закріпити» помилки й погіршити результат. У таких ситуаціях доцільніше зосередитись на збиранні невеликого «довіреного» набору міток у цільовому домені та/або на простіших, більш контрольованих рішеннях.

Таблиця 1 – Матриця рішень вибору моделей вібродіагностики за доменного зсуву та шуму міток

Доменний зсув	Доступні дані	Якість міток	Рекомендована модель/стратегія	Очікуване значення F1
Зсув навантаження (режиму)	Даних достатньо (>50%)	Мітки чисті	Гібридна модель або LightGBM	0.98 – 1.00
Зсув навантаження (режиму)	Даних мало (10–20%)	Мітки зашумлені (≈10%)	Гібрид + псевдорозмітка	0.90 – 0.95
Зсув за ступенем дефекту	Даних достатньо (>50%)	Мітки чисті	Гібрид (обов'язково)	0.95 – 0.96
Зсув за ступенем дефекту	Даних достатньо (>50%)	Мітки чисті, але сигнал зашумлений	Гібрид (обов'язково)	0.40 – 0.50
Зсув за ступенем дефекту	Даних мало (10–20%)	Будь-яка	LightGBM (з обережністю)	< 0.70

Джерело: розроблено авторами

Перевірку методики виконано на двох сценаріях із контрольованим доменним зсувом та ін'єкцією шуму міток (симетричне випадкове спотворення частини навчальних міток). Як основну метрику використано Macro-F1, що є інформативною для багатокласової задачі та не маскує провали по окремих класах.

Сценарій А (помірний зсув): CWRU, зсув за ступенем дефекту.

У цьому сценарії використано публічний набір даних CWRU (Case Western Reserve University Bearing Data Center) [23]. Джерельний домен відповідав меншому дефекту підшипника, а цільовий — більшому (0.007" → 0.021"). Тут 0.007" і 0.021" — це діаметр штучно сформованого дефекту (у дюймах), який у CWRU використовується для позначення ступеня пошкодження; таким чином моделюється помірний зсув за ступенем дефекту. Розглянуто три рівні шуму міток у навчанні: 15%, 20%, 25%. Порівнювалися: класична модель (LightGBM на інженерних ознаках), наївний ансамбль, робастифікований ансамбль із псевдорозміткою та робастифікований підхід із фільтрацією псевдоміток за впевненістю (поріг 0.85).

Таблиця 2 – Результати для CWRU за високого шуму міток (метрика Macro-F1)

Рівень шуму, %	LightGBM	Гібрид	Наївний ансамбль	Робастифікований ансамбль	Робастифікований ансамбль + фільтрація
15	0.6171	0.6609	0.7059	0.6902	0.6969
20	0.5750	0.8735	0.7032	0.8200	0.9368
25	0.6152	0.6003	0.6051	0.7667	0.8018

Джерело: розроблено авторами

Як видно з табл. 2, за шуму міток 20% застосування фільтрації псевдоміток дає найбільший ефект (приріст відносно наївного ансамблю становить близько 14% за Macro-F1), тобто фільтрація справді «очищує» навчальний сигнал для 2-го етапу робастифікації. Важливо, що класична модель у цьому сценарії демонструє відносно стабільний рівень якості, підтверджуючи її роль «надійного першого кроку» для генерації псевдоміток.

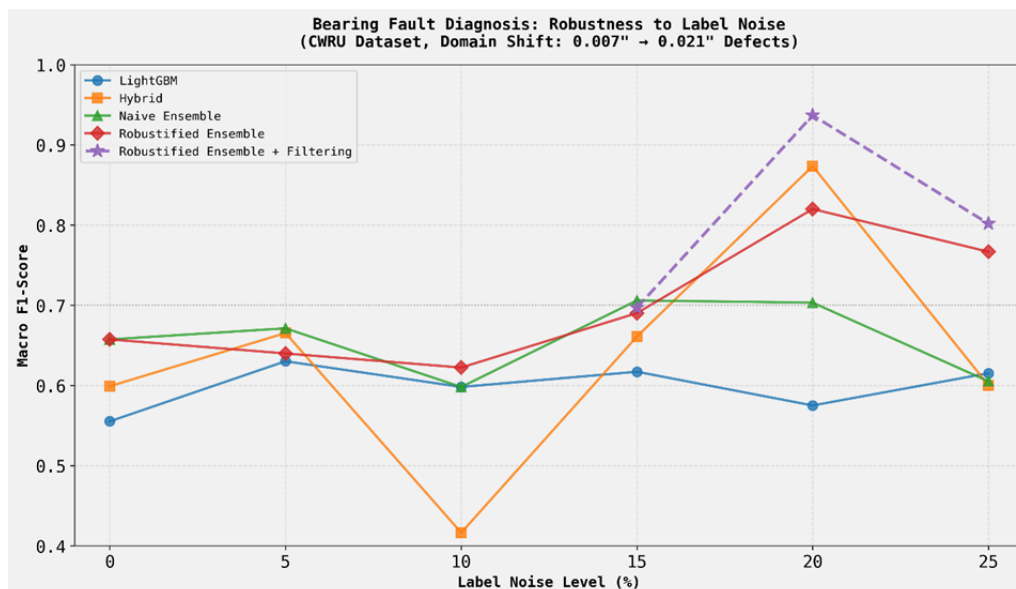


Рисунок 1 – Залежність Macro-F1 від рівня шуму міток для сценарію CWRU (помірний доменний зсув)
Джерело: розроблено авторами.

Сценарій В (сильний зсув): SEU, cross-condition (20 Hz–0 V → 30 Hz–2 V).

Сильний доменний зсув змодельовано на публічних даних редуктора SEU [24] при переході між двома режимами роботи (20 Hz–0 V → 30 Hz–2 V), де змінюються динаміка збудження та «фон» сигналу. Позначення 20–0 та 30–2 відповідають парі «швидкість обертання – налаштування навантаження» на стенді: 20 Hz і 30 Hz — режим швидкості, а 0 V і 2 V — керувальна напруга навантажувального вузла (що задає рівень навантаження/моменту), а не вихід вібродатчика. Для зниження розбіжності між доменами для інженерних ознак застосовано просту доменну адаптацію типу CORAL, після чого оцінено вплив шуму міток 15%, 20%, 25% для класичної моделі та двох ансамблевих стратегій.

Таблиця 3 – Результати для SEU за сильного доменного зсуву (Macro-F1)

Рівень шуму, %	Класична модель (CORAL+LightGBM)	Наївний ансамбль	Робастифікований ансамбль
15	0.5461	0.3453	0.3618
20	0.5435	0.3769	0.3651
25	0.5445	0.3491	0.4141

Для сильного доменного зсуву спостерігається інша картина, ніж у сценарії А: класична модель на адаптованих ознаках є найстабільнішою і майже не змінюється з ростом шуму міток, тоді як ансамблеві підходи суттєво поступаються їй. Двоступенева робастифікація дає нестійкий ефект: невелике покращення відносно наївного ансамблю при 15% і найбільше — при 25% шуму, але погіршення при 20% шуму. Це підтверджує практичний висновок матриці рішень: за сильного зсуву доцільно починати з простішої, контрольованої моделі з адаптацією домену, а складні ансамблеві стратегії застосовувати обережно.

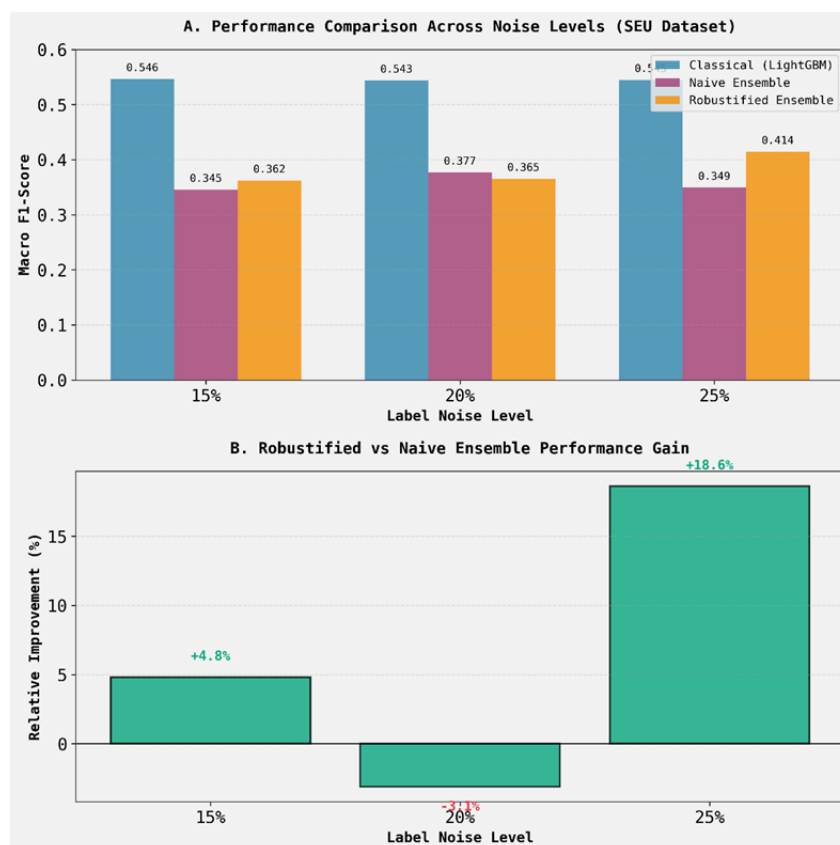


Рисунок 2 – Порівняння Macro-F1 для сценарію SEU за різного рівня шуму міток та відносний вигреш робастифікації відносно наївного ансамблю

Джерело: розроблено авторами

Узагальнюючи обидва сценарії, можна зробити інженерний висновок: (1) за помірного зсуву робастифіковані ансамблі з контролем якості псевдоміток можуть давати суттєвий вигреш при високому шумі розмітки; (2) за сильного зсуву «безпечнішим» вибором є класична модель на добре задокументованих інженерних ознаках із простою доменною адаптацією; (3) фільтрація за впевненістю підвищує стабільність двоступеневої робастифікації, але не скасовує потребу в коректно організованих даних і валідації на цільових умовах [3].

Висновки.

1. Обґрунтовано, що для вібродіагностики вузлів мобільних машин у реальних умовах доменний зсув і шум міток є не винятком, а типовими чинниками, які системно знижують якість моделей при перенесенні з навчального набору на експлуатаційні дані.

2. Запропоновано умовну методику вибору моделей у вигляді матриці рішень, що пов'язує «суворість» доменного зсуву, доступність і надійність розмітки, а також обмеження впровадження з доцільним класом рішень (моделі на інженерних ознаках, робастифіковані ансамблі, напівнаглядні стратегії, доменна адаптація).

3. Для сценарію CWRU з помірним доменним зсувом за ступенем дефекту показано, що робастифікований ансамбль із фільтрацією псевдоміток за впевненістю може суттєво підвищувати якість при високому шумі міток; максимальний ефект зафіксовано при 20% шуму (Macro-F1 = 0.937).

4. Для сценарію SEU зі сильним зсувом між режимами (cross-condition) встановлено, що найстабільнішим рішенням є класична модель на інженерних ознаках із простою доменною адаптацією (CORAL+LightGBM), тоді як ансамблеві стратегії демонструють нижчу якість і нестійкий ефект робастифікації.

5. Сформовано практичні рекомендації для інтеграції в інтелектуальну систему технічного сервісу: (а) починати з відтворюваного базового пайплайна та дисципліни даних/метаданих; (б) застосовувати псевдорозмітку лише за наявності можливості валідації на цільових умовах; (в) за сильного доменного зсуву пріоритетно використовувати узгодження доменів та контрольовані моделі, а «ускладнення» архітектури виконувати поетапно.

6. Подальші дослідження доцільно спрямувати на перевірку методики на польових даних мобільних машин та на розширення матриці рішень для інших модальностей (акустика, температура, струмові сигнали), а також на уточнення критеріїв кількісної оцінки «суворості» доменного зсуву.

Список літератури

1. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О.В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. 428с.
2. Матвієнко О. О., Аулін В. В. Класифікація типів сигналів та методів машинного навчання для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин підприємств агропромислового виробництва. *Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки*. 2025. № 11(42)_II. С. 298–312. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.298-312.
3. Матвієнко О. О., Аулін В. В., Гриньків А.В. Стан та напрями розвитку архітектури даних для інтелектуальної оцінки технічного стану мобільних машин підприємств агропромислового виробництва. *Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки*. 2025. № 12(43)_I. С. 227–237. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.227-237.
4. Loutas T. H., Roulias D., Pauly E., Kostopoulos V. The combined use of vibration, acoustic emission and oil debris on-line monitoring towards a more effective condition monitoring of rotating machinery // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25, no. 4. P. 1339–1352. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.11.007.
5. Oyedola K. O. Diagnostics of Bearing Defects Using Vibration Signal // *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2012. Vol. 4, no. 6. P. 821–825. DOI: 10.7763/IJCEE.2012.V4.612.
6. Sen A., Majumder M. C., Mukhopadhyay S., Biswas R. K. Condition Monitoring of Rotating Equipment Considering the Cause and Effects of Vibration: A Brief Review // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2017. Vol. 7, Iss. 1. P. 36–49.
7. Ciaburro G., Iannace G. Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 20. 10476. DOI: 10.3390/app122010476.
8. Da Silva R. R., Da S. Costa E., De Oliveira R. C. L., Mesquita A. L. A. Fault Diagnosis in Rotating Machine Using Full Spectrum of Vibration and Fuzzy Logic // *Journal of Engineering Science and Technology*. 2017. Vol. 12, no. 11. P. 2952–2964.
9. Saberi A. N., Belahcen A., Sobra J., Vaimann T. LightGBM-Based Fault Diagnosis of Rotating Machinery Under Changing Working Conditions Using Modified Recursive Feature Elimination // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 81910–81925. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3195939.
10. Zhang B., Li W., Tong Z., Zhang M. Bearing fault diagnosis under varying working condition based on domain adaptation // *arXiv preprint*. 2017. arXiv:1707.09890.
11. Wang Q., Michau G., Fink O. Domain Adaptive Transfer Learning for Fault Diagnosis // *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/PHM-Paris.2019.00054.
12. Zhang X., Gu G. Fault Diagnosis for Rolling Bearings Under Complex Working Conditions Based on Domain-Conditioned Adaptation // *Machines*. 2024. Vol. 12, no. 11. Art. 787. DOI: 10.3390/machines12110787.
13. Zhang Q., Lv Z., Hao C., Yan H., Fan Q. Intelligent Fault Diagnosis of Bearings in Unsupervised Dynamic Domain Adaptation Networks Under Variable Conditions // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 82911–82925. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3413087.
14. Zhong X. Failure Mechanism Information-Assisted Multi-Domain Adversarial Transfer Fault Diagnosis Model for Rolling Bearings under Variable Operating Conditions // *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 3. Art. 1036. DOI: 10.3390/s24031036.
15. Li X., Wang J., Wang J., Wang J., Li Q., Yu X., Chen J. Research on Unsupervised Domain Adaptive Bearing Fault Diagnosis Method Based on Migration Learning Using MSACNN-IJMMMD-DANN // *Machines*. 2025. Vol. 13. Art. 618. DOI: 10.3390/machines13070618.
16. Jalayer M., Kaboli A., Orsenigo C., Vercellis C. Fault Detection and Diagnosis with Imbalanced and Noisy Data: A Hybrid Framework for Rotating Machinery // *Machines*. 2022. Vol. 10. Art. 237. DOI: 10.3390/machines10040237.

17. Duman T. B., Bayram B., İnce G. Acoustic Anomaly Detection Using Convolutional Autoencoders in Industrial Processes // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1028. P. 397–406. DOI: 10.1007/978-3-030-20055-8_41.
18. Nasim F., Masood S., Jaffar A., Ahmad U., Rashid M. Intelligent Sound-Based Early Fault Detection System for Vehicles // *Computer Systems Science and Engineering*. 2023. Vol. 46, no. 3. P. 3175–3190. DOI: 10.32604/csse.2023.034550.
19. Kawaguchi Y., Imoto K., Koizumi Y., Harada N., Niizumi D., Dohi K., Tanabe R., Purohit H., Endo T. Description and Discussion on DCASE 2021 Challenge Task 2: Unsupervised Anomalous Sound Detection for Machine Condition Monitoring under Domain Shifted Conditions // *Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 : Proceedings*. Online, 15–19 Nov 2021. P. 186–190. ISBN 978-84-09-36072-7.
20. Ignjatovska A., Shishkovski D., Pecioski D. Classification of present faults in rotating machinery based on time and frequency domain feature extraction. *Vibroengineering Procedia*. 2023. Vol. 51. P. 22–28. DOI: 10.21595/vp.2023.23667.
21. Tuleski B. L., Yamaguchi C. K., Stefenon S. F., Coelho L. S., Mariani V. C. Audio-Based Engine Fault Diagnosis with Wavelet, Markov Blanket, ROCKET, and Optimized Machine Learning Classifiers // *Sensors*. 2024. Vol. 24. Art. 7316. DOI: 10.3390/s24227316.
22. Lüttenberg H., Bartelheimer C., Beverungen D. Designing Predictive Maintenance for Agricultural Machines // *Proceedings of the Twenty-Sixth European Conference on Information Systems (ECIS 2018)*. Portsmouth, UK, 2018. Research Paper No. 153. URL: https://aisel.aisnet.org/ecis2018_rp/153
23. Case Western Reserve University Bearing Data Center: веб-сайт. URL: <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> (дата звернення: 01.03.2026).
24. Cathy Siyu. Mechanical-datasets. [Dataset]. GitHub. URL: <https://github.com/cathysiyu/Mechanical-datasets> (дата звернення: 01.03.2026).

References

1. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Holovaty, A. O., Lysenko, S. V., Holub, D. V., Kuzyk, O. V., & Tykhyi, A. (2020). Methodological foundations of design and operation of intelligent transportation and manufacturing systems. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Matviienko, O. O., Aulin V.V. (2025). Classification of signal types and machining methods for intelligent assessment of the technical mill of mobile machines for agro-industrial production. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (11(42)_II), 298-312. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.298-312](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.298-312) [in Ukrainian].
3. Matviienko, O. O., Aulin V.V. (2025). Status and development directions of data architecture for intelligent assessment of the technical condition of mobile machines of agro-industrial enterprises. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, (12(43)_I), 227-237. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.227-237](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.227-237) [in Ukrainian].
4. Loutas, T. H., Roulias, D., Pauly, E., & Kostopoulos, V. (2011). The combined use of vibration, acoustic emission and oil debris on-line monitoring towards a more effective condition monitoring of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(4), 1339–1352. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.007>
5. Oyedola, K. O. (2012). Diagnostics of bearing defects using vibration signal. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 4(6), 821–825. <https://doi.org/10.7763/IJCEE.2012.V4.612>
6. Sen, A., Majumder, M. C., Mukhopadhyay, S., & Biswas, R. K. (2017). Condition monitoring of rotating equipment considering the cause and effects of vibration: A brief review. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 7(1), 36–49.
7. Ciaburro, G., & Iannace, G. (2022). Machine-learning-based methods for acoustic emission testing: A review. *Applied Sciences*, 12(20), 10476. <https://doi.org/10.3390/app122010476>
8. Da Silva, R. R., Da S. Costa, E., De Oliveira, R. C. L., & Mesquita, A. L. A. (2017). Fault diagnosis in rotating machine using full spectrum of vibration and fuzzy logic. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(11), 2952–2964.
9. Saberi, A. N., Belahcen, A., Sobra, J., & Vaimann, T. (2022). LightGBM-based fault diagnosis of rotating machinery under changing working conditions using modified recursive feature elimination. *IEEE Access*, 10, 81910–81925. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3195939>
10. Zhang, B., Li, W., Tong, Z., & Zhang, M. (2017). *Bearing fault diagnosis under varying working condition based on domain adaptation* (arXiv:1707.09890). arXiv.
11. Wang, Q., Michau, G., & Fink, O. (2019). Domain adaptive transfer learning for fault diagnosis. In *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PHM-Paris.2019.00054>
12. Zhang, X., & Gu, G. (2024). Fault diagnosis for rolling bearings under complex working conditions based on domain-conditioned adaptation. *Machines*, 12(11), 787. <https://doi.org/10.3390/machines12110787>

13. Zhang, Q., Lv, Z., Hao, C., Yan, H., & Fan, Q. (2024). Intelligent fault diagnosis of bearings in unsupervised dynamic domain adaptation networks under variable conditions. *IEEE Access*, 12, 82911–82925. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3413087>
14. Zhong, X. (2024). Failure mechanism information-assisted multi-domain adversarial transfer fault diagnosis model for rolling bearings under variable operating conditions. *Sensors*, 24(3), 1036. <https://doi.org/10.3390/s24031036>
15. Li, X., Wang, J., Wang, J., Wang, J., Li, Q., Yu, X., & Chen, J. (2025). Research on unsupervised domain adaptive bearing fault diagnosis method based on migration learning using MSACNN-IJMMMD-DANN. *Machines*, 13, 618. <https://doi.org/10.3390/machines13070618>
16. Jalayer, M., Kaboli, A., Orsenigo, C., & Vercellis, C. (2022). Fault detection and diagnosis with imbalanced and noisy data: A hybrid framework for rotating machinery. *Machines*, 10, 237. <https://doi.org/10.3390/machines10040237>
17. Duman, T. B., Bayram, B., & İnce, G. (2020). Acoustic anomaly detection using convolutional autoencoders in industrial processes. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1028, pp. 397–406). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20055-8_41
18. Nasim, F., Masood, S., Jaffar, A., Ahmad, U., & Rashid, M. (2023). Intelligent sound-based early fault detection system for vehicles. *Computer Systems Science and Engineering*, 46(3), 3175–3190. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.034550>
19. Kawaguchi, Y., Imoto, K., Koizumi, Y., Harada, N., Niizumi, D., Dohi, K., Tanabe, R., Purohit, H., & Endo, T. (2021). Description and discussion on DCASE 2021 Challenge Task 2: Unsupervised anomalous sound detection for machine condition monitoring under domain shifted conditions. In *Proceedings of the Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events 2021 (DCASE 2021 Workshop)* (pp. 186–190).
20. Ignjatovska, A., Shishkovski, D., & Pecioski, D. (2023, October 20–21). *Classification of present faults in rotating machinery based on time and frequency domain feature extraction*. *Vibroengineering Procedia*, 51, 22–28. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23667>
21. Tuleski, B. L., Yamaguchi, C. K., Stefenon, S. F., Coelho, L. S., & Mariani, V. C. (2024). Audio-based engine fault diagnosis with wavelet, Markov blanket, ROCKET, and optimized machine learning classifiers. *Sensors*, 24, 7316. <https://doi.org/10.3390/s24227316>
22. Lüttenberg, H., Bartelheimer, C., & Beverungen, D. (2018). Designing predictive maintenance for agricultural machines. In *Proceedings of the Twenty-Sixth European Conference on Information Systems (ECIS 2018)*. https://aisel.aisnet.org/ecis2018_rp/153
23. Case Western Reserve University. (n.d.). *Bearing Data Center*. Case School of Engineering. <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter>
24. Cathy Siyu. (n.d.). *Mechanical-datasets* [Dataset]. GitHub. <https://github.com/cathysiyu/Mechanical-datasets>

Oleksandr Matvienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksander Livitskyi**, PhD tech. sci., **Andriy Gryniv**, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methodology for Selecting Robust Vibration Diagnostics Models Under Domain Shift and Label Noise

This paper addresses a practical issue in vibration-based condition monitoring of mobile machines: diagnostic models that perform well on training data often degrade in the field due to domain shift (changes in operating regime, load, sensor mounting, and test-rig vs. real operation) and label noise (imprecise service records, ambiguous transition states, and human annotation errors).

We propose a conditional model-selection methodology formulated as a decision matrix that links domain-shift type and severity, labeled data volume and expected label reliability, and deployment constraints (validation feasibility and reproducibility requirements) to an appropriate class of models and training strategies.

The methodology is validated on two public scenarios with injected symmetric label noise: a moderate severity shift on the CWRU bearing dataset and a severe cross-condition shift on the SEU gearbox dataset. For the moderate shift, a two-stage robustification with confidence-based pseudo-label filtering achieves the best performance under high label noise, reaching Macro-F1 = 0.9368 at 20% noise. For the severe shift, a classical pipeline with simple feature-level domain alignment remains the most stable option, while ensemble strategies provide lower and less consistent gains. The results yield actionable guidance for integrating robust diagnostics into an intelligent technical service system under real-world constraints.

mobile machines, vibration diagnostics, domain shift, label noise, robust learning, pseudo-labeling, domain adaptation, rolling bearings; gearbox

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

УДК 629.113.073.5:621.89:658.7 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).241-249](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).241-249)

А. В. Новицький, доц., канд. техн. наук, **В. І. Мельник**, доц., канд. екон. наук,
В. О. Лісецький, доц., канд. техн. наук, **Ю. А. Новицький**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,
Україна*

e-mail: NovitskiyAV@ukr.net; melnik@nubip.edu.ua; forestvitaliy@gmail.com;

Novickii_yurka@ukr.net

Управління ресурсом фільтрів очищення оливи в логістичних системах технічного обслуговування ДВЗ

Мета статті є висвітлення досліджень щодо науково обґрунтованих підходів до ефективного управління ресурсом фільтрів очищення оливи у логістичних системах технічного обслуговування автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) у реальних умовах. Автори акцентують увагу на проблемах прискореного забруднення фільтрів через зміну режимів роботи, інтенсивності використання техніки та агресивних факторах (сезонність, якість палива), що призводить до зростання логістичних витрат, простоїв обладнання та скорочення ресурсу двигуна. Дослідження спрямоване на обґрунтування оптимальних інтервалів заміни фільтрів на основі статистичних даних експлуатації автомобілів Mazda, розробку принципів прогнозування залишкового ресурсу та інтеграцію моніторингу стану мастила для мінімізації витрат у системі ТО. Основна мета – підвищення надійності та економічної ефективності логістики обслуговування автопарку шляхом переходу від фіксованих до адаптивних графіків заміни.

У роботі проведено комплексний аналіз статистичних даних щодо частоти заміни фільтрів очищення оливи на автомобілях Mazda в реальних умовах експлуатації. Встановлено ключові показники ресурсу фільтрів у системах змащення ДВЗ: середній інтервал заміни – 10,04 тис. км пробігу, середньоквадратичне відхилення – 3,04 тис. км, коефіцієнт варіації – 0,45. Розглянуто вплив конструктивних особливостей фільтрів (синтетичні волокна, багатошарові композити PE01-14-302B для SKYACTIV-G 2.0), що підвищують брудомісність та ефективність фільтрації. Запропоновано методи управління ресурсом: моніторинг вмісту механічних домішок, кислотного та лужного дола, в'язкості мастила для подовження інтервалів заміни; адаптивні графіки ТО з урахуванням режимів експлуатації; прогнозування моделями деградації (згідно ДСТУ 3004-95). Проаналізовано типи несправності (засмічення, розрив дифузора), етапи забруднення (початковий – 0,2 г, критичний – 1,0 г) та рекомендації щодо запасних частин. Розроблено принципи оптимізації логістики: скорочення запасів, інтеграція сенсорів у бортовий комп'ютер, цифрове планування ТО. Дослідження базується на лабораторних тестах, польових даних та літературі джерелах, з акцентом на галузеве машинобудування, транспортну галузь з агрологістикою.

Висновки дослідження підтверджують, що частина заміни фільтрів на фіксований пробіг є економічно невиправданою, тоді як моніторинг стану мастила дозволяє подовжити інтервал на 20-30%, оптимізувати запаси та знизити витрати ТО на 15-25%. Застосування синтетичних фільтрів створює передумови для підвищення ресурсу ДВЗ, зменшення простоїв та екологічних ризиків. Рекомендовано впроваджувати реальний час моніторингу забруднення, цифрові платформи для автопарків та стандартизовані протоколи для логістичного обслуговування.

фільтр для очищення оливи, показники надійності, автомобіль, періодичність заміни

Постановка проблеми. Фільтри для очищення оливи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) відіграють важливе значення щодо підтримки чистоти оливи, зменшення зношування та підвищення ресурсу деталей. Однак реальні умови експлуатації, які характерні для систем фільтрації оливи, включають значну кількість об'єктів досліджень, зміну режимів роботи, різні умови навколишнього середовища, які

прискорюють старіння оливи та забруднення фільтрів, що призводить до низки негативних наслідків [1]. До таких негативних наслідків, зокрема, належать: зростання витрат на заміну оливи та фільтрів; збільшення позапланових простоїв техніки через необхідність технічного обслуговування або усунення несправностей; зменшення ресурсу двигуна через прискорений знос деталей; підвищення екологічного навантаження через частіші заміни оливи й фільтрів, а також додаткові витрати на утилізацію відпрацьованої оливи та використаних фільтрів.

Також надмірно часта заміна фільтрів без обґрунтованого контролю технічного стану є економічно невигідною. Вже існує цілий ряд наукових і практичних підходів, які базуються на моніторингу властивостей оливи, включаючи вміст домішок та металевих частинок, показників окислення, кислотності чи лужності тощо, які дозволяють коригувати інтервали експлуатації та періодичність заміни як оливи, так і фільтрів. Дослідження, які наведені в [2, 3] показують, що завдяки аналізу стану оливи можна продовжити інтервали заміни оливи на кілька десятків відсотків та зменшити витрати на технічне обслуговування під час заміни фільтрів.

Але за таких умов, слід також звернути увагу на досвід використання та особливості обслуговування фільтрів для очищення оливи ДВЗ: не завжди враховуються режимні навантаження техніки (часті пуски або ж зупинки, переміщення, велика частка роботи на мінімальних обертах тощо); відсутні чіткі методичні рекомендації для визначення ресурсів фільтрів в таких системах; постійна потреба в пошуку балансу між ризиком недостатнього захисту двигуна через забруднення чи деградацію фільтра та економічними витратами на його заміну.

Таким чином, проблема управління ресурсом фільтрів очищення оливи ДВЗ, яка потребує вирішення, полягає в тому, щоб розробити методи та моделі управління ресурсом масляних фільтрів у логістичних системах технічного обслуговування ДВЗ. Вони забезпечать надійний захист двигунів за різних режимів експлуатації, оптимальне використання, зниження витрат на технічне обслуговування та зменшення негативного екологічного впливу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надійність фільтрів очищення оливи є важливим фактором щодо забезпечення ефективної й довговічної роботи двигунів внутрішнього згоряння. Олива виконує не лише роль мастильного матеріалу, а й слугує для очищення від механічних забруднень, твердих частинок, продуктів зносу та окислення, які накопичуються під час роботи двигуна [4]. Високоякісні фільтри очищення оливи дозволяють зменшити рівень забруднень, що сприяє зниженню абразивного зношування деталей та підвищенню загальної надійності двигуна [5].

В умовах сучасних технологій підвищуються вимоги до якості фільтрування та матеріалів фільтрувальних елементів. Наприклад, як зазначено в статті [6], використання поліпропіленових синтетичних фільтрів у системах очищення оливи дизельних двигунів дозволяє покращити якість фільтрування та збільшити термін служби фільтрувальних елементів. Крім того, застосування комбінованих систем фільтрування, які поєднують механічне очищення із застосуванням центрифугування, суттєво покращує ефективність очищення та подовжує термін експлуатації оливи. За допомогою експериментального моделювання було встановлено мінімальне значення індексу продуктивності відцентрового очисника оливи, за якого знос двигуна досягає найменшого рівня і залишається стабільним.

Автори статті [7] зазначають, що якість функціонування фільтра залежить від умов використання та видів забруднень моторної оливи. Забруднення змінюють структуру оливи різними способами, залежно від їхньої природи, а це призводить до погіршення її якості, включаючи втрату продуктивності двигуна. З екологічних

міркувань та з економічної точки зору, важливо усвідомлювати, що типи забруднень, спосіб їх дії, процеси, що виникають в результаті забруднення, та їх вплив на компоненти двигуна залежать від наступних процесів: зношування; адгезії; корозії; ерозії; втомленості.

Дослідники статті [8] пропонують використання моніторингу стану оливи, які використовуються в різних конструкціях двигунів на основі спектрометричного аналізу. Метою таких досліджень є підтвердження результатів експериментів для оцінки впливу різних факторів на якість оливи. Це допоможе уникати серйозних поломок двигуна, оптимізувати витрати на технічне обслуговування й ремонтування, а також підвищувати економічну ефективність експлуатації обладнання.

Розвиток нових типів фільтрів спрямований на збільшення їх ефективності шляхом впровадження інноваційних матеріалів. Наприклад, синтетичні волокнисті фільтрувальні елементи мають значно вищу стійкість до температурних коливань і механічних навантажень, що робить їх оптимальними для сучасних високообертових двигунів.

Автори статті [9] пропонують лабораторний випробувальний пристрій для оцінки фільтрації моторної оливи. Цей пристрій дає можливість імітувати зміну потоку, зміну робочої температури оливи та падіння тиску в залежності від забруднення моторної оливи та ступеня забруднення фільтрувального вкладиша. З отриманих в статті даних можна визначити взаємозалежності між контрольованими параметрами та порівняти виміряні дані у варіанті з чистою оливою та із застосуванням фільтра для очищення, рекомендованого виробником.

Таким чином, дослідження надійності фільтрів очищення оливи є актуальним завданням, що має значний вплив на ефективність роботи сучасних ДВЗ. Подальше вдосконалення фільтрувальних технологій сприятиме підвищенню продуктивності двигунів, зниженню витрат на технічне обслуговування та подовженню терміну їхньої експлуатації.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз факторів, що визначають залишковий ресурс масляних фільтрів у логістичних системах технічного обслуговування ДВЗ, та наукове обґрунтування оптимальної періодичності їх заміни на основі статистичного аналізу експлуатаційних даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити динаміку вичерпання ресурсу масляних фільтрів у реальних умовах експлуатації шляхом реалізації таких етапів: проведення експлуатаційних випробувань автопарку; збір емпіричних даних щодо пробігу та умов роботи; оцінка фактичного технічного стану фільтрів і оливи; статистична обробка отриманої інформації;

- розробити та обґрунтувати адаптивну періодичність заміни масляних фільтрів у логістичній системі ТО залежно від виявлених ознак критичного забруднення фільтра, деградації фільтрувального елемента та погіршення експлуатаційних параметрів двигуна внутрішнього згоряння.

Виклад основного матеріалу. При управлінні ресурсом масляних фільтрів у логістичних системах технічного обслуговування основну увагу слід приділяти точному визначенню залишкового ресурсу фільтрувального елемента та обґрунтуванню оптимального моменту його заміни. Масляний фільтр є важливим елементом системи мащення ДВЗ, який забезпечує очищення оливи від механічних домішок, продуктів зносу, сажі та інших забруднень, що утворюються під час експлуатації. За відсутності ефективного управління ресурсом фільтра (надмірне продовження інтервалу або передчасна заміна) у системі мащення накопичуються абразивні частинки, що призводить до прискореного зносу деталей циліндро-поршневої групи, підшипників і

клапанного механізму. Це негативно позначається на стабільності роботи двигуна, погіршує його технічні характеристики та суттєво скорочує моторесурс.

Дослідження свідчать, що візуальна та органолептична оцінка стану масляного фільтра не дає об'єктивної картини його забрудненості чи втрати фільтраційних властивостей. Для цілей управління ресурсом у логістичній системі ТО найефективнішими є такі методи контролю: вимірювання перепаду тиску на фільтрі (ΔP); аналіз вмісту механічних домішок і заліза в оливі; лабораторна оцінка брудомісткості та ефективності фільтрації вибраного зразка.

У логістичних системах ТО автопарку доцільно відмовитися від жорстких фіксованих інтервалів заміни, рекомендованих виробником, на користь адаптивного підходу, який коригує періодичність залежно від реальних умов експлуатації (запиленість, температура, якість пального), інтенсивності використання техніки, результатів оперативного моніторингу стану оливи та перепаду тиску.

При інтенсивній експлуатації або роботі в важких умовах залишковий ресурс масляного фільтра може скорочуватися [10], що вимагає впровадження гнучких графіків ТО, оптимізації складських запасів ЗІП і мінімізації позапланових простоїв автомобільного парку.

Фільтри для очищення оливи PE01-14-302B двигуна SKYACTIV-G 2.0 автомобіля Mazda представлені на рисунку 1.



а – фільтр новий з коробкою для зберігання; б – фільтр перевірений та замінений через 10175 км

Рисунок 1 – Фільтри для очищення оливи PE01-14-302B двигуна SKYACTIV-G 2.0 автомобіля Mazda
Джерело: розроблено авторами

Статистичний ряд даних сформовано на основі результатів діагностування та оцінювання технічного стану 25 фільтрів для очищення оливи PE01-14-302B. Представлені фільтри застосовуються в двигунах SKYACTIV-G 2.0 автомобілів Mazda. В процесі досліджень проведено аналіз фактичної періодичності заміни фільтрів PE01-14-302B та оцінку їх технічного стану. Проведено обробку отриманих експлуатаційних даних, яка включає визначення кількості інтервалів, розрахунок середніх значень, частоти настання подій, емпіричних імовірностей та накопичених імовірностей відмов чи досягнення граничного стану фільтрів. Узагальнені результати статистичної обробки інформації періодичності заміни фільтрів для очищення оливи PE01-14-302B автомобілів Mazda наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Статистичний ряд періодичності заміни фільтрів для очищення оливи PE01-14-302B ДВЗ автомобілів Mazda

№ пп	Межі інтервалів	Середина інтервалу	Частота, m_i	Дослідна ймовірність, P_i	Накопичена дослідна ймовірність, ΣP_i
1	4513 - 6917,8	5715,4	5	0,2	0,2
2	6917,8 – 9322,6	8120,2	5	0,2	0,4
3	9322,6 – 11727,4	10525	8	0,32	0,72
4	11727,4 – 14132,2	12929,8	4	0,16	0,88
5	14132,2 - 16537	15334,6	3	0,12	1,0

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати свідчать, що найбільша кількість спостережень припадає на інтервал пробігу 9322,6–11727,4 км, який охоплює 32% усіх випадків заміни фільтра. Це свідчить про те, що середній ресурс масляного фільтра для двигунів автомобілів Mazda у досліджуваній вибірці становить близько 10,5 тис. км.

Початкові інтервали, які становлять близько 7 тис. км та кінцеві, яким відповідають напрацюванню понад 14 тис. км мають меншу частоту, що вказує на крайні випадки дострокової заміни або перевищення регламентованого ресурсу внаслідок індивідуальних умов експлуатації.

Накопичена ймовірність досягає 1,0 за максимального інтервалу 16,5 тис. км, що підтверджує повне охоплення всієї вибірки. Такий розподіл має форму, яка близька до симетричної, з невеликим зсувом у бік менших пробігів, що характерно для нормального закону розподілу, прийнятого для аналізу надійності згідно з ДСТУ 3004-95.

Отже, статистичний ряд показує, що більшість масляних фільтрів відпрацьовують ресурс у межах 9–12 тис. км, що відповідає типовим експлуатаційним показникам і може бути використано для обґрунтування оптимальних інтервалів технічного обслуговування легкових автомобілів.

Після обробки значень періодичності заміни фільтра для очищення оливи автомобілів Mazda встановлено, що отриманий масив емпіричних даних характеризується наступними показниками (рис. 2): середній час заміни фільтра, $\bar{t} = 10,04$ тис. км; середнє квадратичне відхилення, $\sigma = 3,04$ тис. км; коефіцієнт варіації, $v = 0,45$.

Приймаємо гіпотезу, що періодичність заміни фільтра описується законом нормального розподілу (DSTU 3004-95). Перевірка відповідності між теоретичним законом та емпіричним розподілом періодичності заміни фільтра для очищення оливи виконувалась за критерієм згоди λ О. М. Колмогорова. Результати оцінки надійності фільтрів для очищення оливи двигунів автомобілів Mazda свідчать про те, що процес їх зношування та втрати працездатності має стохастичний характер і може бути адекватно описаний законом нормального розподілу.

Отримані статистичні показники характеризують досліджувану вибірку наступним чином. Середній пробіг до заміни масляного фільтра становить 10,04 тис. км, що відображає типовий інтервал експлуатації до досягнення граничного стану. Середнє квадратичне відхилення $\sigma = 3,04$ тис. км свідчить про наявність суттєвого розсіювання даних, яке зумовлене різними умовами експлуатації двигунів, типами оливи, режимами роботи техніки та якістю технічного обслуговування. Коефіцієнт варіації $v = 0,45$ (45%) характеризує середній рівень стабільності показника надійності, тобто періодичність заміни фільтрів має помітну мінливість, проте не виходить за межі допустимих значень для технічних систем такого типу. Це свідчить, що процес

старіння і засмічення фільтрувального елемента підпорядковується закономірностям нормального розподілу, визначеним згідно з вимогами ДСТУ 3004-95.

Таким чином, встановлено, що показник періодичності заміни фільтрів для очищення оливи ДВЗ автомобілів Mazda мають нормальний характер розподілу, що дає можливість прогнозувати їх ресурс, визначати оптимальні інтервали технічного обслуговування та обґрунтовувати рекомендації щодо планування заміни фільтрів з урахуванням надійності та економічної доцільності.

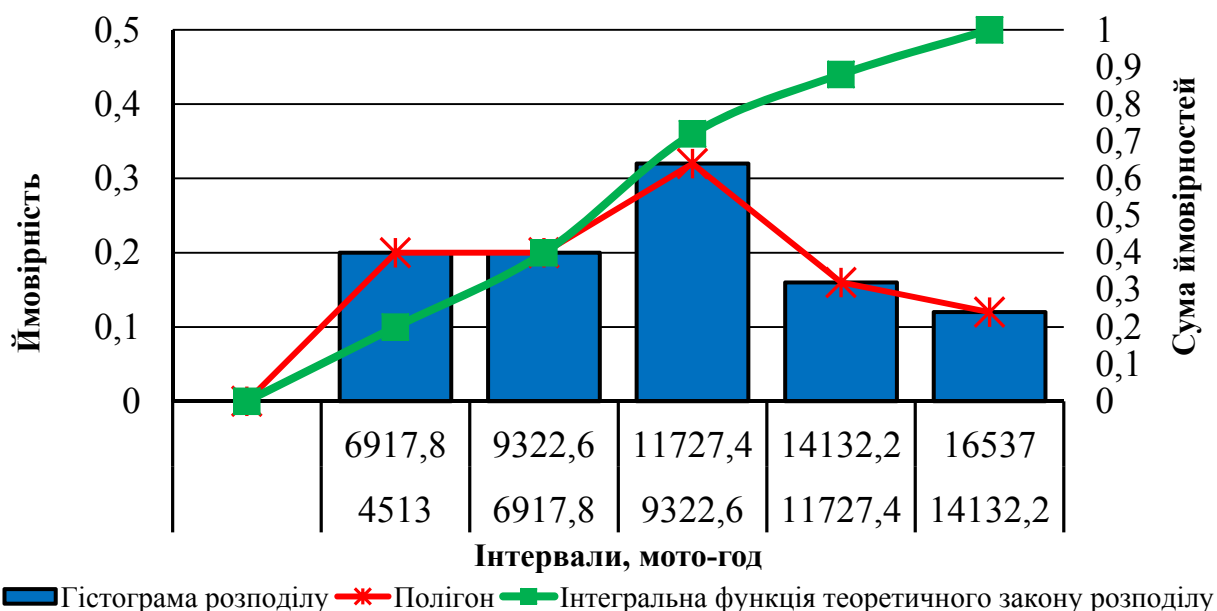


Рисунок 2 – Результати експериментальних досліджень періодичності заміни фільтра для очищення оливи PE01-14-302B двигуна SKYACTIV-G 2.0 автомобіля Mazda: гістограма розподілу, полігон розподілу, графік накопиченої дослідної ймовірності

Джерело: розроблено авторами

Аналіз представлених наукових досліджень [11] дав можливість виявити кілька типових несправностей фільтрів для очищення оливи, включаючи деформацію або пошкодження фільтрувального матеріалу, засмічення через надмірну кількість бруду або забруднень, а також розриви, тріщини або злами в корпусі фільтра. Такі проблеми з фільтрувальним матеріалом можуть призвести до проникнення забруднень та сторонніх речовин до ДВЗ, що спричинить зниження його продуктивності, ускладнить запуск двигуна, а в крайніх випадках – пошкодження деталей. Крім того, дослідженнями встановлено, що ефективність фільтра за тривалого використання знижується, що може зменшити швидкість фільтрації та спричинити падіння тиску. В згаданих у статті дослідженнях більшість фактів заміни фільтрів очищення оливи були пов'язані із забрудненням фільтрувальних елементів, які визначались візуально й масовим способом, та контролювались згідно з рекомендаціями нормативно-технічної документації.

Ще одним важливим аспектом, який підлягає аналізу, є вплив експлуатаційних факторів на стан оливи та ефективність її фільтрування. Високі навантаження, температурні коливання та агресивне середовище прискорюють деградацію оливи, що призводить до зниження ефективності роботи фільтрів. Проведені авторами дослідження та аналіз статті [12] підтверджують, що регулярний моніторинг технічного стану фільтрів і контроль періодичності заміни фільтрувальних елементів для

очищення оливи за оптимальним графіком значно зменшують ризик виходу з ладу двигуна. Разом з тим, в згаданій статті не відображено, як впливає на довговічність фільтрів для очищення оливи використання мінеральних та синтетичних олив, і як це відображається на працездатності двигунів автомобілів модельного ряду Mazda.

До того ж, автори статті [13] зазначають, що ефективність фільтрів для очищення олив двигунів легкових автомобілів залежить від особливостей мінеральних та синтетичних матеріалів. Термін служби фільтрів значною мірою залежить від механічних факторів, часу обслуговування та температури. В статті зазначено, що подвійні фільтри, тобто синтетичне волокно, що підтримує фільтрувальний папір, можуть зменшити частоту руйнування фільтрувального паперу та збільшити періодичність заміни фільтрувальних елементів. Синтетичні оливи завдяки термічній та окислювальній стабільності менше впливають на забрудненість фільтра для очищення оливи та дають можливість збільшити періодичність їх заміни до 40 тис. км.

Висновки. Науково доведено, що статистичні характеристики періодичності заміни масляних фільтрів (середній ресурс 10,04 тис. км, $\sigma = 3,04$ тис. км, коефіцієнт варіації 0,45) є важливими параметрами оцінки їх залишкового ресурсу в логістичних системах ТО і можуть використовуватися для побудови моделей прогнозування та оптимізації складських запасів ЗІП.

Поглиблений аналіз експлуатаційних і фізико-хімічних факторів показав, що залишковий ресурс масляного фільтра є нелінійною функцією інтенсивності забруднення оливи, типу фільтрувального матеріалу та реальних режимів експлуатації автопарку. При інтенсивному використанні або роботі в важких умовах ресурс фільтра скорочується, що вимагає переходу від фіксованих інтервалів заміни до адаптивних графіків ТО.

Запропоновано та науково обґрунтовано концепцію управління ресурсом масляних фільтрів у логістичних системах технічного обслуговування ДВЗ, яка ґрунтується на оперативному моніторингу стану оливи та перепаду тиску на фільтрі; імовірно-статистичних критеріях оцінки залишкового ресурсу; адаптивному коригуванні періодичності заміни залежно від умов експлуатації конкретного парку техніки.

Список літератури

1. Ружи́ло З., Нови́цький А., Караби́ньош С., Мельник В., Нови́цький Ю. Усе про фільтри для очищення олив. Агроексперт. 2018. № 4 (117). С. 72–75.
2. Hönig V., Mařík J., Hromádka J., Kupka J., Hönig V. Determination of Tractor Engine Oil Change Interval Based on Material Properties. Materials. 2020. Vol. 13, No. 17. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.3390/ma13173768 [https://doi.org/10.3390/ma13173768].
3. Maya-Yescas R., Nápoles-Rivera F., Hernández-Cortez C., de la Torre-Sánchez E. Maximizing Lubricant Life for Internal Combustion Engines. Processes. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 2070. DOI: https://doi.org/10.3390/pr10102070 [https://doi.org/10.3390/pr10102070].
4. Smigins R., Pronckus A., Pukalskas S., Bazaras Ž. Studies on Engine Oil Degradation Characteristics in a Field Test with Passenger Cars. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 24. P. 1–20. DOI: https://doi.org/10.3390/en16247955 [https://doi.org/10.3390/en16247955].
5. Hujo Ł., Kaszkowiak J., Nosian J., Michalides M. (2022). Test of oil filters on laboratory test device. (2022). Journal of MECHANICAL ENGINEERING, VOL 72. № 3, 27–34.
6. Babanin O., Butskiy O., Kovalenko O., Maksimov M. (2018). *Application of Synthetic Filters from Polypropylene in Diesel Locomotive Oil Systems to Improve the Efficiency of Cleaning Engine Oil*. International Journal of Engineering & Technology, 7(4), 162–166. <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/23420/1/Babanin.pdf>
7. S. Ratiu, A. Josan, V. Alexa, V. George. (2021). Journal of Physics Conference Series 1781(1):012051. Impact of contaminants on engine oil: a review. DOI: [10.1088/1742-6596/1781/1/012051](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012051)

8. Dellis P. S., Antoniadis I. A., Sakellariou J. K. Wear Metal Concentrations Used for Enhancing Spectrometric Oil Analysis Method Credibility: The Case of Metal-to-Metal Contact Failures. **Tribology in Industry**. 2024. Vol. 46, No. 3. P. 464–477. DOI: [\[https://doi.org/10.24874/ti.1579.03.24.10\]](https://doi.org/10.24874/ti.1579.03.24.10) (<https://doi.org/10.24874/ti.1579.03.24.10>).
9. Hujo L., Kučera M., Brezáni I., Kučera L., Faltinová E. Test of Oil Filters on Laboratory Test Device. **Strojnický časopis – Journal of Mechanical Engineering**. 2022. Vol. 72, No. 3. P. 149–156. DOI: [\[https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0037\]](https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0037) (<https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0037>).
10. Tian, X., Ou, Q., Lu, Y., Liu, J., Liang, Y., Pui, D. Y. H., & Yi, H. (2023). *Influence of oil content on particle loading characteristics of a two-stage filtration system*. *Atmosphere*, 14(3), 551. <https://doi.org/10.3390/atmos14030551>
11. Bazarov B.I., Khusanjonov A.S. Analysis of Common Oil Filters Faults. ISSN 2776-0987. 2023. Vol. 4, No. 3. P. 40–47.
12. Zaharia I., et al. (2024). Monitoring and Maintenance of Oil Filtration Systems in Internal Combustion Engines. *Journal of Engine Maintenance*, 12(1), pp. 15–22. DOI: [10.1088/1757-899X/1311/1/012039](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1311/1/012039)
13. Goyal, A., and Willyoung, R. (1985). Engine Oil Filter Performance with Synthetic and Mineral Oils. SAE Technical Paper 850549. <https://doi.org/10.4271/850549>.

References

1. Ruzhylo Z., Novytskyi A., Karabynosh S., Melnyk V., Novytskyi Yu. (2018). Use pro filtry dla ochyshchennia olyv. *Agroexpert*, 4 (117), 72–75 [in Ukrainian].
2. Honig, V., Marik, J., Hromadko, J., Kupka, J., & Honig, V. (2020). Determination of tractor engine oil change interval based on material properties. *Materials*, 13(17), Article 3768. <https://doi.org/10.3390/ma13173768> [in Ukrainian].
3. Maya-Yescas, R., Napoles-Rivera, F., Hernandez-Cortez, C., & de la Torre-Sanchez, E. (2022). Maximizing lubricant life for internal combustion engines. *Processes*, 10(10), Article 2070. <https://doi.org/10.3390/pr10102070> [in Ukrainian].
4. Smigins, R., Pronckus, A., Pukalskas, S., & Bazaras, Z. (2023). Studies on engine oil degradation characteristics in a field test with passenger cars. *Energies*, 16(24), Article 7955. <https://doi.org/10.3390/en16247955> [in Ukrainian].
5. Hujo, L., Kaszkowiak, J., Nosian, J., & Michalides, M. (2022). Test of oil filters on laboratory test device. *Journal of Mechanical Engineering*, 72(3), 27–34 [in Ukrainian].
6. Babanin, O., Butskiy, O., Kovalenko, O., & Maksimov, M. (2018). Application of synthetic filters from polypropylene in diesel locomotive oil systems to improve the efficiency of cleaning engine oil. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 162–166. <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/23420/1/Babanin.pdf>
7. Ratiu, S., Josan, A., Alexa, V., & George, V. (2021). Impact of contaminants on engine oil: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1781(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012051> [in Ukrainian].
8. Dellis, P. S., Antoniadis, I. A., & Sakellariou, J. K. (2024). Wear metal concentrations used for enhancing spectrometric oil analysis method credibility: The case of metal-to-metal contact failures. *Tribology in Industry*, 46(3), 464–477. <https://doi.org/10.24874/ti.1579.03.24.10> [in Ukrainian].
9. Hujo, L., Kucera, M., Brezani, I., Kucera, L., & Faltinova, E. (2022). Test of oil filters on laboratory test device. *Strojnický časopis – Journal of Mechanical Engineering*, 72(3), 149–156. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0037> [in Ukrainian].
10. Tian, X., Ou, Q., Lu, Y., Liu, J., Liang, Y., Pui, D. Y. H., & Yi, H. (2023). Influence of oil content on particle loading characteristics of a two-stage filtration system. *Atmosphere*, 14(3), Article 551. <https://doi.org/10.3390/atmos14030551> [in Ukrainian].
11. Bazarov, B. I., & Khusanjonov, A. S. (2023). Analysis of common oil filters faults. *ISSN 2776-0987*, 4(3), 40–47 [in Ukrainian].
12. Zaharia, I., et al. (2024). Monitoring and maintenance of oil filtration systems in internal combustion engines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1311(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1311/1/012039>
13. Goyal, A., & Willyoung, R. (1985). Engine oil filter performance with synthetic and mineral oils. *SAE Technical Paper* 850549. <https://doi.org/10.4271/850549> [in Ukrainian].

Andriy Novitskyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyna Melnyk**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Vitalii Lisetskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuri Novitskyi**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Management of the Resource of Oil Cleaning Filters in Logistics Systems for Internal Combustion Engine Maintenance

The article addresses the problem of effective management of the resource of oil filters in logistics systems for the maintenance of internal combustion engine (ICE) automobiles and their impact on engine reliability and durability. Real operating conditions, changes in operating modes, and equipment usage intensity lead to accelerated contamination of oil filters, which increases logistics costs for maintenance, extends equipment downtime, and reduces engine life.

The purpose of the article is to justify the optimal oil filter replacement intervals within the maintenance logistics system based on statistical analysis of Mazda vehicle operational data, as well as to develop principles for managing their remaining service life.

Frequent filter replacement at fixed mileage without monitoring their actual condition is economically unjustified and leads to excessive costs in the maintenance logistics system. The use of modern oil condition monitoring methods (content of mechanical impurities, acid and alkali numbers, viscosity) enables significant extension of filter replacement intervals, optimization of spare parts inventory, and reduction of overall maintenance costs for the vehicle fleet. At the same time, accurate filter resource management requires consideration of operating modes, seasonality, fuel quality, and conditions of a specific vehicle fleet.

The article presents an analysis of statistical data on oil filter replacement frequency in Mazda vehicles under real operating conditions. The following statistical indicators of the oil filter resource in ICE lubrication systems have been established: average replacement interval – 10.04 thousand km; root mean square deviation – 3.04 thousand km; coefficient of variation – 0.45.

The application of filter elements based on synthetic fibers and multilayer composite materials significantly increases dirt-holding capacity and filtration efficiency, creating preconditions for extending replacement intervals in maintenance logistics systems.

The authors emphasize that the key element of effective oil filter resource management is the implementation of adaptive maintenance schedules based on oil condition monitoring and filter residual resource prediction, taking into account economic, environmental, and logistical factors.

Further development of real-time oil condition monitoring systems, integration of contamination sensors into the onboard computer, and the use of digital maintenance planning platforms will contribute to the optimization of maintenance logistics, reduction of spare parts costs, and enhancement of the overall reliability of the vehicle fleet.

oil filter, reliability indicators, automobile, replacement interval

Одержано (Received) 09.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

Д.І. Петренко, доц., канд. техн. наук, В.М. Сало, проф., д-р техн. наук,
Д.С. Недельський

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна,
e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com

Аналіз ефективності роботи каскадного решітного сепаратора зернових сумішей

За результатами проведеного аналізу результатів наукових досліджень в сфері післязбиральної обробки зернових сумішей встановлено, що актуальним є подальше удосконалення решітних каскадно-гравітаційних сепараторів шляхом компіляції ефективних дугоподібних решіт пруткового профілю у їх конструкцію. При цьому, потребує встановлення раціональної кількості решіт, зважаючи на крайові умови «ефективність-енерговитрати-компактність». За результатами математичного моделювання визначено раціональну кількість каскадів решіт, що забезпечують максимальну якість сепарації при мінімальних витратах ресурсів, зокрема за критеріями максимальної ефективності сепарації при мінімальних питомих енерговитратах і оптимальній компактності сепаратора.

каскадно-гравітаційний сепаратор, ефективність сепарації, дугоподібне решето, прутковий профіль, математичний аналіз

Постановка проблеми. Питанню післязбирального обробітку зернових сумішей приділено досить широка увага дослідників, сформована усталена класифікація зерноочисних машин за принципом розділення зерноматеріалів на фракції залежно від різниці у фізико-механічних властивостях її компонентів, визначені пріоритетні напрямки розвитку сепаруючих систем [1, 3-5, 8-10]. Так можемо спостерігати все більше ускладнення конструктивних схем сепараторів, що, в основному, пов'язане з намаганням поєднати в одній машині декількох функціональних систем і принципів розділення [1, 6, 8-11]. При цьому, зачасту такі схеми не є синергетичними, а являють собою модульну, в кращому випадку симбіотичну конструкцію, яку виробники пропонують комбінувати залежно від потреб і вартості обладнання.

Як відомо [1, 2], чим більше «корисних» функціональних елементів містить система, тим вище її загальна ефективність, проте при цьому спостерігається зменшення її питомої ефективності і надійності. Це призводить до того, що великі за кількістю функціональних елементів системи вимагають і ускладнення запобіжних та управляючих систем, що призводить до збільшення собівартості обладнання.

Натомість, існує і клас простих сепаруючих систем, які мають просту за складом і функцією конструкцію, проте не знайшли широкого застосування внаслідок власних недоліків, пов'язаних, в основному, з обмеженою функціональністю і продуктивністю.

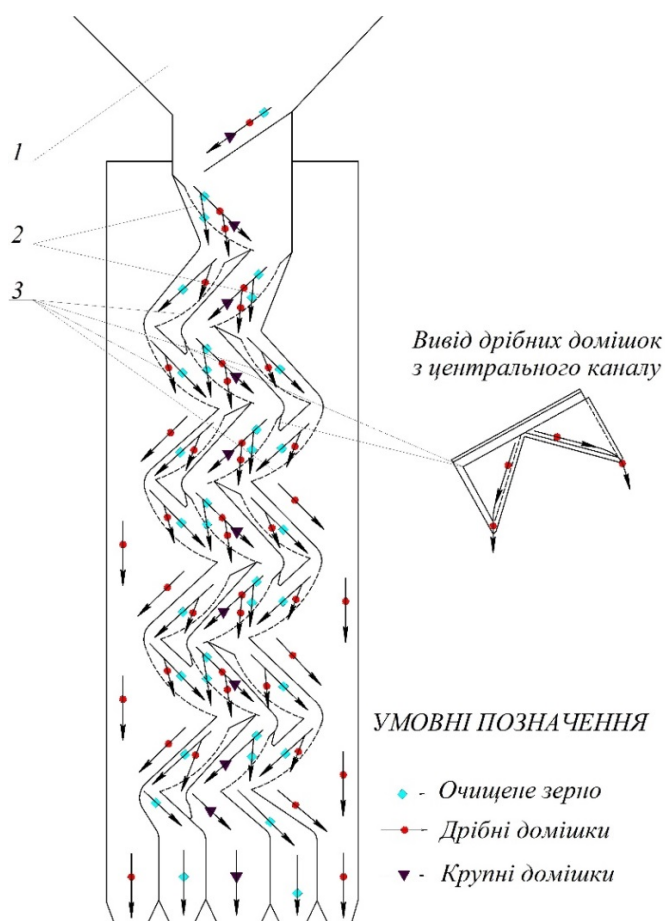
Одним з таких сепараторів є решітний каскадно-гравітаційний [6, 7, 9, 10]. У такого сепаратора робочими органами є решета, розміщені під визначеним кутом каскадно один відносно одного у вертикальній площині. Сепаратор виділяється простотою конструкції та відсутністю активного приводу, має мінімальні габарити в горизонтальній площині та забезпечує можливість поділу зерноsumіші на декілька фракцій. Проте не знайшов широкого вжитку внаслідок обмеженого функціонального застосування, що пов'язано з конструктивним виконанням решіт у вигляді сітчастої поверхні або жорсткої пальцевої [7, 9].

Таким чином, зважаючи на зазначені переваги вказаного типу сепараторів, постає задача щодо їх подальшого удосконалення.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Пошуком найбільш ефективних решіт для сепарації зернових сумішей за розмірними характеристиками займалися ряд дослідників, зокрема Васильковський М.І., Котов Б.І., Васильковський О.М., Степаненко С.П., Лузан П.Г., Лещенко С.М., Мороз С.М. та інші [5, 7, 8, 11, 12].

Дослідження [8, 12, 13] акцентують увагу на ефективності застосування решіт, які не мають поперечних перетинок, що пов'язано зі збільшеним «живим» перерізом решітного полотна. Крім того, авторами [12, 15] доводиться ефективність застосування пруткових решіт, які мають достатню жорсткість конструкції і при цьому володіють максимально ефективною площею просіювання. Окрім того, підтверджена і ефективність застосування решіт пруткового профілю, що мають дугоподібну форму, яка сприяє більш активній взаємодії зерноsumіші з решетою внаслідок дії інерційних сил [14]. До того ж, конструкція решіт пруткового профілю дозволяє виконувати регулювання зазору між прутками, тобто робочого отвору решіт, з застосуванням лише комплексу змінних шайб, що сприяє зменшенню собівартості обладнання.

Таким чином, актуальною є компіляція ефективних дугоподібних решіт пруткового профілю у конструкцію гравітаційно-каскадного сепаратора (рис. 1). При цьому, необхідно встановити раціональну кількість решіт, зважаючи на крайові умови «ефективність-енерговитрати-компактність».



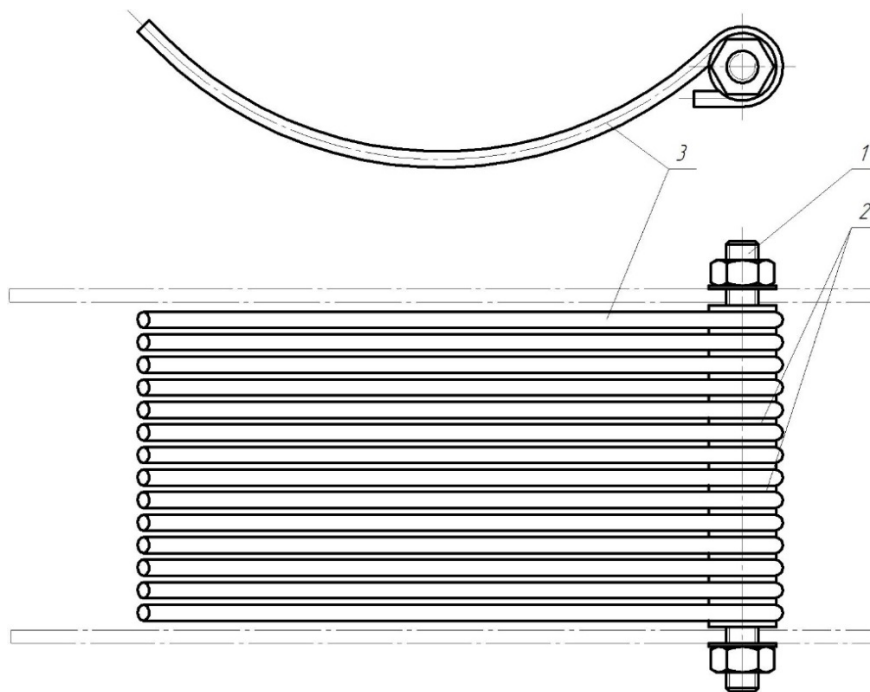
1 – бункер; 2 – колосові решета; 3 – підсівні решета
Рисунок 1 – Функціональна схема сепаратора гравітаційно-каскадного типу з використанням пруткових решіт дугоподібної форми

Джерело: розроблено авторами

Постановка завдання. Дослідження технологічного процесу та обґрунтування параметрів решітного сепаратора гравітаційно-каскадного типу з використанням пруткових решіт дугоподібної форми.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо сепаратор зернових сумішей, що має наступні конструктивні особливості (рис. 1):

- робочі органи – решета пруткового типу (рис. 2);
- розміщення решіт – каскадне під кутом $\alpha > \phi$ (де ϕ – кут тертя);
- форма решіт – дугоподібна з радіусом R ;
- використано два типи решіт: колосові (у центральному каналі) та підсівні (у бічних каналах).



1 – головна вісь; 2 – шайби; 3 – прутки дугоподібної форми

Рисунок 2 – Загальна конструкція пруткового решета дугоподібної форми

Джерело: розроблено авторами з використанням [12, 14]

Відповідно, основним завданням є визначення раціональної кількості каскадів решіт n_1 (колосових) та n_2 (підсівних), що забезпечують максимальну якість сепарації при мінімальних витратах ресурсів.

Критеріями оптимізації обираємо наступні:

- ефективність сепарації: $E(n) \rightarrow \max$;
- питомі енерговитрати: $W(n) \rightarrow \min$;
- компактність: $n \rightarrow \min$ при $E(n) \geq E_{\min}$ (де n – кількість каскадів решіт).

Проаналізуємо кінематику руху частинок по дугоподібному решету (рис. 3). При цьому враховуємо, що згідно законів класичної механіки на частку діятимуть сили: тяжіння $G = mg$; нормальна реакція поверхні N ; тертя $F_{\text{тр}} = \mu N$ (де μ – коефіцієнт тертя); відцентрова $F_{\text{вц}} = (m\vartheta^2)/R$.

Швидкість частинки на дугоподібному решеті не є постійною, а її прискорення матиме значення:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = g(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi) - \frac{\mu \vartheta^2}{R}, \quad (1)$$

де φ – поточний кут положення частки на дузі.

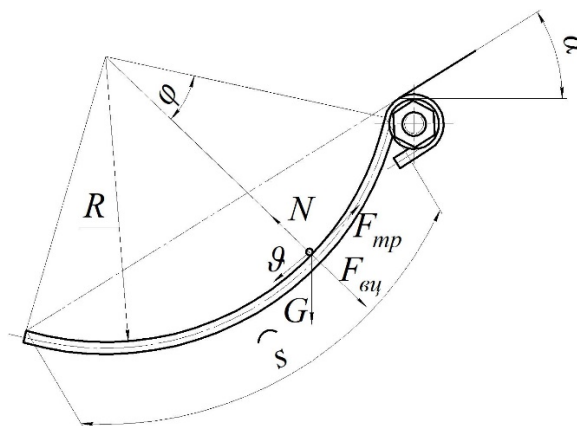


Рисунок 3 – Кінематика переміщення часток по прутковому решету дугоподібної форми
Джерело: розроблено авторами з використанням [10, 14, 15]

Для забезпечення ефективного просування через пруткове решето швидкість часток повинна бути достатньою для: подолання сили тертя; створення умов для проходження дрібних частинок через щілини; утримання великих частинок на поверхні, тобто:

$$g_{\text{omm}} = \sqrt{[2gR(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi)]}. \quad (2)$$

Для того, щоб зернова суміш не забивала решето, необхідно, щоб тангенціальна сила була більшою за сили опору:

$$g \sin \varphi > \mu \cdot \left(g \cdot \cos \varphi + \frac{g^2}{R} \right). \quad (3)$$

При цьому час перебування частинки на решеті довжиною дуги $s = R\varphi$:

$$t = s / g = \frac{R\varphi}{\sqrt{[2gR(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi)]}}, \quad (4)$$

або

$$t = \varphi \sqrt{\frac{R}{2g(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi)}}. \quad (5)$$

Оцінимо сепараційну ефективність пруткових решіт. Для цього розглянемо частинку, яка рухається по решету, при цьому покладемо, що ξ є випадковою величиною до моменту проходження через щілину, а процес проходження є марківським процесом з неперервним часом.

Ймовірність того, що частинка не пройде за малий інтервал часу Δt :

$$P(\xi > t + \Delta t | \xi > t) = P(\xi > \Delta t) = 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t), \quad (6)$$

тоді:

$$P(\xi > t + \Delta t) = P(\xi > t) \cdot (1 - \lambda \Delta t). \quad (7)$$

Позначаючи $F(t) = P(\xi \leq t)$ – функцію розподілу:

$$F(t + \Delta t) - F(t) = \lambda(1 - F(t))\Delta t, \quad (8)$$

одержимо диференціального рівня:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda(1 - F), \quad (9)$$

розв'язок якого отримаємо з початкової умови $F(0) = 0$:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (10)$$

Таким чином, ймовірність того, що частинка розміром $d_{екв}$ пройде через щілину шириною b за час t , описується експоненціальним законом:

$$P(d_{екв}, b, t) = 1 - e^{-\lambda(d_{екв}, b) \cdot t}, \quad (11)$$

де $\lambda(d_{екв}, b)$ – інтенсивність сепарації, що залежить від групи $d_{екв} / b$.

Ймовірність контакту частинки з щілиною між прутками пропорційна площі поперечного перерізу відносного руху $S \sim d_{екв} \cdot b$, а її відносна швидкість становитиме $\mathcal{G}_{відн} = \mathcal{G} \sin(\beta)$. Отже ймовірність проходження частки за розміром:

$$\lambda \sim (d_{екв} \cdot b) \cdot (\mathcal{G} \sin(\beta)) \cdot (b / d_{екв})^2 = \frac{\mathcal{G} b \sin(\beta)}{d_{екв}}. \quad (12)$$

Таким чином, інтенсивність сепарації λ залежить від геометричних та кінематичних параметрів часток і решітної системи:

$$\lambda = \kappa_0 \cdot \left(\frac{b}{d_{екв}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\mathcal{G}}{b} \right) \sin(\beta), \quad (13)$$

де κ_0 – безрозмірний коефіцієнт форми частини; β – кут між траєкторією частинки та площиною решета; b – ширина щілини між прутками решета; $d_{екв}$ – характерний розмір частинки.

Ефективність сепарації одного решета будемо оцінювати величиною E_1 , яка характеризує відношення маси виділеної фракції до маси цієї фракції у вихідній суміші.

Для відносної однорідності за розмірами фракцій зерноsumіші ефективність одного решета матиме значення [13, 14]:

$$E_1 = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (14)$$

Нехай після першого решета частка невиділеної фракції $q_1 = 1 - E_1$, тоді після другого решета частка невиділеної фракції від залишку також становитиме $(1 - E_1)$, тому загальна частка невиділеної фракції в цьому випадку:

$$q_2 = q_1(1 - E_1) = (1 - E_1)^2. \quad (15)$$

За індукцією, після n каскадів:

$$q_n = (1 - E_1)^n, \quad (16)$$

тобто для системи з n ідентичних послідовних каскадів з ефективністю E_1 загальна ефективність системи становитиме:

$$E(n) = 1 - (1 - E_1)^n. \quad (17)$$

Таким чином, функція $E(n)$ монотонно зростає за n та має межу:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(n) = 1. \quad (18)$$

Асимптотично, при великих значеннях n :

$$E(n) \approx 1 - e^{-n \cdot \ln\left(\frac{1}{1-E_1}\right)}. \quad (19)$$

Приріст ефективності при додаванні n -го каскаду решіт становитиме:

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) = E_1 \cdot (1 - E_1)^{n-1}, \quad (20)$$

і, відповідно, монотонно спадатиме зі зростанням n .

Аналіз питомої ефективності $\bar{E}(n)$ одного каскаду показує, що вона досягає максимуму при $n = 1$ та монотонно спадає, що пояснюється з наступних залежностей:

$$\bar{E}(n) = \left[1 - (1 - E_1)^n / n \right]. \quad (21)$$

Знаходимо похідну по n (розглядаючи n як неперервну змінну):

$$\frac{d\bar{E}}{dn} = \frac{\left\{ -n \cdot (1 - E_1)^n \cdot \ln(1 - E_1) - \left[1 - (1 - E_1)^n \right] \right\}}{n^2}. \quad (22)$$

Значення чисельника в точці $n = 1$ становитиме:

$$-(1 - E_1) \cdot \ln(1 - E_1) - E_1, \quad (23)$$

якщо $\ln(1 - E_1) < 0$ при $E_1 > 0$, перший доданок матиме додатне значення.

При малих E_1 : $-(1 - E_1) \cdot \ln(1 - E_1) \approx E_1$, тому чисельник близький до нуля, але для $n > 1$ похідна стає від'ємною.

В свою чергу, приріст ефективності сепарації задовольняє геометричну прогресію:

$$\frac{\Delta E(n+1)}{\Delta E(n)} = 1 - E_1 = \text{const} < 1. \quad (24)$$

Проаналізуємо критерій оптимальності – критерій мінімальної ефективності. Для цього знайдемо мінімальне значення кількості каскадів решіт n , при якому $E(n) \geq E_{\min}$.

Виходячи з нерівності:

$$1 - (1 - E_1)^n \geq E_{\min}, \quad (25)$$

логічним є твердження

$$n \cdot \ln(1 - E_1) \leq \ln(1 - E_{\min}). \quad (26)$$

Оскільки $\ln(1 - E_1) < 0$:

$$n \geq \frac{\ln(1 - E_{\min})}{\ln(1 - E_1)}. \quad (27)$$

Таким чином, мінімальна кількість каскадів становитиме:

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1 - E_{\min})}{\ln(1 - E_1)} \right\rceil, \quad (28)$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – функція округлення вгору.

Введемо умову, за якої каскад решіт є ефективним за умови, якщо його додавання надає приріст ефективності, величина якого більша за граничне значення:

$$\Delta E(n) > \Delta E_{\text{гр}}. \quad (29)$$

Максимальна доцільна кількість каскадів при заданому $\Delta E_{\text{гр}}$:

$$n_{\max} = \left\lceil \frac{\ln(\Delta E_{\text{гр}} / E_1)}{\ln(1 - E_1)} \right\rceil + 1. \quad (30)$$

Наступним етапом є аналіз питомих енерговитрат відносно продуктивності, а саме:

$$W(n) = \frac{n \cdot P_0}{Q_0 \cdot (1 + \kappa_p(n-1))}, \quad (31)$$

де P_0 – номінальне навантаження одного каскаду; Q_0 – номінальна продуктивність; κ_p – коефіцієнт, що характеризує падіння продуктивності.

Таким чином, енергетичну ефективність можемо представити у вигляді відношення якості (ефективності) сепарації до енерговитрат:

$$\eta(n) = E(n) / W(n) = \frac{[1 - (1 - E_1)^n] \cdot Q_0}{n \cdot P_0 \cdot [1 + \kappa_p(n-1)]}, \quad (32)$$

при цьому вона має максимум при певному $n_{\text{опт}}$.

Цільовою функцією комплексного критерію якості є:

$$\Phi(n) = w_1 \cdot E(n) - w_2 \cdot n - w_3 \cdot W(n), \quad (33)$$

де w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти важливості критеріїв.

Основна оптимізаційна задача полягає в наступному:

$$n^* = \arg \max \Phi(n), \quad n \in N. \quad (34)$$

Алгоритм визначення оптимальної кількості каскадів наступний.

Визначення значення E_1 експериментально або за формулою:

$$E_1 = 1 - e^{-\kappa_0 \cdot t}. \quad (35)$$

Розрахунок $n_{\min}$ за умовою $E(n) \geq E_{\min}$:

$$n_{\min} = \left\lceil \frac{\ln(1 - E_{\min})}{\ln(1 - E_1)} \right\rceil. \quad (36)$$

Перевірка закону спадання ефективності сепарації для $n = n_{\min}$ до $n_{\min} + 5$, якщо

$$\Delta E(n+1) < \Delta E_{\text{гр}} \Rightarrow n_{\text{опт}} = n. \quad (37)$$

Відносна зміна оптимальної кількості каскадів при зміні E_1 :

$$\frac{\partial n_{\min}}{\partial E_1} \cdot \frac{E_1}{n_{\min}} = - \frac{1}{[E_1 \cdot (1 - E_1) \cdot \ln(1 - E_1)]}. \quad (38)$$

Аналіз залежності сепараційної ефективності системи (рис. 4), дозволяє зробити наступні висновки.

Сумарна ефективність системи зростає експоненційно і досягає максимуму при шести каскадах решіт, що відповідає сумарній ефективності системи на рівні близько 99,59 %.

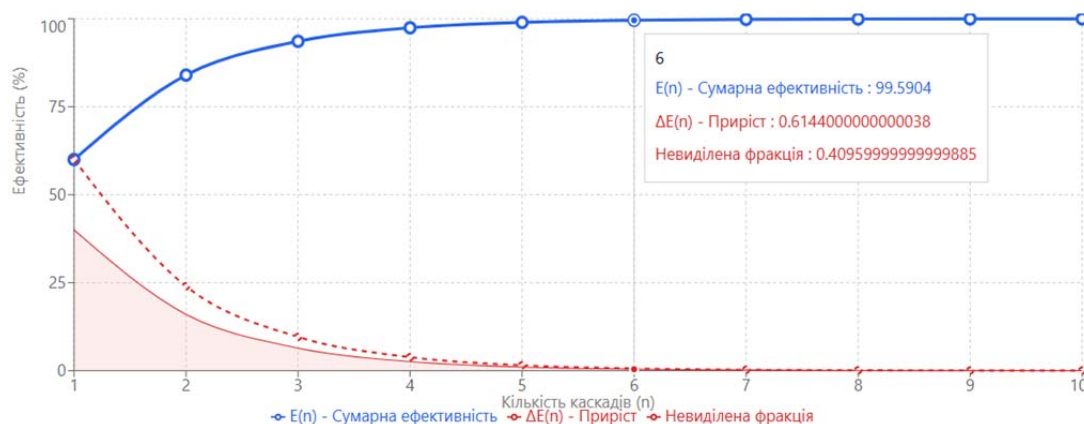


Рисунок 4 – Залежності сепараційної ефективності системи від кількості решітних каскадів з врахуванням умов: сепараційна ефективність колосового решета $E_{кол} = 60\%$, сепараційна ефективність підсвітного решета $E_{під} = 55\%$, мінімальні вимоги до ефективності сепарації $E_{min} = 99\%$.

Джерело: розроблено авторами

Подальше збільшення каскадів решіт є недоцільним з точки зору цільової функції комплексного критерію якості $\Phi(n)$, оскільки приріст ефективності становить менше 2% (рис. 5) з подальшим монотонним спаданням у $(1-E_1)$ разів. При цьому, загальна закономірність спадання ефективності після другого каскаду стабілізується і становить $q = 0,400$.

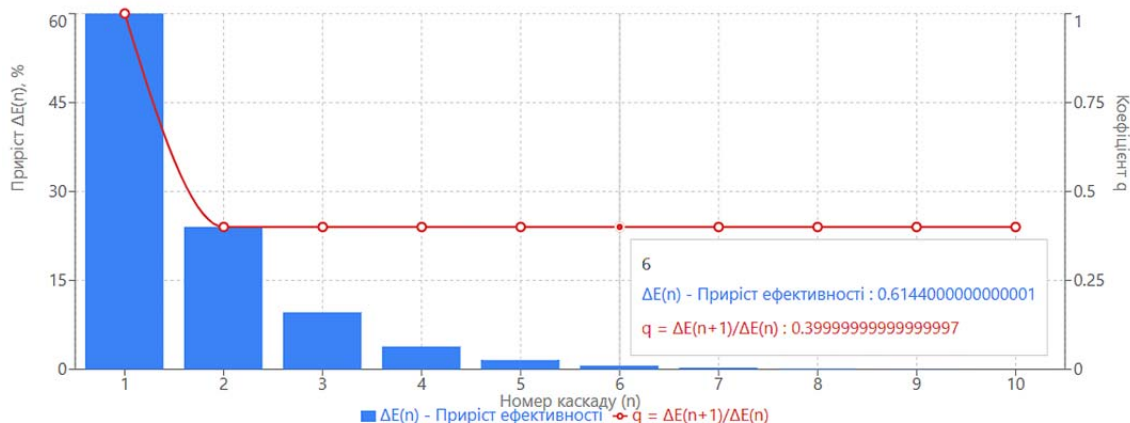


Рисунок 5 – Закономірність спадання ефективності сепарації

Джерело: розроблено авторами

Аналіз залежності загальної сепараційної ефективності системи від ефективності кожного її елемента (рис. 6) засвідчує, що зберігається загальна тенденція зростання ефективності, при цьому, при зростанні сепараційної спроможності решіт від 50 % до 75 % спостерігається зростання загальної ефективності. Так, при $E_1 = 50\% \dots 55\%$ потрібно 5...6 каскадів, при $E_1 = 70\% \dots 75\%$ достатньо 3...4. При застосуванні шести каскадів при змінні E_1 від 50 % до 75 % спостерігається зміна ефективності від 98,4 % до 100 %, що підтверджує необхідність використання вискоелективних решіт з підвищеною сепараційною здатністю.

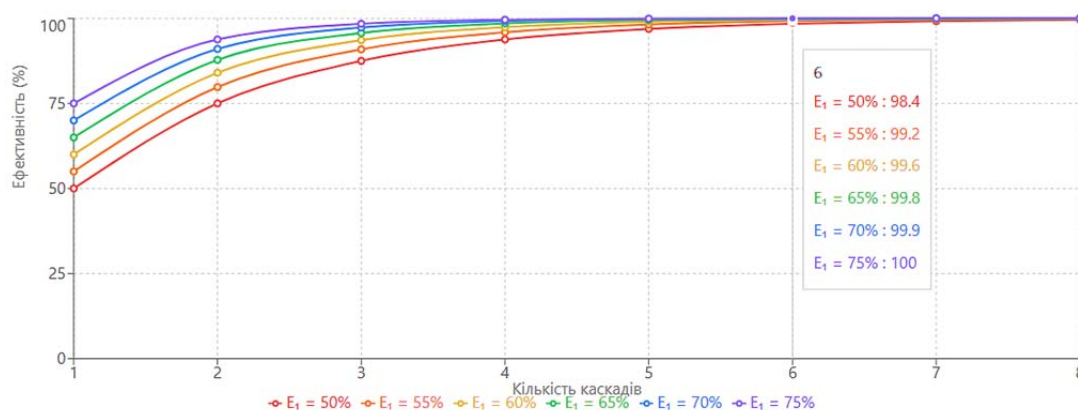


Рисунок 6 – Порівняльний аналіз загальної сепараційної ефективності від ефективності її елементів (решіт)

Джерело: розроблено авторами

Залежність енергетичної ефективності від ефективності системи $\eta(n) = E(n)/W(n)$ (рис. 7) демонструє спадання, досягаючи максимуму при $n = 2 \dots 4$, що обумовлено експоненціальним зростанням питомих витрат. Для задоволення умов сепараційної ефективності вище 99 %, що досягається при шести каскадах решіт, енергетична ефективність системи становить 13,28. Таким чином досягається оптимум між якістю роботи системи і її питомими затратами.



Рисунок 7 – Залежність енергетичної ефективності від ефективності системи

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Отже, критеріями вибору мінімальної кількості каскадів решіт є обмеження габаритів обладнання та його вартості, що обумовлюється залежністю $\Delta E(n_{\min} + 1) < 1\%$.

За умов високих вимог до якості кінцевого продукту (зерно найвищих класів) потрібно вибирати $(n_{\min} + 1)$. При цьому, питомі витрати на додаткові решітні каскади будуть відповідати умові $\Delta E(n_{\min} + 1) > 2\%$.

За результатами проведеного математичного аналізу встановлено, що раціональним є застосування 3...4 каскадів дугоподібних колосових решіт пруткового типу, що мають ефективність сепарації $E_1 = 0,60 \dots 0,70$, 4...5 каскадів дугоподібних підсвітих решіт пруткового типу при їх ефективності сепарації $E_2 = 0,50 \dots 0,60$, при цьому загальна система міститиме 7...9 каскадів, що забезпечить $E_{\text{заг}} > 90\%$.

Список літератури

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
2. Золотарьов П. Г. Інженерія надійності в аграрній техніці. Київ: Агропром, 2020. 310 с.
3. Feng, Xin & Gong, Zhenping & Wang, Lijun & Yu, Yongtao & Liu, Tianhua & Song, Lianglai. (2021). Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.035>.
4. Lijun Wang, Shuai Zhang, Yunpeng Gao, Tao Cui, Zhao Ma, Bo Wang. (2023). Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD-DEM simulation. *Powder Technology*. Volume 419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118332>.
5. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. 2019. 10 (4). P. 137-143.
6. Патент №139435 Україна, МПК B07B1/00, B07B13/00. Сепаратор гравітаційно-каскадного типу / Дударев І.М.; Заявлено 20.05.2019; Опубл. 10.01.2020; Бюл. № 1.
7. Dudarev I., Zabrodotska L., Satsiuk V., Taraymovich I., Olkhovskiy V. Research on seed separation process on a gravity-cascade separator. *INMATEH – Agricultural engineering*. Vol. 62, No. 3. 2020. Pp. 173-180.
8. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора : монографія / В. М. Сало, С. М. Мороз, О. М. Васильковський [та ін.]; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т. Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.
9. Стаценко Д.І. Куянов Ю.Ю., Кошулько В.С., Олексієнко В.О. Сепарування зернових сумішей з використанням сил гравітації. Збірник наукових праць магістрантів та студентів. Мелітополь: ТДАТУ, 2019. С. 69-70.
10. Голячук С.Є. Сепарування зернових мас з використанням сил гравітації. Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2012. Випуск №39. С. 27-33.
11. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I.L. Rogovskii, S.P. Stepanenko, A.V. Novitskii, V.I. Rebenko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 13. pp.1-7.
12. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Нестеренко О.В., Молокост Л.А. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 50, 2020. – Кропивницький: ЦНТУ. – С. 52-58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
13. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Мороз С.М., Нестеренко О.В. Попередні дослідження пасивного струнного решета. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2022 вип. 52. С. 73-80. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.73-80>.
14. Васильковский О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.
15. Лузан П.Г., Лузан О.Р., Петренко Д.І. Обґрунтування параметрів решета для сепарації зерна. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. 2016. Вип. 29. С. 46-53.

References

1. Kotov, B. I., et al. (2017). *Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and grain storage (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling)*. National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].
2. Zolotarov, P. H. (2020). *Reliability engineering in agricultural machinery*. Kyiv: Ahroprom. [in Ukrainian].
3. Feng, Xin & Gong, Zhenping & Wang, Lijun & Yu, Yongtao & Liu, Tianhua & Song, Lianglai. (2021). Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.035>.
4. Lijun Wang, Shuai Zhang, Yunpeng Gao, Tao Cui, Zhao Ma, Bo Wang. (2023). Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD-DEM simulation. *Powder Technology*. Volume 419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118332>.
5. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. Kyiv, 10(4), 137-143.
6. Dudarev, I. M. (2020). *Gravity-cascade type separator* (Ukrainian Patent No. 139435). Ukrpatent. [in Ukrainian].

7. Dudarev, I., Zabrodotska, L., Satsiuk, V., Taraymovich, I., & Olkhovskiy, V. (2020). Research on seed separation process on a gravity-cascade separator. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 62(3), 173–180.
8. Salo, V. M., Moroz, S. M., Vasylovskiy, O. M., et al. (2014). *Development of a new design of a pneumatic-sieve grain cleaning machine. Vol. 1. Substantiation of the parameters of the conveyor-separator*. Kirovohrad: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
9. Statsenko, D. I., Kuianov, Yu. Yu., Koshulko, V. S., & Oleksienko, V. O. (2019). Separation of grain mixtures using gravitational forces. *Zbirnyk naukovykh prats mahistrantiv ta studentiv*. Melitopol: TSATU, 69-70. [in Ukrainian].
10. Holachuk, S. Ye. (2012). Separation of grain masses using gravitational forces. *Mizhvuzivskiy zbirnyk "Naukovi notatky"*, (39), 27-33. Luts'k. [in Ukrainian].
11. Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Novitskii, A. V., & Rebenko, V. I. (2020). The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 13, 1-7.
12. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., Nesterenko, O. V., & Molokost, L. A. (2020). To the creation of the concept of an "ideal" sieve of a grain separator. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (50), 52-58. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
13. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Petrenko, D. I., Moroz, S. M., & Nesterenko, O. V. (2022). Preliminary studies of passive string sieve. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (52), 73-80. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.73-80>.
14. Luzan, P. H., Luzan, O. R., & Petrenko, D. I. (2016). Substantiation of the parameters of the sieve for grain separation. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, (29), 46–53. Kirovohrad: KNTU. [in Ukrainian].

Dmytro Petrenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Salo**, Prof., Dr. Tech. Sci., **Dmytro Nedelsky**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Efficiency Analysis of a cascade Sieve Separator for Grain Mixtures

The study aims to investigate the technological process and substantiate the parameters of a gravity-cascade sieve separator equipped with arc-shaped rod-profile sieves to improve the post-harvest grain processing efficiency.

The research is based on mathematical modeling of grain mixture separation processes. The kinematic characteristics of particle motion along arc-shaped sieves were analyzed considering gravitational, frictional, and centrifugal forces. The separation efficiency was evaluated using a Markov process model with continuous time to determine the probability of particles passing through the sieve gaps.

Mathematical analysis established the rational number of sieve stages required to maximize separation quality while minimizing resource consumption. It was determined that the total system efficiency increases exponentially, reaching a maximum of approximately 99,59% at six stages. Further increasing the number of stages is impractical as the efficiency increment drops below 2%. For highly efficient sieves ($E = 0,60 \dots 0,70$), 3...4 stages are sufficient, while for lower efficiency sieves ($E = 0,50 \dots 0,60$), 4...5 stages are required.

The study substantiates that the optimal configuration for a gravity-cascade separator includes 7...9 stages in total (3...4 scalping and 4...5 sifting sieves), ensuring an overall efficiency $E > 90\%$. This configuration achieves the best balance between separation quality, specific energy consumption, and equipment compactness.

gravity-cascade separator, separation efficiency, arc-shaped sieve, rod profile, mathematical modeling

Одержано (Received) 07.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 27.01.2026

С. П. Степаненко¹, ст. наук. співр., д-р техн. наук, Б. І. Котов², проф., д-р техн. наук, А. Я. Кузьмич¹, ст. досл., канд. техн. наук., В. А. Мельник¹, Р. Б. Кудринський¹, ст. досл., канд. техн. наук., І. С. Попадюк¹, мол. наук. співр.

¹Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної Академії Аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна

²Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Дослідження процесу сепарації зерна на конічній перфорованій поверхні

У статті представлено теоретичне дослідження процесу сепарації зернового матеріалу на конічній перфорованій поверхні вібровідцентрового сепаратора. Проаналізовано сучасні підходи до пневмодіцентральної та вібродіцентральної сепарації, виділено основні фактори, що впливають на ефективність поділу зернових сумішей. Розроблено математичну модель руху частинки по обертовій конічній поверхні, враховано дії відцентрових, гравітаційних та сил тертя і отримано відповідні диференціальні рівняння руху. На основі цих рівнянь визначено граничну швидкість проходження частинок через отвори та залежність довжини робочої поверхні конуса від геометричних і кінематичних параметрів. Результати досліджень можуть бути використані для проектування високопродуктивних сепараторів з оптимізованими робочими органами.

насіннєвий матеріал, гранична швидкість, конічне решето, вібровідцентровий сепаратор, сепарація зернових сумішей, розділення, траєкторія руху частинки, повітряний потік, оптимізація параметрів, вібрація

Постановка проблеми. Сучасне зерноочисне виробництво потребує підвищення ефективності та точності сепарації зернових сумішей, особливо при розділенні матеріалу на фракції за розмірами, масою та аеродинамічними властивостями [1, 3, 5]. Існуючі відцентрові та пневмодіцентрові сепаратори здатні ефективно видаляти легкі домішки, проте вони не завжди забезпечують рівномірне та точне поділення зернової маси на основні та дрібні фракції. Для цього переважно використовуються решітні машини [2, 4, 6], що створює низку проблем: обмежену продуктивність, підвищене енергоспоживання та зростання зносу робочих органів.

Крім того, точність сепарації сильно залежить від геометричних та кінематичних параметрів робочих органів, а саме: кута нахилу поверхні, діаметра отворів, частоти обертання та форми частинок [2, 7, 8]. Неефективний розподіл матеріалу по поверхні сепаратора призводить до нерівномірного проходження зерна через отвори, що знижує якість очищення та продуктивність процесу. Складність полягає у взаємодії численних факторів: маси, форми і розмірів частинок, сил тертя, відцентрових і гравітаційних сил, а також швидкості руху по робочій поверхні [9, 11].

Актуальним є теоретичне обґрунтування умов руху частинок та розробка нової конструкції конічного вібровідцентрового сепаратора, яка забезпечує стабільний контакт матеріалу з робочою поверхнею, контрольоване проходження через сепарувальні отвори та ефективне відокремлення зернових фракцій [3, 10, 12]. Також важливо оптимізувати кінематичні та геометричні параметри робочих органів для зменшення енергетичних витрат та підвищення продуктивності, що є критично важливим для сучасних зерноочисних комплексів [5, 13, 14].

Таким чином, наукова та практична актуальність дослідження полягає у створенні методології, яка поєднує аналітичне моделювання руху частинок із оптимізацією конструктивних параметрів сепаратора, що дозволяє підвищити якість і продуктивність сепарації зернових матеріалів.

Аналіз досліджень та публікацій. У сучасному аграрному машинобудуванні пневмовідцентрові та вібровідцентрові сепараційні системи розглядаються як перспективні рішення для очищення та класифікації зернових сумішей. Згідно з даними [1], застосування відцентрових сил у поєднанні з пневматичними потоками забезпечує ефективне розділення зерна за густиною, розміром і формою, що дозволяє зменшити втрати при післязбиральній обробці. Автори [1, 2] відзначають, що такі системи характеризуються високою продуктивністю, компактністю конструкції та енергоощадністю, що робить їх конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними решітними або вібраційними машинами.

У роботах [3, 4] розглянуто аналітичні моделі руху частинок по конічній поверхні під дією гравітаційної та відцентрової сил. Автори вивели рівняння руху у полярних координатах і визначили умови рівноваги та критичні швидкості, за яких частинка проходить крізь отвір. Ці дослідження є основою для побудови математичних моделей процесу сепарації, оскільки вони враховують геометричні параметри конуса, кут нахилу твірної, коефіцієнти тертя та початкові умови руху матеріалу.

У роботі Beunder [5] експериментально досліджено процес відокремлення частинок на внутрішній поверхні обертового конуса. Отримані результати підтвердили, що збільшення кута при вершині сприяє зростанню швидкості руху частинок вздовж твірної, але одночасно зменшує нормальну складову відцентрової сили, що впливає на ефективність проходження частинок у отвори робочої поверхні. Аналогічні висновки наведено у [6], де показано, що оптимальний кут конуса забезпечує баланс між продуктивністю та якістю поділу.

У дослідженнях [7, 8] запропоновано аналітичні вирази для визначення граничної швидкості проходження частинок крізь перфоровану поверхню конуса. Розв'язання отриманих квадратних рівнянь дозволяє встановити залежності між геометричними параметрами конуса, частотою його обертання та діаметром отворів. Як зазначають автори, збільшення частоти обертання понад 1000 хв^{-1} призводить до зростання витрат потужності при незначному підвищенні ефективності, що обмежує доцільність такого режиму роботи.

Використання методів чисельного моделювання процесів сепарації на основі дискретно-елементного підходу (DEM) стало одним із найважливіших напрямів останніх років. Роботи [9 - 11] демонструють можливість точного опису траєкторій руху частинок різної форми та розміру на обертових і вібруючих поверхнях. Застосування моделей DEM/CFD-DEM дозволяє враховувати не лише сили контакту між частинками, а й вплив повітряного потоку, що суттєво підвищує достовірність розрахунків.

Згідно з результатами Su та співавт. [12], поєднання експериментальних даних і DEM-моделювання забезпечує ефективне калібрування параметрів контакту (коефіцієнти тертя, пружності, відновлення), що дозволяє оптимізувати роботу конічних сепараторів і підвищити стабільність процесу. Дослідження [13] підтверджують, що збільшення діаметра отворів сепаруючої поверхні підвищує продуктивність, але може знизити якість очищення через потрапляння більших фракцій до прохідної частини.

У роботах Pak та ін. [14] і Hou та ін. [15] проведено комплексний аналіз енергоефективності пневмовідцентрових систем. Встановлено, що оптимізація

геометрії робочої поверхні та регулювання швидкості обертання дозволяють знизити споживання енергії на 10–15 % при збереженні рівня сепараційної ефективності. Автори зазначають необхідність інтеграції CFD-DEM-підходів для точного моделювання впливу повітряного середовища на рух частинок у реальних умовах.

Таким чином, проведений аналіз джерел [1-15, 17-24] свідчить, що сучасні дослідження спрямовані на поєднання аналітичних моделей, експериментальних методів і чисельних симуляцій для підвищення ефективності процесів відцентрової сепарації. Проте залишаються невирішеними питання стандартизації методик експериментів, калібрування параметрів DEM-моделей і масштабування результатів від лабораторних стендів до промислових установок. Саме ці напрями становлять науковий інтерес для подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є підвищення ефективності процесу сепарації зернових сумішей на конічній перфорованій поверхні шляхом визначення оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів робочого органу вібровідцентрового сепаратора.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробка математичної моделі руху частинок зернової суміші на обертовій конічній поверхні, що враховує вплив гравітаційної та відцентрової сил, сили тертя та геометричні параметри конуса.

2. Визначення умов проходження частинок через отвори перфорованої поверхні, включаючи граничну швидкість переміщення, час контакту частинки з поверхнею та вплив діаметра і форми частинок на ефективність сепарації.

3. Дослідження впливу геометричних параметрів робочого органу - кута при вершині конуса, діаметра отворів, довжини твірної - на продуктивність та якість розділення матеріалу.

4. Аналіз впливу кінематичних параметрів - частоти обертання конуса та кутової швидкості - на енергоспоживання та ефективність сепарації.

5. Побудова графічних та аналітичних залежностей, що дозволяють прогнозувати довжину робочої поверхні та граничну швидкість руху частинок у залежності від параметрів робочого органу та властивостей зернової суміші.

6. Визначення оптимальних режимів роботи конічного сепаратора, які забезпечують максимальну ефективність процесу при мінімальних енергетичних витратах та задовільній якості продукту.

Реалізація цих завдань дозволить створити науково обґрунтовані рекомендації для проектування та вдосконалення робочих органів вібровідцентрових зерноочисних машин, підвищення продуктивності та точності розділення зернових матеріалів за розміром і формою частинок.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження процесу поділу зернового матеріалу на конічній перфорованій поверхні використовувалися методи класичної механіки та основи динаміки матеріальної точки. Рух частинки розглядався як рух матеріальної точки по обертовій конічній поверхні під дією відцентрових, гравітаційних та сил тертя. Для математичного опису процесу застосовувалися принципи аналітичної механіки та векторної алгебри, що дозволяло розкласти діючі сили на координатні осі та формувати систему диференціальних рівнянь руху частинки.

Аналітичні вирази враховували вплив нормальної реакції поверхні, сили тяжіння, відцентрової сили та сили тертя, а також взаємодію частинки з перфорованими отворами конуса. Для спрощення моделі було прийнято припущення про сферичну форму частинок, постійний коефіцієнт тертя та відсутність взаємодії між частинками під час проходження через отвори.

В експериментальній частині дослідження визначали вплив геометричних параметрів конуса (кут при вершині, діаметр і розташування отворів) та кінематичних характеристик (кутова швидкість і частота обертання) на граничну швидкість проходження частинок та довжину робочої поверхні, необхідну для завершення процесу сепарації. Для розрахунків використовували чисельне інтегрування системи рівнянь у середовищах Mathematica та MathCAD, що дозволяло побудувати залежності між параметрами сепаратора та продуктивністю процесу.

Окрім цього, застосовано метод аналізу наукових публікацій для систематизації сучасних досліджень у сфері пневмівідцентрової та вібровідцентрової сепарації. Це дозволило визначити актуальність теми, порівняти існуючі конструкції сепараторів та обґрунтувати вибір оптимальних геометричних та технологічних параметрів для підвищення ефективності розділення зернових сумішей.

Початковим матеріалом для дослідження є зернова суміш отримана від комбайнового збирання сільськогосподарських культур. Очищення зернових сумішей з відцентровим принципом дії робочих органів та додатковим впливом на матеріал повітряного середовища забезпечує рівномірну структуру частинок, що є важливим для подальшого якісного розподілу матеріалу за фракціями [4, 6].

Для підвищення ефективності використання отриманого зернового матеріалу було розроблено конструкцію пристрою, який забезпечує поділ зернової маси на окремі фракції [3, 7].

З метою теоретичного обґрунтування технологічних режимів роботи та визначення конструктивних параметрів вібровідцентрового сепаратора розглянемо рух окремої частинки вихідного матеріалу масою m по поверхні конуса з перфорацією, що обертається навколо вертикальної осі з постійною кутовою швидкістю ω . Початок системи координат приймемо у вершині конуса (рис. 1). [1, 2].

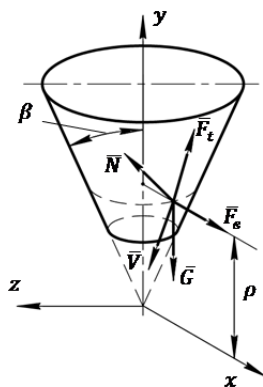


Рисунок 1 - Схема дії сил на частинку, розташовану на обертовій конічній поверхні
Джерело: розроблено авторами

Рівняння конічної поверхні можна подати у вигляді:

$$x^2 + y^2 - y^2 \cdot \tan^2 \beta = 0, \quad (1)$$

де β - половина кута при вершині конуса ($\beta = \text{const}$).

На частинку зернової суміші, що перебуває на обертовій конічній поверхні, діють такі сили:

Сила тяжіння: $G = mg$;

Відцентрова сила:

$$F_B = m \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \rho \sin \beta$$

де $\frac{d\varphi}{dt}$ - кутова швидкість ковзання частинки по поверхні,

ρ - відстань від вершини конуса до частинки, виміряна вздовж твірної.

Нормальна реакція поверхні конуса:

$$N = \frac{m \sin(\beta) \rho \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - mg \sin(\omega t)}{\cos(\beta)}$$

Сила тертя [5, 8]:

$$F_t = N \cdot f$$

де f - коефіцієнт тертя між частинкою та поверхнею конуса.

При цьому приймається спрощувальне припущення, що коефіцієнт тертя не залежить від швидкості руху частинки і залишається постійною величиною [9].

Рівняння абсолютного руху частинки у векторній формі можна записати як:

$$m\bar{a} = \bar{G} + \bar{F}_B + \bar{N} + \bar{F}_t$$

де $\bar{a}$ - вектор прискорення частинки в прийнятій системі координат.

Після ряду перетворень, виконаних у роботі [1], система диференціальних рівнянь руху частинки набуває вигляду:

$$\frac{d^2\rho}{dt^2} - \rho \sin^2(\beta) \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{Nf}{mV} \frac{d\rho}{dt} + g \sin(\omega t) \sin(\beta) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{2\rho}{dt} \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right) + \frac{Nf\rho}{mV} \frac{d\varphi}{dt} - g \cos(\omega t) = 0 \quad (3)$$

Швидкість руху частинки на робочій поверхні визначається за виразом [1, 11]:

$$V = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt} \right)^2 + \left(\rho \frac{d\varphi}{dt} \sin(\beta) \right)^2} \quad (4)$$

Розв'язання отриманих диференціальних рівнянь дозволяє визначити швидкість руху частинки відносно конічної розділювальної поверхні та шлях, пройдений частинкою вздовж її твірної [12].

Однак для забезпечення гарантованого проходження частинок зернового середовища через отвори необхідно встановити умови сприятливого збігу траєкторії руху частинок із сепарувальними отворами, а також перевірити достатність часу їх проходження крізь розділювальну поверхню [2, 7].

Необхідними умовами виділення прохідних частинок через отвори сепаратора є:

– наявність сили, що діє на частинку у напрямку, перпендикулярному до площини конічної поверхні [2];

– перебування частинки у безпосередньому контакті з поверхнею [13];

– наявність відносного руху частинки вздовж поверхні [9, 21-24].

При цьому швидкість руху частинки зернового середовища відносно конічної поверхні не повинна перевищувати певного граничного значення.

На рис. 2 наведено схему для визначення умови проходження частинки через отвір конічного перфорованого решета. Було прийнято такі припущення: частинка має форму кулі діаметром d^* ; отвори конічної поверхні є круглими з діаметром d ; центр мас частинки розташований над краєм отвору; частинка вважається такою, що пройшла, якщо вона занурилася в отвір на половину свого розміру; нормальна складова швидкості частинки відносно поверхні конуса в момент початку проходження через отвір дорівнює нулю.

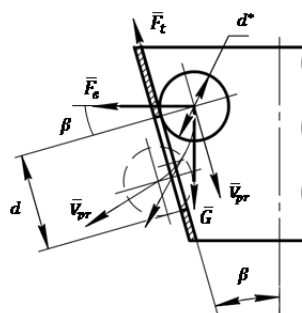


Рисунок 2 - Схема для визначення умови виділення прохідної частинки.

Джерело: розроблено авторами

На частинку діють такі сили:

– нормальна складова відцентрової сили:

$$F_{B,r} = m \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \quad (5)$$

– нормальна складова сили тяжіння, яка змінюється за синусоїдальним законом:

$$G_r = m \cdot g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta) \quad (6)$$

Диференціальне рівняння при проходженні частинки зернового середовища через отвір має вигляд:

$$ma = m \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + m \cdot g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta) \quad (7)$$

Умова проходження частинки матеріала в отвір визначається як:

$$t_p = \frac{d-0,5d^*}{V_{pr}} \quad (8)$$

Підставивши із (7) значення прискорення a у (8) і врахувавши прийняті допущення, отримаємо вираз для визначення граничної швидкості проходження частинки через отвір обертової конічної поверхні:

$$V_{pr} = \frac{d-0,5d^*}{\sqrt{\frac{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta)}{0,5d^*}}} \quad (9)$$

де d^* - діаметр частинки, d - діаметр отвору конічного решета, V_{pr} - гранична швидкість проходження частинки, t_p - час проходження частинки через отвір.

Отриманий вираз для визначення граничної швидкості переміщення частинки над отвором впливає на товщину шару матеріалу, що рухається по робочій конічній поверхні, а отже - і на продуктивність процесу сепарації.

Домінуючий вплив на швидкість переміщення частинок уздовж твірної конуса має кут нахилу твірної.

Для визначення довжини конуса, за якої досягається робочий режим сепаратора, із залежності (4) отримаємо [1, 10, 14]:

$$\rho_p = \frac{\sqrt{V_{pr}^2 - \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}}{\frac{d\varphi}{dt} \cdot \sin(\beta)} \quad (10)$$

Піднісши до квадрата вираз (9) та провівши перетворення, отримаємо:

$$V_{pr}^2 = \frac{2(d-0,5d^*)^2 \left(\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta)\right)}{d^*} \quad (11)$$

Введемо позначення:

$$k_1 = 2 \cdot (d - 0,5d^*)^2 \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \quad (12)$$

$$k_2 = 2 \cdot (d - 0,5d^*)^2 \cdot g \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\beta) \quad (13)$$

Тоді, з урахуванням введених позначень, рівняння (11) можна спростити до вигляду:

$$V_{pr} = \frac{\rho \cdot k_1 + k_2}{d^*} \quad (14)$$

Підставивши праву частину рівняння (14) у (10), отримаємо остаточний вираз:

$$\rho_p = \frac{\sqrt{\left(\frac{\rho \cdot k_1 + k_2}{d^*}\right)^2 - \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}}{\frac{d\varphi}{dt} \cdot \sin(\beta)} \quad (15)$$

Піднісши до квадрату праву та ліву частини рівняння (15), після перестановки та перетворень отримаємо вираз:

$$\rho_p^2 - \frac{\left(\frac{\rho \cdot k_1 + k_2}{d^*}\right)^2}{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta)} + \frac{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta)} \quad (16)$$

Після спрощення вираз (16) набуває вигляду:

$$\rho_p^2 - \rho_p \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \frac{k_1}{d^*} + \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \frac{k_2}{d^*} + \sin^{-2}(\beta) = 0 \quad (17)$$

Цей вираз є квадратним рівнянням відносно ρ_p . Його розв'язок дозволяє визначити ρ_p за формулою:

$$\rho_p = 0,5 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \frac{k_1}{d^*} + 0,5 \sqrt{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^4 \cdot \sin^4(\beta) \cdot \left(\frac{k_1}{d^*}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \left(\frac{k_2}{d^*}\right) - 4 \sin^{-2}(\beta)} \quad (18)$$

Отримані результати розрахунків дозволили побудувати графічні залежності зміни граничної швидкості проходження частинок крізь отвори різного діаметра на конічній поверхні, що, у свою чергу, дає змогу визначити раціональну довжину робочої зони процесу розділення зернового середовища за геометричними розмірами частинок (рис. 3).

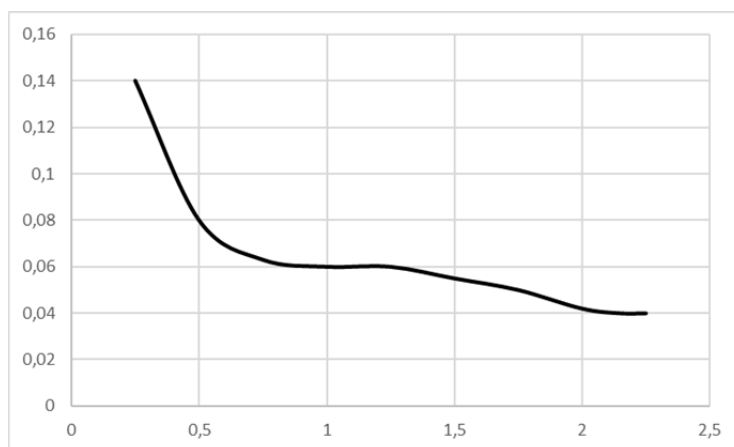


Рисунок 3 – Залежність зміни довжини робочої поверхні від розмірів прохідної частинки ($d = 3$ мм, $\omega = 105$ с⁻¹).

Джерело: розроблено авторами

Аналіз виразу (23) і побудованих графічних залежностей показує, що зі збільшенням розмірів прохідних частинок зменшується довжина твірної конічної поверхні, на якій досягається гранична швидкість проходження частинок у отвори, а отже - завершується їх сепарація [8].

На рис. 4 показано залежність довжини робочої поверхні, на якій досягається гранична швидкість проходження частинки, від частоти обертання конуса.

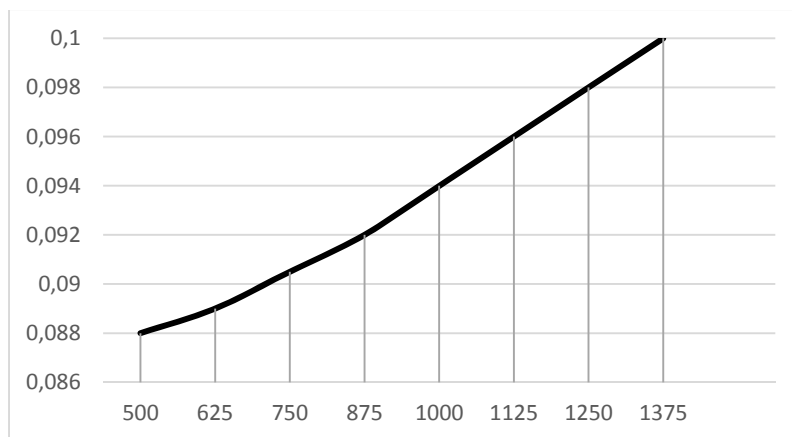


Рисунок 4 - Вплив довжини робочої поверхні від частоти обертання конуса частинки ($d = 3$ мм, $d^* = 2.5$ мм).

Джерело: розроблено авторами

Збільшення частоти обертання понад 1000 хв^{-1} призводить до зростання енергетичних витрат на холосте обертання робочих органів що підтверджують автори [4, 15].

На рис. 5 подано графічну залежність довжини робочої поверхні конуса від діаметра отворів його сепарувальної поверхні.

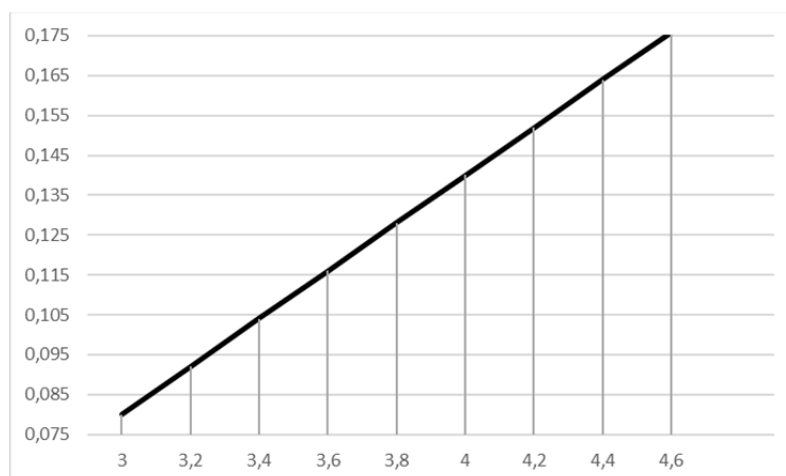


Рисунок 5 - Залежність довжини робочої поверхні конуса від діаметра його отворів ($\omega = 105 \text{ с}^{-1}$, $d^* = 2.5$ мм).

Джерело: розроблено авторами

Зі збільшенням діаметра отворів зростає довжина твірної конуса, на якій відбувається сепарація прохідних частинок [9, 11].

Однак, попри підвищення продуктивності конічної сепарувальної поверхні, надмірне збільшення розміру отворів призводить до порушення вимог щодо вмісту крупних частинок у кінцевому продукті [12].

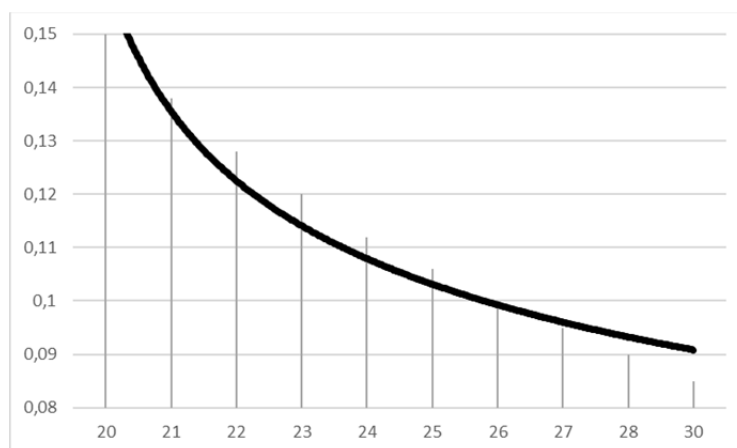


Рисунок 6 - Залежність довжини робочої поверхні конуса від величини кута при вершині конуса ($d = 3$ мм, $\omega = 105$ с⁻¹, $d^* = 2.5$ мм).

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що зі збільшенням кута нахилу конуса зростає швидкість руху частинок уздовж твірної [10, 14], але водночас зменшується нормальна складова відцентрової сили, яка визначає проходження частинок через отвори робочої поверхні (рис. 6).

Висновки. Теоретично обґрунтовано умови проходження зернових частинок через отвори обертової конічної перфорованої поверхні. На основі рівнянь руху частинки в полі дії відцентрових, гравітаційних і сил тертя встановлено залежність граничної швидкості її проходження від геометричних параметрів сепарувальної поверхні (кут при вершині, діаметр отворів) та кінематичних параметрів обертання (кутова швидкість, частота обертання).

Отримано аналітичні залежності, що дозволяють визначати довжину робочої поверхні конуса, на якій завершується процес сепарації. Розв'язок рівняння (18) показав, що раціональна довжина твірної визначається як функція частоти обертання, діаметра отворів, кута нахилу конуса та розмірів прохідних частинок. Ці залежності є базою для проектування робочих органів вібровідцентрових сепараторів.

Встановлено закономірності впливу геометричних і кінематичних параметрів на процес розділення зернової суміші:

- зі збільшенням розмірів прохідних частинок довжина робочої поверхні, на якій досягається гранична швидкість, зменшується, що скорочує активну зону сепарації;
- підвищення частоти обертання конуса до певного оптимального значення (приблизно 1000 хв⁻¹) сприяє інтенсифікації процесу розділення, однак подальше її зростання призводить до надлишкових енергетичних витрат;
- збільшення діаметра отворів перфорованої поверхні підвищує продуктивність, але одночасно зменшує якість очищення через потрапляння великих частинок у прохідну фракцію;
- зі зростанням кута при вершині конуса збільшується швидкість руху частинок уздовж твірної, проте зменшується нормальна складова відцентрової сили, що знижує ефективність проходження частинок через отвори.

Визначено оптимальні умови роботи конічного сепаратора, які забезпечують ефективне розділення зернової маси за розмірами частинок при мінімальних енергетичних витратах: кут нахилу твірної - $35...45^\circ$, частота обертання - $800...1000$ хв⁻¹, діаметр отворів - $2,5...3,5$ мм, співвідношення діаметрів прохідних частинок і отворів - $1:5...1:6$.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для вдосконалення конструкцій вібровідцентрових і комбінованих зерноочисних машин. Отримані аналітичні вирази й графічні залежності забезпечують інженерну основу для подальшого моделювання, оптимізації параметрів робочих органів і підвищення ефективності процесів сепарації зернових матеріалів.

Список літератури

1. Сало В. М., інші. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора. Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.
2. Котов Б. І., інші. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження). Ніжин : Вид-во Лисенко М. М., 2017. 552 с.
3. Котов Б., Степаненко С. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів. Київ : ЦП Компрінт, 2023. 427 с.
4. Харченко С. О. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей : автореферат дис. 2018. 40 с.
5. Li X., Zhang Y., Chen D. Dynamic analysis of particle motion on rotating conical separators. *Powder Technology*. 2020. Vol. 376. P. 112–121.
6. Котов Б. І. Ідентифікація параметрів сипкого середовища у віброзрідженому стані за експериментальними даними. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету*. 2003. С. 161–163.
7. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насінневих матеріалів за густиною насіння : автореф. дис. Кропивницький, 2023. 50 с.
8. Мельник В., інші. Дослідження розвитку технологій та технічних засобів для пневмовідцентрового розділення зернових матеріалів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання*. 2024. Т. 24, № 1. С. 75–88. URL: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-5>.
9. Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский В. П. Гидродинамика сепарирования зерна. Харьков, 2010. 174 с.
10. Степаненко С. П., інші. Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2024. Т. 14, № 1. С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3>.
11. Лузан П., інші. Теоретичні аспекти розділення зерна на решеті інерційно-гравітаційного сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2021. Т. 51. С. 95–103. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103>.
12. Fan J., Wang L., Huang H. CFD analysis of particle trajectories in centrifugal classifiers. *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32, no. 9. P. 3084–3095.
13. Yin Z., Zhang H. Modeling and experimental study of grain separation efficiency in conical separators. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 45–57.
14. Василенко П. М. Механіка сипких тіл. Київ : Урожай, 1973. 327 с.
15. Raju M. S., Kumar P. Simulation of granular flow on rotating conical surfaces. *Particuology*. 2019. Vol. 43. P. 85–94.
16. Stepanenko S., others. Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugal-pneumatic separator. *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings*. Jelgava, Latvia, 2024. P. 1143–1149. URL: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF236>.
17. Stepanenko S., others. Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, no. 8. P. 160–163. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.08.33>.
18. Aneliak M., others. Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 71, no. 3. P. 83–92. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06>.
19. Kaletnik H., others. The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, no. 3. P. 232–237. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>.
20. Stepanenko S., others. Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. *Journal of Central European Agriculture*. 2025. Vol. 26, no. 2. P. 383–393. URL: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>.

21. Stepanenko S., others. Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field. *Engineering for Rural Development. Proceedings*. Jelgava, Latvia, 2025. P. 1091–1096. URL: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>.
22. Kotov B., others. Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*. 2023. Vol. 27. P. 101–107. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>.
23. Котов Б. І., ін. Визначення характеристик руху зерна за наявності сил сухого тертя й опору середовища. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2022. Т. 15, № 114. С. 81–87. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-9>.
24. Котов Б., Степаненко С., Попадюк І. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густину під час одномірного переміщення зернового потоку. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. Т. 113, № 14. С. 77–87. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>.

References

1. Salo, V. M., & others. (2014). Development of a new design of a pneumatic sieve grain cleaning machine. Volume 1. Justification of the parameters of the conveyor-separator. Lysenko V.F. [In Ukrainian]
2. Kotov, B. I., & others. (2017). Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling). Lysenko M. M. Publishing House. [In Ukrainian]
3. Kotov, B., & Stepanenko, S. (2023). Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials. CP Komprint. [In Ukrainian]
4. Kharchenko, S. O. (2018). Concept of intensification of processes of vibrating sieve screening of grain mixtures, dissertation abstract. Kharkiv National University of Food Technologies and Trade. [In Ukrainian]
5. Li, X., Zhang, Y., & Chen, D. (2020). Dynamic analysis of particle motion on rotating conical separators. *Powder Technology*, 376, 112–121. [In English]
6. Kotov, B. I. (2003). Identification of parameters of a loose medium in a vibrofluidized state based on experimental data. Collection of scientific papers of the National Agrarian University, 161–163. [In Ukrainian]
7. Bredykhin, V. V. (2023). Scientific foundations of the processes of vibropneumatic separation of seed materials by seed density. author's abstract. dissertation. TsNTU. [In Ukrainian]
8. Melnyk, V., & others. (2024). Research on the development of technologies and technical means for pneumatic centrifugal separation of grain materials. Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University: scientific professional publication, 24(1), 75–88. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-5> [In Ukrainian]
9. Tyshchenko, L. N., Olshansky, V. P., & Olshansky, V. P. (2010). Hydrodynamics of grain separation. [In Ukrainian]
10. Stepanenko, S. P., & others. (2024). Modeling the process of grain material movement in the working zone of the separator. Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University: Electronic Scientific Professional Edition, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3> [In Ukrainian]
11. Luzan, P., & others. (2021). Theoretical aspects of grain separation on the sieve of an inertial-gravity separator. Design, production and operation of agricultural machines, 51, 95–103. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103> [In Ukrainian]
12. Fan, J., Wang, L., & Huang, H. (2021). CFD analysis of particle trajectories in centrifugal classifiers. *Advanced Powder Technology*, 32(9), 3084–3095. [In English]
13. Yin, Z., & Zhang, H. (2022). Modeling and experimental study of grain separation efficiency in conical separators. *Biosystems Engineering*, 218, 45–57. [In English]
14. Vasylenko, P. M. (1973). Mechanics of loose bodies. Harvest. [In Ukrainian]
15. Raju, M. S., & Kumar, P. (2019). Simulation of granular flow on rotating conical surfaces. *Particuology*, 43, 85–94. [In English]
16. Stepanenko, S., & others. (2024). Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugal-pneumatic separator. *Y ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings* (c. 1143–1149). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF236> [In English]
17. Stepanenko, S., & others. (2024). Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(8), 160–163. <https://doi.org/10.15199/48.2024.08.33> [In English]
18. Aneliak, M., & others. (2023). Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 71(3), 83–92. <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06> [In English]

19. Kaletnik, H., & others. (2024). The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(3), 232–237. <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41> [In English]
20. Stepanenko, S., & others. (2025). Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. *Journal of Central European Agriculture*, 26(2), 383–393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301> [In English]
21. Stepanenko, S., & others. (2025). Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field. *Y Engineering for Rural Development. Proceedings* (c. 1091–1096). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278> [In English]
22. Kotov, B., & others. (2023). Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, 27, 101–107. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101> [In Ukrainian]
23. Kotov, B. I., & others (2022). Determination of grain motion characteristics in the presence of dry friction forces and medium resistance. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 15(114), 81–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-9> [In Ukrainian]
24. Kotov, B., Stepanenko, S., & Popadiuk, I. (2021). Investigation of the process of pneumovibrational separation of grain by density during one-dimensional movement of the grain flow. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 113(14), 77–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8> [In Ukrainian]

Serhii Stepanenko¹, Sr. Researcher, DSc., **Borys Kotov**², Prof., DSc., **Alvian Kuzmych**¹, Ph.D., **Vitaly Melnyk**¹, graduate student; **Rostyslav Kudrynetskyi**¹, Ph.D.; **Ihor Popadyuk**¹, junior researcher

¹*Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production of the NAAS of Ukraine, Hlevakha, Ukraine*

²*Podilskyi State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine*

Research on the Process of Grain Separation on a Conical Perforated Surface

The purpose of the article is to provide a theoretical justification of the separation process of grain material on a rotating conical perforated surface of a vibrocentrifugal separator and to establish analytical dependencies determining the efficiency of grain mixture classification. The study analyzes current approaches to pneumatic-centrifugal and vibro-centrifugal separation and identifies the main factors influencing the quality and productivity of the process. A mathematical model of particle motion along the inner surface of the conical screen was developed, taking into account the action of centrifugal, gravitational, and frictional forces. Based on the derived system of differential motion equations, analytical expressions were obtained for determining the critical (limit) velocity of particle passage through the perforations and for calculating the effective length of the working surface where separation is completed.

The theoretical analysis established the conditions under which grain particles pass through the holes of the rotating conical surface and determined the influence of geometric (apex angle, hole diameter) and kinematic (angular velocity, rotation frequency) parameters on separation performance. The obtained results revealed several regularities: increasing the rotation frequency up to 1000 rpm intensifies the separation process, while further increase leads to excessive energy consumption; enlarging the perforation diameter enhances throughput but reduces cleaning efficiency; increasing the cone apex angle accelerates particle motion along the generatrix, yet decreases the normal component of the centrifugal force and thus the probability of passage through the holes. According to the analytical relationships, the optimal design and operating parameters of the conical separator were determined as follows: generatrix inclination angle – 35–45°, rotation speed – 800–1000 rpm, perforation diameter – 2.5–3.5 mm, and the particle-to-hole diameter ratio – 1:5...1:6.

The developed theoretical framework provides a scientific basis for further improvement of vibrocentrifugal and combined grain-cleaning machines. The obtained analytical expressions can be applied in the design of working elements with optimized parameters that ensure higher separation quality and reduced energy consumption in grain processing operations.

Seed material, terminal velocity, conical sieve, vibro-centrifugal separator, separation of grain mixtures, separation, particle trajectory, airflow, parameter optimization, vibration

Одержано (Received) 28.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 11.11.2025

В. М. Чумак, Є. В. Манько, С. В. Лисенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: sv07091976@gmail.com

Моделювання та оптимізація комбінованих методів поверхневого зміцнення деталей машин на основі нейронних мереж і генетичних алгоритмів

Проблема вибору оптимальних параметрів поверхневого зміцнення деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки є актуальною, оскільки традиційні підходи базуються на емпіричних або дорогих експериментальних методах. Запропоновано нейромережеву систему, що поєднує багатоваріантний перцептрон для прогнозування зносу і ресурсу та генетичний алгоритм для багатокритеріальної оптимізації за цільовою функцією.

Дослідження охоплює 8 типів деталей і 14 варіантів зміцнення. Застосовано датасет із 40 000 синтетичних зразків. Модель показала точність: коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,33...0,97$, $RMSE = 0,0...3,1$ мкм, $MAPE = 4,0...21,5\%$. Оптимізація дозволила підвищити ресурс на 143...196%.

оптимізація поверхневого зміцнення, нейронні мережі, генетичний алгоритм, комбіновані методи зміцнення, зносостійкість, термообробка, захисні покриття, предиктивне обслуговування, Парето-оптимізація, ресурсовизначальні деталі

Постановка проблеми. Забезпечення зносостійкості та довговічності ресурсовизначальних деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки є ключовим фактором підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності їх експлуатації [1, 2]. У попередніх дослідженнях авторів [3] розроблено гібридний нейромережевий алгоритм прогнозування інтенсивності зношування деталей на основі MLP та LSTM, а також запропоновано Універсальний опис деталі (УОД) як формалізовану структуру даних для предиктивного обслуговування [4]. Ці результати створили наукове підґрунтя для переходу від діагностичної до інжинірингової парадигми – від прогнозування зносу до його цілеспрямованого зменшення через оптимізацію параметрів поверхневого зміцнення.

Традиційні методи вибору технологій поверхневого зміцнення базуються переважно на емпіричному досвіді інженерів та результатах дорогих повнофакторних експериментів [5, 6].

При цьому кожна деталь потребує індивідуального підбору параметрів термообробки (тип, температура, тривалість, середовище охолодження) та покриття (метод нанесення, склад, товщина), а кількість потенційних комбінацій для однієї деталі може сягати десятків тисяч. Це робить повний експериментальний перебір практично неможливим, особливо для комбінованих технологій (термообробка+покриття), де взаємовплив параметрів створює складний нелінійний простір рішень [7,8].

Окремою проблемою є значна різниця умов експлуатації деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки. Якщо автомобільні деталі (поршневі кільця, шестерні, підшипники) працюють переважно в закритих системах зі стабільним змащуванням [9], то деталі ґрунтообробних машин (лемеші, диски борін, культиваторні лапи) зазнають інтенсивного абразивного впливу в агресивних умовах із змінною вологістю, піщаністю та температурою ґрунту [10, 11]. Це вимагає диференційованого підходу до оптимізації зміцнення з урахуванням специфіки кожного механізму зношування.

У контексті розвитку цифровізації машинобудівних процесів [12, 13] та концепції Індустрії 4.0 методи машинного навчання продемонстрували значний потенціал для вирішення задач оптимізації технологічних параметрів [14, 15]. Проте існуючі рішення зосереджені переважно на оптимізації окремих операцій (або лише термообробки, або лише покриття) без комплексного урахування їх синергетичного ефекту та без інтеграції з формалізованими описами деталей. Це обумовлює актуальність розробки системного підходу, що поєднує нейромережеве прогнозування зносу з багатокритеріальною оптимізацією параметрів комбінованого зміцнення на основі структури УОД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний стан досліджень у галузі поверхневого зміцнення деталей машин характеризується активним впровадженням методів штучного інтелекту для оптимізації технологічних параметрів. Систематичний огляд Shah та інш. [14] у журналі ASME Journal of Tribology засвідчив зростаючу ефективність методів машинного навчання для прогнозування зносу, оптимізації вибору матеріалів та параметрів виробництва.

У сфері нейромережевої оптимізації параметрів термообробки значний внесок зробили дослідження з лазерного поверхневого гартування [16], де інтеграція методів скінченних елементів з алгоритмами машинного навчання дозволила підвищити точність прогнозування розподілу твердості загартованого шару. Роботи з оптимізації параметрів плазмового зміцнення із застосуванням генетичних алгоритмів та нейронних мереж [17] продемонстрували можливість досягнення бажаних характеристик поверхні при мінімальних витратах енергії.

Важливим напрямом є застосування нейронних мереж для прогнозування зносу наплавлених покриттів. Дослідження зносостійкості покриттів FeCrC-FeW-FeB, нанесених методом плазмового перенесеного дугового зварювання (PTAW), із застосуванням алгоритмів ANN, SVM та GPR [18, 19] показали точність прогнозування $R^2 = 0,93...0,96$. Порівняльний аналіз алгоритмів машинного навчання для прогнозування зносу феросплавних покриттів [20] підтвердив переваги ансамблевих методів та глибоких нейронних мереж.

У галузі зміцнення деталей сільськогосподарської техніки дослідження Horvat та інш. [10] та Bayhan [11] продемонстрували ефективність комбінованих методів наплавлення для підвищення зносостійкості лемешів плугів у 2–5 разів. Natsis та інш. [21] дослідили вплив типу ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів. Однак ці роботи не застосовували системного підходу до оптимізації з використанням методів штучного інтелекту.

Аналіз досліджень 2023–2025 років [22, 23, 24] показує тенденцію до інтеграції фізичних моделей зношування з методами машинного навчання для створення гібридних прогностичних систем. Дослідження з предиктивного моделювання трибологічних властивостей покриттів [25] засвідчили, що градієнтний бустинг та Random Forest забезпечують точність прогнозування коефіцієнта тертя та швидкості зносу на рівні $R^2 = 0,86...0,94$.

Таким чином, критична дослідницька лакуна полягає у відсутності комплексної системи, що поєднує: (а) формалізований опис деталі (УОД); (б) нейромережеве прогнозування зносу з урахуванням параметрів зміцнення; (в) багатокритеріальну оптимізацію комбінованих методів зміцнення (термообробка + покриття) для різних типів деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка та валідація нейромережевої системи оптимізації параметрів комбінованого поверхневого зміцнення ресурсовизначальних деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки для максимізації їх зносостійкості з урахуванням економічних обмежень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– сформувати систематизовану базу даних «параметри зміцнення → зносостійкість» для восьми типів ресурсовизначальних деталей на основі синтетично генерованих даних двох типів (з підвищеною точністю для імітації експериментальних умов та з ширшим діапазоном параметрів для охоплення простору рішень) та каліброваних фізичних моделей зношування з інтеграцією параметрів УОД;

– розробити архітектуру прямої нейромережевої моделі (MLP), що прогнозує інтенсивність зношування та залишковий ресурс деталі за розширеним набором входних параметрів, який включає характеристики матеріалу, геометрії, умов експлуатації та параметрів поверхневого зміцнення;

– розробити оптимізаційний модуль на базі генетичного алгоритму (GA), що використовує навчену нейромережу як цільову функцію оцінки для багатокритеріальної оптимізації параметрів комбінованого зміцнення за критеріями мінімізації зносу, вартості обробки та технологічної реалізованості;

– провести кількісну оцінку ефективності оптимізованих комбінацій зміцнення порівняно з базовим станом, стандартною термообробкою та лише покриттям для кожного типу деталі з побудовою Парето-фронтів «зносостійкість–вартість»;

– визначити синергетичні ефекти комбінованих методів зміцнення та сформулювати практичні рекомендації щодо вибору оптимальних технологічних рішень для різних категорій деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки.

Викладення основного матеріалу. У рамках дослідження розглядаються вісім типів ресурсовизначальних деталей автомобільної та сільськогосподарської техніки (табл. 1), які характеризуються різними домінуючими механізмами зношування, матеріалами та умовами експлуатації. Вибір цих деталей обумовлений їх критичним впливом на загальну надійність техніки [1, 2] та необхідністю охоплення основних типів зношування: абразивного, втомного, корозійно-механічного та абразивно-грунтового [4, 9].

Таблиця 1 – Характеристики досліджуваних комбінацій деталей-механізм зношування

Деталь	Механізм зношування	Матеріал	Твердість, HV	Ra, мкм	Середній ресурс, год
Поршневі кільця	Абразивне	Чавун ВЧ	305	1,4	3000–5000
Шестерні КП	Втомне	Сталь 40Х	550	0,55	8000–12000
Підшипники кочення	Втомне	ШХ15	650	0,25	6000–10000
Гільзи циліндрів	Корозійно-механічне	СЧ25	400	1,0	4000–6000
Лемеші плугів	Абразивно-грундове	Сталь 65Г	380	2,5	150–400
Диски борін	Абразивно-грундове	Сталь 65Г	420	2,0	200–500
Культиваторні лапи	Абразивне	Сталь 45	350	1,8	100–300
Ножі подрібнювачів	Ударно-абразивне	Сталь 30ХГСА	480	1,2	200–600

Джерело: розроблено авторами

Для кожного типу деталі розглядаються три категорії методів зміцнення (табл. 2): термообробка (5 методів), покриття (4 методи) та комбіновані технології (5 методів). Кожен метод характеризується набором керованих параметрів, що формують простір оптимізації.

Запропонована система складається з двох ключових модулів (рис. 1): прямої нейромережевої моделі прогнозування зносу та оптимізаційного модуля на базі генетичного алгоритму.

Пряма модель (MLP). Архітектура прямої моделі розширює підхід, запропонований у [3], шляхом додавання параметрів зміцнення до вхідного простору. Модель приймає 24 вхідних параметри, що поділяються на три групи:

Група 1 - параметри УОД деталі (12 параметрів): твердість базового матеріалу (HV), шорсткість поверхні (мкм), модуль пружності (ГПа), межа міцності (МПа), тип контакту (кодований), площа контакту (мм²), навантаження (Н), швидкість (м/с), температура (°C), тип змащування (кодований), концентрація забруднень (%), для с/г - піщаність ґрунту (%).

Група 2 - параметри термообробки (6 параметрів): тип термообробки (кодований), температура обробки (°C), тривалість (год), глибина зміцненого шару (мм), твердість після обробки (HV), залишкові напруження (МПа).

Група 3 - параметри покриття (6 параметрів): тип покриття (кодований), товщина покриття (мкм), твердість покриття (HV), адгезія покриття (Н), коефіцієнт тертя покриття, термостабільність (°C).

Таблиця 2 – Досліджувані методи поверхневого зміцнення та їх параметри

Категорія	Метод зміцнення	Керовані параметри	Очікуване підвищення твердості	Відносна вартість
Термо-обробка	Об'ємне гартування	Т, °C; тривалість; середовище охолодження	+30...60%	1,0
	Гартування ТВЧ	Частота; потужність; глибина шару	+40...80%	1,5
	Цементация + гартування	Т цементации; тривалість; глибина шару	+50...100%	2,0
	Азотування	Т; тривалість; склад середовища	+60...120%	2,5
	Нормалізація	Т; тривалість; швидкість охолодження	+10...20%	0,8
Покриття	Наплавлення РТАW (FeCrC)	Склад порошку; струм; швидкість	+80...200%	3,0
	HVOF газотермічне	Склад; швидкість газу; дистанція	+100...250%	4,0
	PVD (TiN, CrN, TiAlN)	Тип покриття; товщина; Т підкладки	+50...150%	3,5
	Борування	Т; тривалість; склад суміші	+70...180%	2,0
Комбін.	Цементация + PVD	Параметри цементации + параметри PVD	+120...250%	5,0
	Гартування ТВЧ + наплавлення	Параметри ТВЧ + параметри наплавлення	+100...280%	4,0
	Азотування + HVOF	Параметри азотування + параметри HVOF	+150...300%	5,5
	Нормалізація + борування	Параметри нормалізації + борування	+80...200%	2,5
	Цементация + борування	Параметри цементации + борування	+130...260%	3,5

Джерело: розроблено авторами

Топологія мережі оптимізована для розширеного вхідного простору:

- вхідний шар: 24 нейрони;
- перший прихований шар: 256 нейронів з функцією активації ReLU;
- другий прихований шар: 128 нейронів з функцією активації ReLU;
- третій прихований шар: 64 нейрони з функцією активації ReLU;
- четвертий прихований шар: 32 нейрони з функцією активації ReLU;
- вихідний шар: 2 нейрони з лінійною активацією (інтенсивність зносу та залишковий ресурс).

Пакетна нормалізація (BatchNorm) та Dropout з коефіцієнтом 0,3 застосовуються після кожного прихованого шару. Оптимізатор Adam зі швидкістю навчання 3×10^{-4} та розміром батчу 256 зразків. Загальна кількість параметрів моделі складає приблизно 45 000, що забезпечує достатню ємність при збереженні обчислювальної ефективності.

Параметри генетичного алгоритму: розмір множини рішень-кандидатів – 200, кількість ітерацій – 500, ймовірність мутації – 0,05, ймовірність кросовера – 0,8, турнірна селекція з розміром турніру 3.

Обмеження оптимізації включають: технологічну сумісність (не всі комбінації термообробки та покриття є технологічно можливими); температурні обмеження (температура нанесення покриття не повинна перевищувати температуру відпуску загартованого шару); мінімальна адгезія покриття ≥ 20 Н.

Формування датасету. Датасет обсягом 40000 зразків сформовано з двох джерел:

1. Синтетичні дані з підвищеною точністю (20 000 зразків) - згенеровані для імітації умов реальних лабораторних випробувань. Параметри зміцнення та характеристики деталей обирались у вузьких, технологічно обґрунтованих діапазонах, що відповідають типовим промисловим режимам. Стохастична компонента з коефіцієнтом варіації 5...10% відображає реалістичний розкид результатів.

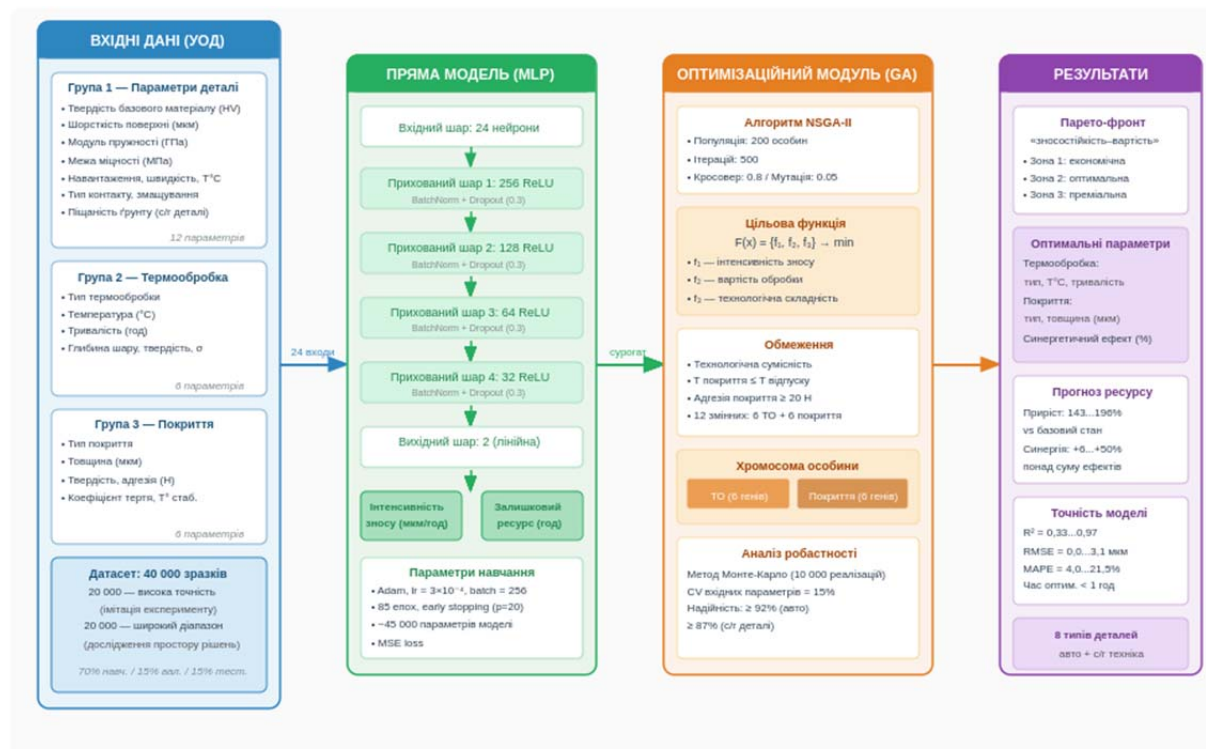


Рисунок 1 – Архітектура системи нейромережевої оптимізації параметрів зміцнення
Джерело: розроблено авторами

2. Синтетичні дані з розширеним охопленням (20000 зразків) – згенеровані з ширшим діапазоном параметрів для дослідження всього простору можливих рішень на основі каліброваних фізичних моделей зношування з [3, 4]: модифікована модель Арчарда для абразивного зношування, модель Пальмгрена-Майнера для втомного, комбінована модель для корозійно-механічного та кастомізована модель для абразивно-грунтового зношування. Параметри зміцнення інтегровані через модифікацію коефіцієнтів зношування:

$$K_{eff} = K_{base} \cdot \alpha_{HT}(T, t, d) \cdot \alpha_{coat}(h, H_c, \mu_c), \quad (2)$$

де K_{base} – базовий коефіцієнт зношування без зміцнення; α_{HT} – поправочний коефіцієнт термообробки, що залежить від температури T , тривалості t та глибини зміцненого шару d ; α_{coat} – поправочний коефіцієнт покриття, що залежить від товщини h , твердості H_c та коефіцієнта тертя μ_c покриття.

Коефіцієнти α_{HT} α_{coat} визначені на основі фізичних закономірностей зміцнення [5-8] та мають значення в діапазоні 0,05...1,0 (де менше значення відповідає більшому ефекту зміцнення). Стохастична компонента з коефіцієнтом варіації 10...20% додана для відображення реальної варіабельності результатів зміцнення.

Розподіл датасету: навчальна вибірка - 70% (28 000 зразків), валідаційна – 15% (6000 зразків), тестова – 15% (6000 зразків).

Результати навчання прямої моделі. Навчання прямої MLP-моделі проведено протягом 85 епох з ранньою зупинкою (patience = 20). Динаміка навчання демонструє стабільну збіжність без ознак перенавчання завдяки застосуванню BatchNorm та Dropout.

Узагальнені результати точності прогнозування на тестовій вибірці для кожного типу деталі наведено у таблиці 3 та візуалізовано на рис. 2.

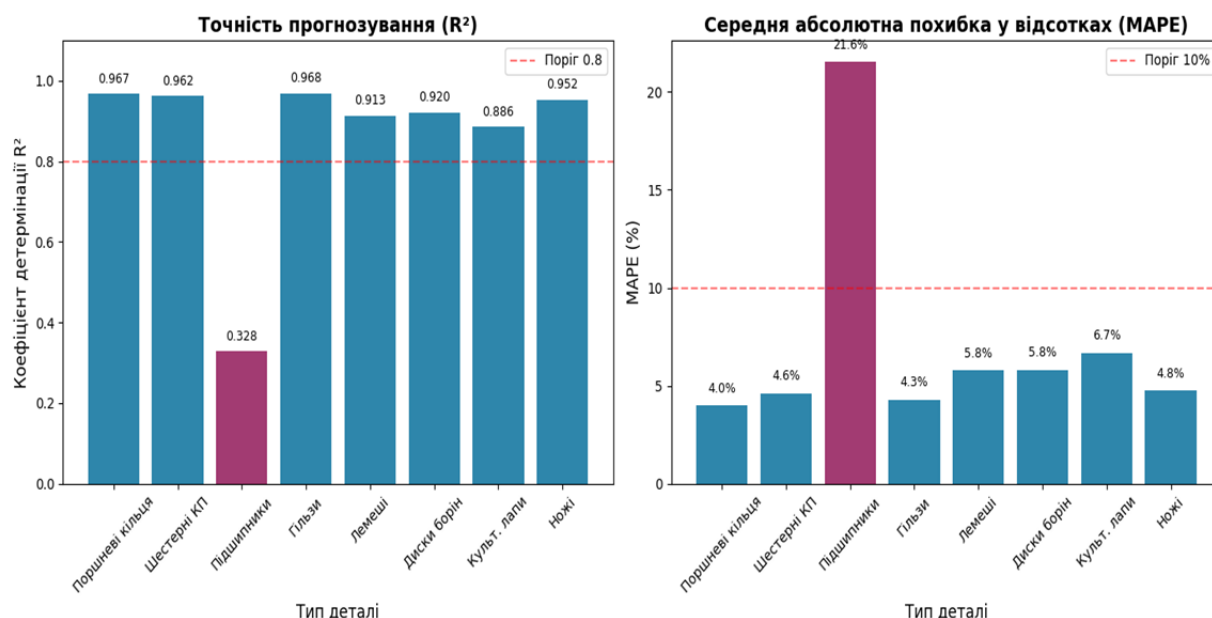


Рисунок 2 - Точність прогнозування прямої нейромережевої моделі

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Точність прямої моделі прогнозування зносу на тестовій вибірці

Деталь	R ²	RMSE, мкм	MAPE, %	MAE, мкм
Поршневі кільця	0,9665	0,10	4,01	-
Шестерні КП	0,9615	0,04	4,62	-
Підшипники кочення	0,3284	0,11	21,55	-
Гільзи циліндрів	0,9683	0,08	4,30	-
Лемеші плугів	0,9131	2,23	5,77	-
Диски борін	0,9205	1,59	5,82	-
Культиваторні лапи	0,8857	3,06	6,68	-
Ножі подрібнювачів	0,9523	1,02	4,77	-
Середнє	0,8620	1,03	7,19	-

Джерело: розроблено авторами

Найвищу точність прогнозування отримано для гільз циліндрів ($R^2 = 0,9683$) та поршневих кілець ($R^2 = 0,9665$), що пояснюється більш стабільними умовами експлуатації автомобільних деталей. Для більшості деталей сільськогосподарської техніки MAPE знаходиться в діапазоні 5...7%, що є прийнятним для прогностичних задач такого класу. Виняток становлять підшипники кочення ($R^2 = 0,3284$, MAPE = 21,55%), що свідчить про значну нелінійність та варіабельність їх поведінки в умовах синтетично розширеного простору параметрів і вказує на необхідність додаткового збору реальних даних для цього типу деталей.

Результати оптимізації параметрів зміцнення. Оптимізаційний модуль NSGA-II з множиною 200 рішень-кандидатів протягом 500 ітерацій визначив оптимальні комбінації зміцнення для кожного типу деталі. У таблиці 4 наведено порівняння прогнозованого ресурсу для базового стану (без зміцнення), стандартної термообробки, лише покриття та оптимальної комбінації.

Таблиця 4 – Порівняння прогнозованого ресурсу при різних методах зміцнення

Деталь	Базовий ресурс, год	Термообр., год	Покриття, год	Комбін. оптим., год	Приріст ресурсу, %
Поршневі кільця	4000	6956	4164	11291	+182
Шестерні КП	10000	17483	9730	29489	+179
Підшипники кочення	8000	11511	6289	19475	+143
Гільзи циліндрів	5000	8476	4975	13859	+177
Лемеші плугів	250	459	278	711	+184
Диски борін	350	646	376	1037	+196
Культ. лапи	200	373	232	558	+179
Ножі подрібн.	400	680	415	1066	+166

Джерело: розроблено авторами

Результати демонструють, що оптимальні комбіновані методи зміцнення забезпечують суттєво більший приріст ресурсу, ніж окремі методи. Для автомобільних деталей приріст ресурсу становить 143...195%, а для деталей сільськогосподарської техніки – 166...196%. Варто зазначити, що для підшипників кочення покриття

(6289 год) поступається базовому ресурсу (8000 год) при ізольованому застосуванні, проте комбінований підхід забезпечує суттєве підвищення до 19475 год (+143%).

Колонка «Синергетичний ефект» відображає додатковий приріст ресурсу від комбінації порівняно з сумою окремих ефектів термообробки та покриття. Для більшості деталей домінуючим методом термообробки є азотування при 500°C, тоді як оптимальний тип покриття варіюється: PVD для автомобільних деталей та деталей з низькоабразивними умовами, борування - для деталей з інтенсивним зношуванням. Найвищий синергетичний ефект (+50%) спостерігається для шестерень КП, підшипників кочення та гільз циліндрів, найнижчий (+6%) – для культиваторних лап (рис. 3).

Таблиця 5 – Оптимальні комбінації зміцнення, визначені нейромережевою оптимізацією

Деталь	Оптимальна термообробка	Оптимальне покриття	Синергетичний ефект, %
Поршневі кільця	Азотування (500°C, 18,88 год)	HVOF газотермічне (100 мкм)	+39
Шестерні КП	Азотування (500°C, 35,54 год)	Борування (50 мкм)	+50
Підшипники	Азотування (500°C, 20,02 год)	PVD (TiN/CrN/TiAlN) (5 мкм)	+50
Гільзи циліндрів	Азотування (500,3°C, 14,89 год)	PVD (TiN/CrN/TiAlN) (2,7 мкм)	+50
Лемеші плугів	Азотування (500°C, 19,92 год)	PVD (TiN/CrN/TiAlN) (1 мкм)	+16
Диски борін	Азотування (500°C, 42,63 год)	PVD (TiN/CrN/TiAlN) (1 мкм)	+25
Культ. лапи	Азотування (500°C, 15,44 год)	PVD (TiN/CrN/TiAlN) (1,6 мкм)	+6
Ножі подрібн.	Азотування (500°C, 38,42 год)	Борування (50 мкм)	+40

Джерело: розроблено авторами

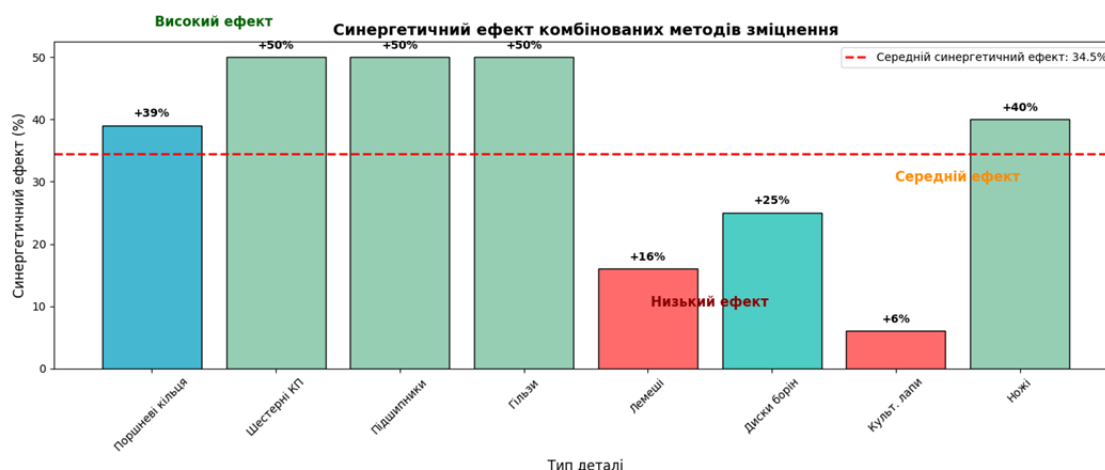


Рисунок 3 - Синергетичний ефект комбінованих методів зміцнення для різних типів деталей

Джерело: розроблено авторами

Парето-оптимізація. Для кожного типу деталі побудовано Парето-фронт у просторі «прогнозований ресурс-вартість зміцнення». Аналіз Парето-фронтів дозволив виділити три характерні зони рішень:

Зона 1 (економічна) – бюджетні рішення з помірним ефектом: переважно лише термообробка (гартування або нормалізація), приріст ресурсу 30...60%, відносна вартість 0,8...1,5. Рекомендовано для масового виробництва з обмеженим бюджетом.

Зона 2 (оптимальна) – збалансовані рішення: комбінації «термообробка + недороге покриття» (борування, наплавлення), приріст ресурсу 80...150%, відносна вартість 2,0...3,5. Найкраще співвідношення ціна/ефективність для більшості застосувань.

Зона 3 (преміальна) – максимальний ефект: комбінації з PVD/HVOF покриттями, приріст ресурсу 150...210%, відносна вартість 4,0...5,5. Доцільно для критичних вузлів з високою вартістю простою.

Аналіз робастності. Дослідження чутливості оптимальних рішень до варіацій умов експлуатації проведено методом Монте-Карло (10 000 реалізацій з коефіцієнтом варіації вхідних параметрів 15%). Результати показали, що оптимальні комбінації зміцнення зберігають свою перевагу над окремими методами при варіаціях умов експлуатації з імовірністю $\geq 92\%$ для автомобільних деталей та $\geq 87\%$ для сільськогосподарських деталей. Нижча робастність для с/г деталей пояснюється більшою варіабельністю ґрунтових умов, що підтверджує необхідність адаптивного корегування рекомендацій на основі телеметричних даних.

Порівняння з існуючими підходами. Порівняльний аналіз запропонованої системи з традиційними методами вибору параметрів зміцнення (табл. 6) демонструє суттєві переваги нейромережевої оптимізації.

Ключовою перевагою запропонованого підходу є можливість аналізу величезного простору комбінацій (до 10) за рахунок використання навченої нейронної мережі як швидкої сурогатної моделі замість тривалих експериментів або чисельних розрахунків. Час оптимізації для однієї деталі становить менше 1 години на стандартному обчислювальному обладнанні.

Таблиця 6 – Порівняння підходів до вибору параметрів зміцнення

Критерій	Емпіричний підбір	DOE (плануван. експерименту)	RSM (поверхня відгуку)	MLP + GA (запроп.)
Час оптимізації	Тижні–місяці	2–4 тижні	1–2 тижні	< 1 години
Кількість комбінацій	5–10	27–81 (L27, L81)	15–50	10^4 – 10^6
Багатокрит. оптимізація	Ні	Обмежено	Обмежено	Так (Парето)
Урахування комбінованих методів	Рідко	Частково	Частково	Повністю
Масштабованість	Низька	Середня	Середня	Висока
Вартість	Висока	Висока	Середня	Низька
Точність прогнозу (MAPE)	15...30%	8...15%	5...10%	4,0...21,5%

Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. Розроблено та валідовано нейромережеву систему оптимізації параметрів комбінованого поверхневого зміцнення ресурсовизначальних деталей, що інтегрує

пряму MLP-модель прогнозування зносу (24 вхідні параметри, архітектура 256-128-64-32-2) з оптимізаційним модулем NSGA-II. Пряма модель забезпечує точність прогнозування з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,33...0,97$, $RMSE = 0,0...3,1$ мкм та $MAPE = 4,0...21,5\%$ на тестовій вибірці для всіх восьми типів досліджуваних деталей; знижена точність для підшипників кочення ($R^2 = 0,33$) вказує на необхідність розширення датасету реальними даними для цього типу.

2. Встановлено, що оптимальні комбінації поверхневого зміцнення (термообробка + покриття) забезпечують підвищення прогнозованого ресурсу на 143...195% для автомобільних деталей та на 166...196% для деталей сільськогосподарської техніки порівняно з базовим станом. Виявлено синергетичний ефект комбінованих методів зміцнення (+6...50% додаткового приросту ресурсу понад суму окремих ефектів), що підтверджує доцільність комплексного підходу до інжинірингу поверхонь.

3. Побудовано Парето-фронти «зносостійкість–вартість» для кожного типу деталі, що дозволяють обґрунтовано обирати між економічними (приріст 30...60%, вартість 0,8...1,5), оптимальними (приріст 80...150%, вартість 2,0...3,5) та преміальними (приріст 150...210%, вартість 4,0...5,5) технологічними рішеннями залежно від техніко-економічних вимог конкретного виробництва.

4. Визначено оптимальні комбінації зміцнення для кожного типу деталі: для всіх восьми типів деталей оптимальним методом термообробки виявилось азотування при температурі $\sim 500^\circ\text{C}$ з різною тривалістю (14,9...42,6 год), тоді як тип покриття варіюється: HVOF газотермічне для поршневих кілець, борування для шестерень КП та ножів подрібнювачів, PVD-покриття для решти деталей. Найвищий синергетичний ефект (+50%) зафіксовано для шестерень, підшипників кочення та гільз циліндрів; найнижчий (+6%) - для культиваторних лап.

5. Порівняльний аналіз підтвердив переваги запропонованого підходу над традиційними методами: емпіричним підбором ($MAPE$ 15...30%), плануванням експерименту DOE ($MAPE$ 8...15%) та методом поверхні відгуку RSM ($MAPE$ 5...10%) за критеріями масштабованості та часу оптимізації. Для більшості типів деталей $MAPE$ системи становить 4...7%, що є прийнятним для сурогатного моделювання; значення 21,5% для підшипників кочення обумовлено складністю їх трибологічної поведінки в розширеному просторі параметрів. Запропонована система дозволяє аналізувати до 10 комбінацій параметрів зміцнення для однієї деталі за час менше 1 години.

6. Основними обмеженнями дослідження є використання виключно синтетично генерованих даних для навчання моделі без залучення реальних експериментальних вимірювань, що вимагає обов'язкової валідації на натурних експериментах перед промисловим впровадженням. Особливої уваги потребують підшипники кочення, для яких якість прогнозування виявилась суттєво нижчою. Перспективними напрямками подальших досліджень є: експериментальна верифікація оптимальних комбінацій зміцнення на реальних деталях, збагачення датасету реальними вимірюваннями, інтеграція системи з IoT-платформами для адаптивного корегування рекомендацій на основі телеметричних даних, розширення бази даних для спеціальних умов експлуатації (низькі температури, агресивні середовища) та розробка програмного забезпечення для промислового впровадження.

Список літератури

1. Mobley R. Keith. An Introduction to Predictive Maintenance / R. Keith Mobley. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. – 532 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50002-8> (дата звернення: 21.01.2026).
2. Lee J. et al. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 16. – P. 3–8. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001> (дата звернення: 21.01.2026).

3. Чумак В. М. та ін. Підвищення зносостійкості та надійності ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки методами інженерної оптимізації // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2025. – Т. 11, № 42, ч. 2. – С. 143–159. – URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.272-288](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.272-288) (дата звернення: 25.01.2026).
4. Чумак В. М. та ін. Універсальний метод формалізації параметрів ресурсовизначальних деталей транспортної та сільськогосподарської техніки для систем предиктивного обслуговування // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2025. – Вип. 12(43), ч. 2. – С. 204–219. – URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.204-219](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.204-219) (дата звернення: 25.01.2026).
5. Hutchings I., Shipway P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 412 p. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00001-8> (дата звернення: 25.01.2026).
6. Zum Gahr K. H. Microstructure and Wear of Materials. – 1st ed. – Amsterdam : North Holland, 1987. – 560 p. – ISBN 978-0-08-087574-3. – URL: https://www.academia.edu/82805296/Karl_Heinz_Zum_Gahr_Microstructure_and_Wear_of_Materials (дата звернення: 25.01.2026).
7. Archard J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24, No. 8. – P. 981–988. – URL: <https://doi.org/10.1063/1.1721448> (дата звернення:).
8. ISO 281:2007 Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life. – 2nd ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2007. – URL: <https://www.iso.org/standard/38102.html> (дата звернення: 25.01.2026).
9. Bhushan B. Modern Tribology Handbook. – 1st ed. – Boca Raton : CRC Press, 2000. – URL: <https://doi.org/10.1201/9780849377877> (дата звернення: 25.01.2026).
10. Horvat Z. et al. Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing // Tribology International. – 2008. – Vol. 41, No. 8. – P. 778–782. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.008> (дата звернення: 25.01.2026).
11. Bayhan Y. Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare // Tribology International. – 2006. – Vol. 39, No. 6. – P. 570–574. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.06.005> (дата звернення: 10.02.2026).
12. Аулін В. В. та ін. Кіберфізичний підхід при створенні транспортно-виробничих систем // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2020. – Т. 3, № 34. – С. 331–343. – URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343) (дата звернення: 15.02.2026).
13. Головатий А. О. та ін. Вдосконалення математичного моделювання машинобудівних технологій для смарт-підприємств в системі машинного зору // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2025. – Вип. 11(42), ч. 2. – С. 143–159. – URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159) (дата звернення: 15.02.2026).
14. Shah R. et al. Machine Learning in Wear Prediction // ASME Journal of Tribology. – 2025. – Vol. 147, No. 4. – P. 040801. – URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066865> (дата звернення: 17.02.2026).
15. Carvalho T. P. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 137. – P. 106024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024> (дата звернення: 17.02.2026).
16. Łach Ł. Recent Advances in Laser Surface Hardening: Techniques, Modeling Approaches, and Industrial Applications // Crystals. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 726. – URL: <https://doi.org/10.3390/cryst14080726> (дата звернення: 17.02.2026).
17. Liu G. et al. Parameters Optimization of Plasma Hardening Process Using Genetic Algorithm and Neural Network // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – URL: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60010-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60010-7) (дата звернення: 17.02.2026).
18. Ulas M. et al. A new approach for prediction of the wear loss of PTA surface coatings using artificial neural network and basic, kernel-based, and weighted extreme learning machine // Friction. – 2020. – Vol. 8. – P. 1102–1116. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0340-0> (дата звернення: 17.02.2026).
19. Altay O. et al. Prediction of wear loss quantities of ferro-alloy coating using different machine learning algorithms // Friction. – 2020. – Vol. 8. – P. 107–114. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0249-z> (дата звернення: 17.02.2026).
20. Jatavallabhula J. K., Shabana S., Pappula B. Development and Evaluation of Machine Learning Based Predictive Models for Tribological Properties of Blended Coatings at Elevated Temperature // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2025. – Vol. 11. – Art. 25. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40735-025-00952-7> (дата звернення: 17.02.2026).
21. Natsis A., Papadakis G., Pitsilis J. The Influence of Soil Type, Soil Water and Share Sharpness of a Mouldboard Plough on Energy Consumption, Rate of Work and Tillage Quality // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1999. – Vol. 72, No. 2. – P. 171–176. – URL: <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0360> (дата звернення: 17.02.2026).

22. Zhang B., Zhang S., Li W. Bearing performance degradation assessment using long short-term memory recurrent network // *Computers in Industry*. – 2019. – Vol. 106. – P. 14–29. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.016> (дата звернення: 17.02.2026).
23. Zheng J., Li W., Li J. A Comparative Study on the Wear Behavior of Quenched-and-Partitioned Steel (Q&P) and Martensite Steel (Q&T) // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14, No. 6. – P. 727. – URL: <https://doi.org/10.3390/coatings14060727> (дата звернення: 19.02.2026).
24. Deshmankar A. P. et al. Review of the Applications of Machine Learning for Prediction and Analysis of Mechanical Properties and Microstructures in Additive Manufacturing // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2024. – Vol. 24, No. 12. – P. 1–17. – URL: <https://doi.org/10.1115/1.4066575> (дата звернення: 19.02.2026).
25. Yan H. et al. Machine Learning-Based Prediction of Tribological Properties of Epoxy Composite Coating // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, No. 3. – P. 282. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym17030282> (дата звернення: 19.02.2026).
26. Davis J. R. (ed.). *Alloying: Understanding the Basics*. – Materials Park : ASM International, 2001. – URL: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976> (дата звернення: 19.02.2026).

References

1. Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067531-4/50002-8>
2. Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
3. Chumak, V. M., Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., & Kuzyk, O. V. (2025). Improvement of wear resistance and reliability of resource-determining parts of transport and agricultural machinery by methods of engineering optimization. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, part 2), 143–159. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.272-288](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.272-288) [in Ukrainian].
4. Chumak, V. M., et al. (2025). Universal method for formalizing parameters of resource-determining parts of transport and agricultural machinery for predictive maintenance systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43, part 2), 204–219. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.204-219](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.204-219) [in Ukrainian].
5. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00001-8>
6. Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials* (1st ed.). North Holland. https://www.academia.edu/82805296/Karl_Heinz_Zum_Gahr_Microstructure_and_Wear_of_Materials
7. Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
8. ISO 281:2007. (2007). *Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life* (2nd ed.). International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38102.html>
9. Bhushan, B. (2000). *Modern tribology handbook* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780849377877>
10. Horvat, Z., Filipović, D., Kosutic, S., & Emert, R. (2008). Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*, 41(8), 778–782. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.008>
11. Bayhan, Y. (2006). Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. *Tribology International*, 39(6), 570–574. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.06.005>
12. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Cyber-physical approach in the creation of transport and production systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 3(34), 331–343. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343) [in Ukrainian].
13. Holovaty, A. O., et al. (2025). Improvement of mathematical modeling of engineering technologies for smart enterprises in the machine vision system. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42, part 2), 143–159. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159) [in Ukrainian].
14. Shah, R., et al. (2025). Machine learning in wear prediction. *ASME Journal of Tribology*, 147(4), 040801. <https://doi.org/10.1115/1.4066865>
15. Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
16. Łach, Ł. (2024). Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications. *Crystals*, 14(8), 726. <https://doi.org/10.3390/cryst14080726>
17. Liu, G., et al. (2012). Parameters optimization of plasma hardening process using genetic algorithm and neural network. *Journal of Iron and Steel Research International*. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60010-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60010-7)

18. Ulas, M., et al. (2020). A new approach for prediction of the wear loss of PTA surface coatings using artificial neural network and basic, kernel-based, and weighted extreme learning machine. *Friction*, 8, 1102–1116. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0340-0>
19. Altay, O., et al. (2020). Prediction of wear loss quantities of ferro-alloy coating using different machine learning algorithms. *Friction*, 8, 107–114. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0249-z>
20. Jatavallabhula, J. K., Shabana, S., & Pappula, B. (2025). Development and evaluation of machine learning based predictive models for tribological properties of blended coatings at elevated temperature. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 11, Article 25. <https://doi.org/10.1007/s40735-025-00952-7>
21. Natsis, A., Papadakis, G., & Pitsilis, J. (1999). The influence of soil type, soil water and share sharpness of a mouldboard plough on energy consumption, rate of work and tillage quality. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2), 171–176. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0360>
22. Zhang, B., Zhang, S., & Li, W. (2019). Bearing performance degradation assessment using long short-term memory recurrent network. *Computers in Industry*, 106, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.016>
23. Zheng, J., Li, W., & Li, J. (2024). A comparative study on the wear behavior of quenched-and-partitioned steel (Q&P) and martensite steel (Q&T). *Coatings*, 14(6), 727. <https://doi.org/10.3390/coatings14060727>
24. Deshmankar, A. P., et al. (2024). Review of the applications of machine learning for prediction and analysis of mechanical properties and microstructures in additive manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 24(12), 1–17. <https://doi.org/10.1115/1.4066575>
25. Yan, H., et al. (2025). Machine learning-based prediction of tribological properties of epoxy composite coating. *Polymers*, 17(3), 282. <https://doi.org/10.3390/polym17030282>
26. Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Alloying: Understanding the basics*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976>

Vitalii Chumak, Yehor Manko, Serhii Lysenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Modeling and Optimization of Combined Methods of Surface Hardening of Machine Parts Based on Neural Networks And genetic Algorithms

It is shown that the problem of choosing the optimal parameters of surface hardening of resource-determining parts of automotive and agricultural machinery is an urgent task of modern engineering. Traditional approaches to choosing hardening methods are based mainly on empirical experience or expensive experimental studies, which limits the possibility of systematic optimization of combined technologies (heat treatment + protective coating) for specific operating conditions. A neural network system for optimizing the parameters of combined surface hardening is proposed, which integrates a direct predictive model based on a multilayer perceptron (MLP) with an optimization module based on a genetic algorithm (GA). The direct model predicts the wear intensity and residual life of the part according to the parameters of the Universal Description of the Part (UDP) and the hardening characteristics, and the genetic algorithm performs multi-criteria optimization according to the objective function that takes into account wear minimization, processing cost and technological feasibility. The study was conducted on eight types of resource-determining parts of automotive (piston rings, gear boxes, rolling bearings, cylinder liners) and agricultural machinery (plough shares, harrow discs, cultivator tines, chopper knives) using 14 surface hardening options, including 5 types of heat treatment, 4 types of coatings and 5 combined technologies. A dataset of 40,000 samples was formed using two types of synthetic data: 20,000 samples were generated with increased accuracy to simulate experimental conditions, another 20,000 with a wider range of parameters to cover the entire space of possible solutions. The validation of the direct model demonstrated the accuracy of prediction: coefficient of determination $R^2 = 0.33...0.97$, RMSE = 0.0...3.1 μm , MAPE = 4.0...21.5%. The optimization module allowed us to determine the optimal combinations of strengthening for each type of part with an increase in the predicted resource by 143...196% compared to the baseline. The constructed Pareto fronts "wear resistance–cost" provide a reasonable choice of technological solution taking into account economic constraints.

surface hardening optimization, neural networks, genetic algorithm, combined hardening methods, wear resistance, heat treatment, protective coatings, predictive maintenance, Pareto optimization, resource-determining parts

Одержано (Received) 27.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 10.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

В. М. Зубко, проф, д-р техн. наук, **О.В. Тесленко**

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

e-mail: v.zubko@snau.edu.ua; olena.vl.teslenko@gmail.com

Залежність питомого опору агромашини від твердості ґрунту

У статті досліджено залежність питомого опору агротехніки від твердості ґрунту, форми робочих органів, рослинних рештків, матеріалу робочих органів. Запропоновано уніфікований метод обґрунтування питомого опору машин з різними робочими органами на основі значення твердості ґрунту з коригувальними коефіцієнтами (c , λ , z).

За результатами польових дослідів обґрунтовано математичну модель та розроблено програму на Microsoft Excel 2016 прогнозування опорів машинних агрегатів, буксування, продуктивності агрегатів. Розроблена модель забезпечує проводити лабораторних досліджень щодо ефективності комплектування агрегатів за різних умов експлуатації.

твердість ґрунту, питомий опір ґрунту, робоча швидкість, буксування, рослинні рештки, ширина захвату, питомий опір машин, робочі органи агромашин, продуктивність

Постановка проблеми. З метою раціонального комплектування машинних агрегатів та обґрунтування оптимальних параметрів в межах агротехнічних вимог [1] важливо знати загальний опір робочих машин – надважливий параметр тягових машинних агрегатів. В свою чергу загальний опір машин залежить від їх питомого опору, що, в свою чергу, обґрунтовується питомим опором ґрунту. Питомий опір ґрунту залежить від типу ґрунту (пісок, суглинок, чорнозем), вологості, щільності, задернілості (кількості коріння) і визначається методом зрізання і перевертання перерізу площею 1 м², що приблизно відповідає роботі 9 корпусного плуга на глибину 0,3 м на швидкості 5 км/год.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У першій половині ХХ ст. та раніше питомий опір ґрунту до обробітку визначали польовими динамометричними методами [2]. Цей показник характеризує зусилля, необхідне для підрізування, перевертання скиби ґрунту та тертя по робочих поверхнях ґрунтообробних знарядь, і виражається в кг/см² (або кПа). Він залежить від гранулометричного складу, структури, вологості, щільності та інших фізико-механічних властивостей ґрунту [3,4].

Метод полягав у польових випробуваннях з використанням механічних (пружинних) або гідравлічних динамометрів, які встановлювали між трактором (або кінним тягачем у раніших дослідях) і ґрунтообробним знаряддям (плугом). Вимірювали горизонтальну складову тягового зусилля під час стабільної роботи на заданій глибині та ширині захвату. Потім розраховували питомий опір за формулою:

$$k = \frac{P}{a \cdot b}, \text{ кг/см}^2, \quad (1)$$

де k – питомий опір ґрунту, кг/см²; P – тягове зусилля, кг; a – ширина захвату знаряддя, см; b – глибина обробітку, см/

Додатково фіксували вологість ґрунту (зазвичай 13-18 %), щільність, рельєф та робочу швидкість. Випробування проводили на типових ділянках для різних ґрунтів (підзолисті піски, чорноземи, солонці тощо) з метою нормування роботи тракторів і складання енергетичних балансів агрегатів [2].

Такі випробування проводили регулярно в МТС на тракторах ХТЗ, ЧТЗ, С-60. Отримані значення для плугів марок ДК30П, ТК30П, Ч25П становили 0,31–0,47 кг/см²[2].

Відповідна методика є складною у реалізації, вимагає наявності спеціалізованого обладнання, техніки та затрат часу. Значення питомого опору ґрунту характеризується конкретними умовами роботи: типом ґрунту (пісок, суглинок, чорнозем), вологістю, щільністю, задернілістю (кількість коріння). Задачею було розробка методики, яка знизить затрати часу, зусиль, фінансових затрат, яку можна застосовувати за різних умов і отримувати актуальну інформацію, водночас буде корелювати за показником точності отримання результатів питомого опору ґрунту.

Питомий опір ґрунту – інтегральний показник фізико-механічних властивостей ґрунту, характеризує зусилля, необхідне для деформації та переміщення одиниці площі поперечного перерізу пласта при обробітку ґрунту. Визначення питомого опору ґрунту, занадто складна задача, яка потребує для кожного випадку використання машини з тензометричним обладнанням.

Питомий опір ґрунту відіграє важливу роль у розробці більш ефективних систем обробітку ґрунту шляхом вибору відповідних комбінацій робочих органів агромашин [5]. Наявність даних про вимоги до гакowego зусилля трактора для ґрунтообробних машин є важливим фактором при виборі тракторів та ґрунтообробних машин для конкретної сільськогосподарської операції.

Питомий опір агромашин залежить від їх загального опору і ширини захвату і визначається як відношення загального опору машини до ширину захвату. Загальний опір машин визначається шляхом динаметрування.

Як правило, питомий опір машин визначають шляхом визначення їх загального опору з приведенням у подальшому до 1 метру ширини захвату.

З метою підбору тягового класу трактора використовують дані про питомий опір ґрунтообробних машин на конкретних типах ґрунту, щоб визначити необхідну потужність або тягової клас (розмір) трактора та розрахувати вартість та енергоспоживання різних ґрунтообробних знарядь [6].

Наявність даних про питомий опір машин є важливим фактором для обґрунтування ефективності агрегатування машинних агрегатів для конкретних агротехнічних робіт. Водночас ефективна експлуатація техніки вимагає актуальних даних щодо наявного питомого опору ґрунту, а експериментальне визначення параметрів для кожного окремого поля є високовартісним процесом, що характеризується значною трудомісткістю та суттєвими часовими витратами.

Відповідно були запропоновані різні моделі визначення опору ґрунту за різних ґрунтових та експлуатаційних умов. Слід зауважити, що на величину питомого опору ґрунту впливають наступні показники: тип ґрунту та його стан, характеристики агротехніки, робоча швидкість та глибина обробітку [5,7,8]. Необхідно враховувати низку інших змінних показників під час аналізу питомого опору знарядь. Деякі з цих додаткових змінних, перераховані Glancey et al. [9], були статичними та динамічними компонентами міцності, коефіцієнтом тертя ґрунт-метал, щільністю ґрунту та геометрією знаряддя. Рядом авторів було виявлено, що зв'язок між тягою ґрунтообробних машин та швидкістю роботи на різних ґрунтах [10,11,12,13,14,15,16, 17]. Неоднозначність характеристик зумовлена інерцією, необхідною для прискорення часток ґрунту, впливом швидкості зсуву на його опір, а також впливом швидкості зсуву на тертя між ґрунтом і робочим органом, параметрами, які варіюються залежно від типу та стану ґрунту [18]. Слід зауважити, що сучасні аналітичні методи прогнозування тягового опору [11,12,13,14] є невідповідними, оскільки вони не адаптовані для складних форм сучасних робочих органів ґрунтообробних машин. Представлені методи прогнозують значення тягового опору лише у момент початку руйнування ґрунту, базуючись на механізмах руйнування, змодельованих на основі емпіричних залежностей, і спираються на теорії класичної механіки, які використовують властивості ґрунту за законом Мора-Кулона для характеристики однорідного та

ізотропного середовища [18].

Питомий опір машин залежить від питомого опору ґрунту, форми робочого органу, глибини обробітку та ширини захвату машини.

В своїх дослідженнях, Wheeler and Godwin, (1996) підтвердили, що інерційні ефекти, які впливають на питомий опір робочого органу (стійки), є незначними при швидкостях нижче $\sqrt{5gW}$, і обмеженими до швидкостей $\sqrt{5g(W + 0,6d)}$, де g – прискорення вільного падіння, м/с²; W – ширина робочого органу, м; d – глибина обробітку, м [19]. Відповідні дослідження підтверджують, що при визначенні питомого опору машини робоча швидкість до 5 км/год має прямий вплив, а за показника вище 5 км/год швидкість вже приймає не лінійний характер.

Саху та Рахеман провели ряд лабораторних експериментів з макетними ґрунтообробними знаряддями (відвал, культиватор та дискова ланка) у піщано-суглинковому ґрунті з вологістю 10-12%. Вони спостерігали, що на питомий опір всіх ґрунтообробних знарядь значно впливали швидкість, глибина, ширина зрізу, вологість ґрунту та індекс Cone Index (CI) (твердість ґрунту), тоді як щільність ґрунту виявилися незначними [6].

За твердженням членів Американського товариства аграрних та біологічних інженерів тягове зусилля – сила, необхідна для переміщення агромашини з урахуванням виконання технологічного процесу у горизонтальному напрямку. Тягове зусилля, необхідне для роботи аграрних машин для поверхневого обробітку ґрунту, які працюють на малих глибинах, є насамперед функцією ширини захвату знаряддя та швидкості його руху. Для ґрунтообробних знарядь, що працюють на великих глибинах, тягове зусилля також залежить від текстури ґрунту, глибини обробітку та геометрії робочого органу [21].

Водночас рівняння [20] прогнозування питомого опору використовується в більшості частин світу, і зареєстрована мінливість для цього рівняння коливається в межах 50%. Ця мінливість занадто велика, щоб використовувати її для вибору відповідної потужності тракторів [26]. Моделі не співпадають з частинами світу. У кожному окремому випадку модель треба уточнювати.

Ґрунти класифікуються як важкі (дрібнозернисті), середні або легкі (грубозернисті). Важкі за механічним складом ґрунти характеризуються високим вмістом глини, середні – це суглинки, а легкі – піщані ґрунти. Типові значення всіх параметрів наведені разом із очікуваним діапазоном відхилень, що виникають через відмінності в конструкції машин, їх налаштуванні, терміні експлуатації та специфічних умовах поля, включаючи вологість ґрунту та наявність рослинних залишків. Цей діапазон вказує на очікувану варіативність середнього тягового опору залежно від стану машини та ґрунту, які не враховані в основній моделі [21].

В роботі Glancey and Upadhyaya, були представлені кілька рівнянь регресії для прогнозування питомого опору будь-якої ґрунтообробної машини відносно питомого опору машини з еталонним ґрунтообробним інструментом у тому ж ґрунті на заданій глибині або швидкості. В своїй роботі (Glancey, 1990 [23]. розробив методику прогнозування тягового опору для знаряддя, використовуючи вимірювання, отримані за допомогою робочого органу ґрунтообробного агрегату. Дослідженням він довів необхідність визначення кількості точок даних (обсягу вибірки), необхідних для отримання репрезентативного значення тягового опору в певних ґрунтових умовах та стану ґрунту. Glancey використав два специфічні типи інструментів як «еталони» для прогнозування тягового опору складніших машин (плугів, чизелів, культиваторів):

– конусний інструмент (Cone-type reference tool): Спеціальний робочий орган, поперечний переріз якого нагадував конусний пенетрометр. Його основна функція – вимірювати динамічний опір ґрунту безпосередньо під час руху;

– стандартний лістер (Lister/Middlebuster): робочий орган для нарізання борозни.

Ці інструменти були оснащені тензометричним обладнанням для фіксації сил у режимі реального часу [23]. Водночас, щоб спрогнозувати питомий опір інших ґрунтообробних машин, потрібна велика кількість експериментів для роботи еталонної ґрунтообробної машини у бажаних ґрунтових умовах.

Водночас на ефективність роботи машинних агрегатів у польових умовах впливають обмежувальні фактори, до яких відносяться робоча швидкість машинного агрегату, буксування, глибина обробітку, наявність рослинних рештків.

Одним з показників, який характеризує ефективність комплектування машинного агрегату, є буксування рушіїв. Буксування – вкрай негативне явище, яке відбувається за рахунок часткового руйнування верхнього шару ґрунту та зсуву опорної поверхні під впливом тягового зусилля. Буксування є одним з ключових факторів, що впливає на енергоефективність та реальну швидкість V_p у розрахунках тягового опору. В таблиці 1 наведені значення показника буксування для ефективної роботи та збереження структури ґрунту [20, 24].

Таблиця 1 – Показника буксування для ефективної роботи та збереження структури ґрунту

Тип трактора	Оптимальне буксування	Максимально допустиме
Гусеничні трактори	3-5%	до 7%
Колісні (4WD)	8-12%	до 15%
Колісні (2WD)	10-15%	до 18%

Джерело: розроблено на підставі [20, 24]

Якщо буксування нижче норми – трактор перевантажений баластом; якщо вище – втрачається паливо та знищується родючий шар ґрунту.

Першопричиною виникнення явища буксування – є фізичний склад ґрунту та його питомий опір [25]. Як ми бачили у статті Roul et al. [25] та стандартах ASAE [7], буксування S не виникає саме по собі – воно є функцією від тягового зусилля D , яке безпосередньо залежить від питомого опору. Якщо питомий опір ґрунту зростає (через вологість чи щільність ґрунту) – це автоматично веде до зростання буксування, поки не буде досягнуто межі зчеплення.

Аналіз публікацій вказує, що фахівці усього світу займаються питаннями обґрунтування питомого опору агромашин. Це напряду впливає на ефективність комплектування машинних агрегатів: забезпечення якості та строків виконання механізованих технологічних операцій; витрати паливо-мастильних матеріалів; забезпечення безвідмовної роботи; прогнозування техніко-економічних показників використання техніки. Розроблюються математичні моделі прогнозування твердості ґрунту, активних систем для визначення його питомого опору та автоматичного корегування глибини або робочої швидкості машинних агрегатів. Водночас слід зауважити, що умови в кожному регіоні різні, відповідно, показники також. Тому емпіричні коефіцієнти часто мають високий ступінь похибки.

Постановка завдання. Завданням даного дослідження є обґрунтування залежності питомого опору агромашин від питомого опору ґрунту, типу робочих органів, їх форми, глибини обробітку та робочої швидкості.

Виклад основного матеріалу. Питомий опір агромашини залежить від загального опору машини і її ширини захвату. У свою чергу загальний опір машини складається із робочого опору (опору виконання технологічного процесу) та опору перекочування машини.

$$R = R_p + R_f, \text{ кН}, \quad (2)$$

де R – загальний опір машини, кН; R_p – робочий опір (опір виконання технологічного процесу), кН; R_f – опір перекочування машини, кН.

Робочий опір машини залежить від питомого опору ґрунту, його вологості, наявності рослинних решток на поверхні ґрунту, форми робочих органів, глибини обробітку, робочої швидкості машинного агрегату:

$$R_p = k_0^a \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)), \kappa H, \quad (3)$$

де k_0^a – питомий опір ґрунту на глибині обробітку, $\kappa H/m^2$; b_p – ширина захвату одного робочого органу, м; n – кількість робочих органів; a – глибина обробітку, м; c – коефіцієнт, який враховує форму робочого органу; λ – коефіцієнт, який враховує матеріал робочого органу; z – коефіцієнт, який враховує наявність рослинних решток; t – темп приросту опору від швидкості; V_p – робоча швидкість машинного агрегату, км/год; V_0 – швидкість машинного агрегату при номінальному значенні питомого опору ґрунту, км/год.

Темп приросту опору машин в основному залежить від ширини захвату машини і глибини обробітку ґрунту:

$$t = f(B_m, a), \quad (4)$$

де B_m – робоча ширина захвату машини, м.

Опір перекочування агромашини обумовлюється його масою та коефіцієнтом опору перекочування:

$$R_f = G_m \cdot g \cdot f, \kappa H, \quad (5)$$

де G_m – маса машини, т; g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ; f – коефіцієнт опору. Підставив значення R_p і R_f у формулу (2) отримаємо загальний опір машини у розвернутому вигляді:

$$R_p = k_0^a \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)) + G_m \cdot g \cdot f, \kappa H. \quad (6)$$

Тоді питомий опір машини у залежності від робочої ширини захвату буде становити:

$$k_m = \frac{k_0^a \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)) + G_m \cdot g \cdot f}{B_m}, \kappa H/m, \quad (7)$$

де k_m – питомий опір машини, $\kappa H/m$.

З метою визначення значення коефіцієнта, який враховує форму робочого органу, тобто форму поперечного перерізу борозенки, яка утворюється після проходження робочого органу, необхідно знати глибину обробітку і його ширину захвату, а також площу цієї борозенки. Тоді відношення площі поперечного перерізу борозенки до площі добутку глибини обробітку на ширину захвату у найширшому місці буде значенням даного коефіцієнта (рис. 1):

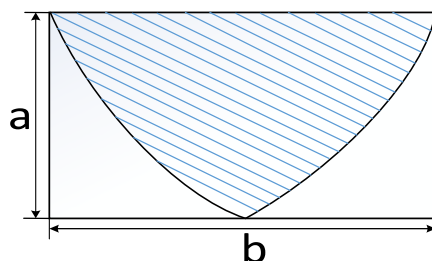


Рисунок 1 – Площа перерізу «борозенки», яку утворює робочий орган агромашини

Джерело: розроблено автором

$$c = \frac{S_p}{S_k} \leq 1 \quad (8)$$

Площа прямокутника поперечного перерізу ґрунту у якому буде працювати робочий орган відповідного профілю для якого визначено питомий опір ґрунту становить:

$$S_k = a \cdot b, \text{ м}^2, \quad (9)$$

де S_k – площа перерізу для якого визначено питомий опір ґрунту, м^2 ; a – глибину обробітку, м; b – ширину захвату робочого органу, м.

Площа перерізу «борозенки», яку утворює один робочий орган агромашини залежить від форми робочого органу:

$$S_p = a \cdot b \cdot c, \text{ м}^2, \quad (10)$$

де S_p – площа опору робочого органу машини, м^2 ; c – коефіцієнт, який враховує (уточнює) поперечну площу обробітку робочим органом машини.

Площу поперечного перерізу борозенки, яку утворює, наприклад, дисковий робочий орган, можна розрахувати шляхом знаходження площі, обмеженої у даному випадку параболою $y = 0,31x^2$ і прямою $y = 10$ (рис. 2) при глибині обробітку 10 см і ширині захвату диска на поверхні ґрунту 11,2 см.

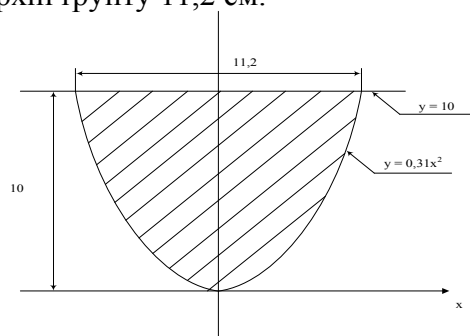


Рисунок 2 – Поперечний переріз площі борозенки, яку утворює диск борони Lemken Rubin 10 при глибині обробітку 10 см. і відповідному куті атаки.

Джерело: розроблено автором

Значення площ для заданих умов становлять:

$$S_k = 11,2 \cdot 10 = 112, \text{ см}^2, \quad (11)$$

$$S_p = \int_{x_1}^{x_2} (10 - (0,31x^2)) dx, \quad (12)$$

Після інтегрування, отримаємо:

$$S_p = 75,3. \quad (13)$$

Тоді, коефіцієнт c має значення:

$$c = \frac{112}{75,3} = 0,67. \quad (14)$$

Коефіцієнт, який враховує матеріал з якого виготовлений робочий орган машини залежить від коефіцієнта тертя ґрунту по сталі k_c і коефіцієнта тертя ґрунту по відповідному матеріалі k_m :

$$\lambda = \frac{k_m}{k_c}. \quad (15)$$

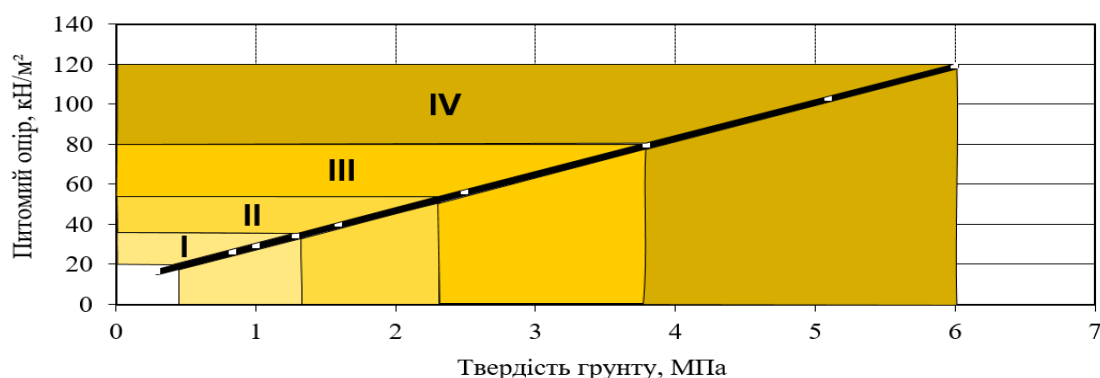
Коефіцієнт, який враховує темп приросту опору зі збільшенням швидкості для дискової борони за результатами досліджень можна описати наступним виразом:

$$t = 0,02 \cdot a + (0,0004 \cdot B_6 - 0,0004), \quad (16)$$

де B_6 – робоча ширина захвату борони, м.

Визначити питомий опір ґрунту кожного поля (тим більше пошарово) шляхом застосування орного машинного агрегату надзвичайно затратно. Проф. Зубко В. запропонував визначати питомий опір ґрунту через його твердість. Співвідношення твердості ґрунту з його питомим опором наведено у роботі [1].

Залежність значення між твердістю ґрунту та його питомим опором представлена на рисунку 3.



I – легкі ґрунти; II – середні ґрунти; III – важкі ґрунти; IV – дуже важкі ґрунти.

Рисунок 3 – Залежність між твердістю ґрунту та його питомим опором

Джерело: розроблено на підставі [1]

Залежність між твердістю ґрунту та його питомим опором описується формулою прямої:

$$k_0^a = 18 \cdot T + 11, \text{ кН/м}^2, \quad (17)$$

де k_0^a – питомий опір ґрунту на глибині обробітку, кН/м^2 ;

T – твердість ґрунту, МПа.

Таким чином питомий опір ґрунту замінено його твердістю. Підставивши у вираз (7) значення питомого опору ґрунту на глибині обробітку, отримуємо:

$$k_m = \frac{(18 \cdot T + 11) \cdot b_p \cdot n \cdot a \cdot c \cdot \lambda \cdot z \cdot (1 + t(V_p^2 - V_0^2)) + G_m \cdot g \cdot f}{V_m}, \text{ кН/м}. \quad (18)$$

Польові дослідження ґрунту проводилися на базі Інституту сільського господарства Північного Сходу НААН, оскільки ґрунт дослідних ділянок є репрезентативним і максимально точно відображає середньорегіональні показники. Під час проведення експерименту використовували пенетрометр "ЛАН-М"; вологу ґрунту вимірювали, використовуючи термостатно-ваговий (прямий) метод; щільність ґрунту проводили, використовуючи метод ріжучого кільця.

Твердість ґрунту та його питомий опір

На основі проведених досліджень в таблиці 2 представлена характеристики агрофону на одному з полів.

Таблиця 2 – Характеристики агрофону

Шари ґрунту	Вологість, %	Щільність, г/см^3	Твердість, МПа	Питомий опір ґрунту, кН/м^2
0-10 см	23±1,20	1,06±0,02	1,38±0,05	35,84
10-20 см	21±1,40	1,14±0,02	1,51±0,05	38,18
20-30 см	14±1,70	1,26±0,03	2,41±0,05	54,38

Джерело: розроблено автором

Статистичний аналіз експериментальних даних підтверджує їх високу достовірність. Коефіцієнт варіації основних фізико-механічних показників ґрунту не перевищує 7,0%, що вказує на достатню кількість повторень та високу точність вимірювальних приладів.

Крім 3-х шарової твердості ґрунт має шар на поверхні з залишками рослинних рештків, у зв'язку з тим, що деякі машини своїми робочими органами працюють на поверхні ґрунту, треба враховувати і цей поверхневий опір ґрунту.

На основі отриманих даних будуюмо графік залежності твердості ґрунту та питомого опору ґрунту від глибини (рис. 4 та рис. 5).

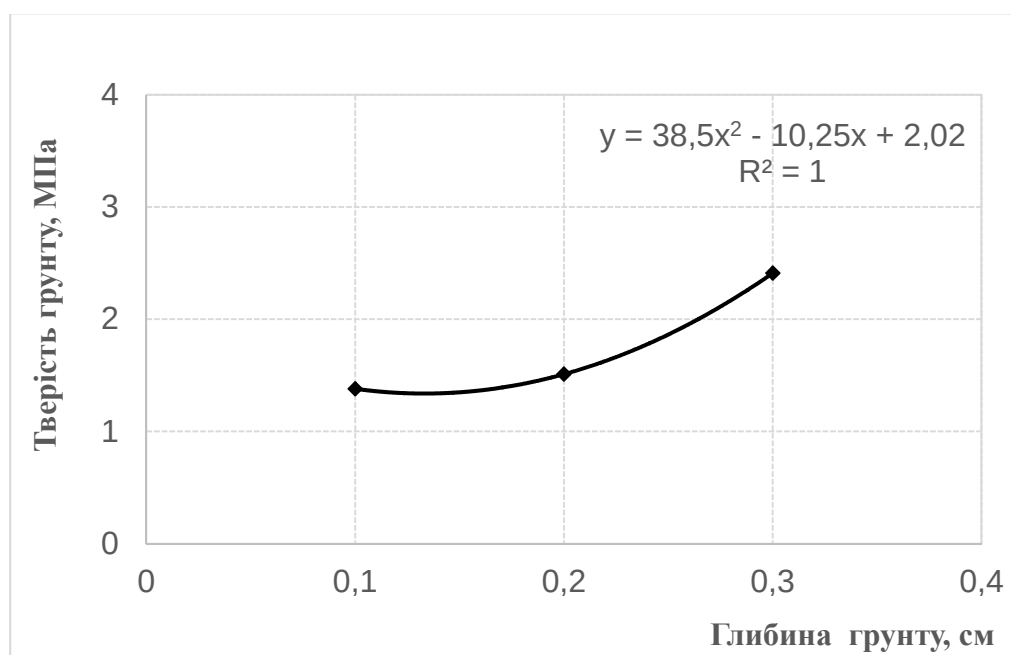


Рисунок 4 – Залежності твердості ґрунту від глибини

Джерело: розроблено автором

Аналізом рисунку 4 встановлено, що зі збільшенням глибини обробітку зростає і твердість ґрунту. Так при зміні глибини обробітку з 10 до 20 см твердість зросла на 9,4%. Водночас при збільшенні глибини з 20 до 30 см твердість зросла на 59,6%. Це пояснюється наявністю у верхніх шарах ґрунту більшої кількості рослинних рештків та інтенсивнішою роботою біоти.

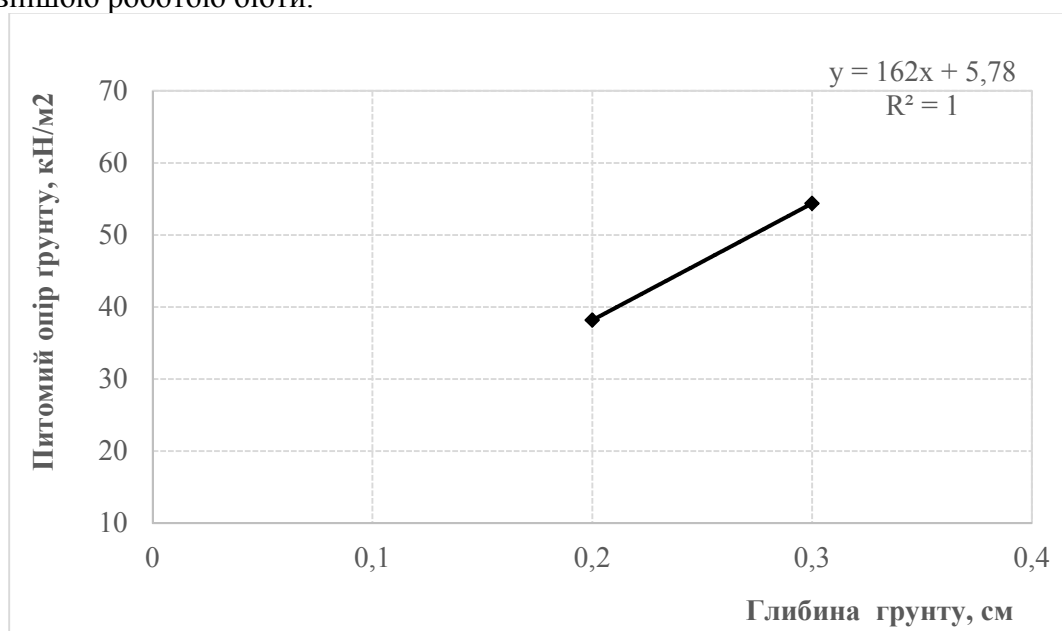


Рисунок 5 – Залежності питомого опору ґрунту від глибини

Джерело: розроблено автором

Аналізом рисунка 5 встановлено, що зі збільшенням глибини обробітку зростає і питомий опір ґрунту. Так при зміні глибини обробітку з 10 до 20 см питомий опір

грунту підвищується на 6,5%. Водночас при збільшенні глибини з 20 до 30 см питомий опір підвищується на 42,4%.

Отримані результати досліджень слід використовувати при використанні методики дослідження комплектування машинних агрегатів та ефективності їх роботи при різній та змінній глибині обробітку.

У зв'язку з тим, що робочі органи машин працюють на будь-якій глибини за цим рисунком можна визначити твердість ґрунту для любого робочого ґрунту. Маючи ці дані за рівнянням $38.5x^2 - 10.25x + 2.02$ визначаємо питомий опір ґрунту. Таким чином ми визначили питомий опір ґрунту залежно від його твердості і залежності від його глибини обробітку.

Результати проведених досліджень закладено в загальну модель визначення експлуатаційних параметрів роботи машинних агрегатів на різних механізованих технологічних операціях, машин з різними робочими органами і за умови забезпечення якості виконання операції.

З метою практичної реалізації запропонованої методики розроблено алгоритм і створено програму в Microsoft Excel 2016. Робоче вікно представлено на рисунку 6.

Машинний агрегат

Трактор	G, кг	Nn, кВт	q, г/кВт*год													
Claas930 Axion	16000	221	200													
Дискова борона	G, кг	B, м	b, м	Δk	ΔV	n	c									
Lemken Rubin	3500	5,5	0,112	0,95	0,0038	48	0,67									
Умови роботи	k, кН/кв. м	a, м	f	μ	i, град	T, МПа	τ									
	83	0,1	0,06	0,77	0	4	0,8									
Результат обчислення	V, км/год	Rf, кН	Ri, кН	Rp, кН	Rarp, кН	Pf, кН	Pi, кН	Fmax, кН	Рд, кН	Рруш, кН	ρ	δ, %	Vp, км/год	Ne, кН	Gmin, кг	
Робота	5	2,17	0,00	28,40	30,57	2,17	0,00	122,46	159,12	122,46	0,25	3,12	4,84	45,47	6114,23	
Робота	6	2,24	0,00	29,59	31,83	2,10	0,00	118,39	132,60	118,39	0,27	3,21	5,81	56,55	6365,98	
Робота	7	2,31	0,00	30,99	33,30	2,03	0,00	114,31	113,66	113,66	0,29	3,32	6,77	68,70	6660,91	
Робота	8	2,38	0,00	32,61	35,00	1,95	0,00	110,23	99,45	99,45	0,32	3,48	7,72	82,11	6999,00	
Робота	9	2,46	0,00	34,44	36,90	1,88	0,00	106,15	88,40	88,40	0,35	3,69	8,67	96,96	7380,27	
Робота	10	2,53	0,00	36,50	39,02	1,81	0,00	102,07	79,56	79,56	0,38	4,00	9,60	113,42	7804,70	
Робота	11	2,60	0,00	38,76	41,36	1,74	0,00	98,00	72,33	72,33	0,42	4,45	10,51	131,69	8272,31	
Робота	12	2,67	0,00	41,24	43,92	1,66	0,00	93,92	66,30	66,30	0,47	5,13	11,38	151,93	8783,08	
Робота	13	2,74	0,00	43,94	46,69	1,59	0,00	89,84	61,20	61,20	0,52	6,20	12,19	174,33	9337,03	
Робота	14	2,81	0,00	46,86	49,67	1,52	0,00	85,76	56,83	56,83	0,58	7,99	12,88	199,07	9934,14	
Перев.	15	2,89	0,00	49,99	52,87	1,45	0,00	81,68	53,04	53,04	0,65	11,10	13,33	226,33	10574,42	
Перев.	16	2,96	0,00	53,33	56,29	1,38	0,00	77,61	49,73	49,73	0,73	16,90	13,30	256,29	11257,87	
Перев.	17	3,03	0,00	56,89	59,92	1,30	0,00	73,53	46,80	46,80	0,81	28,51	12,15	289,12	11984,50	

Рисунок 6 – Загальний вигляд вікна для розрахунку

Джерело: розроблено автором

Питомий опір машин та його залежність від твердості ґрунту та робочої швидкості.

Для визначення питомого опору машин і його залежності від деяких факторів проведемо розрахунок на прикладі машинного агрегату у складі трактора Claas Axion 930 і дискової борони Lemken Rubin 10.

За результатами моделювання отримано дані залежності питомого опору машини у залежності від твердості ґрунту і робочої швидкості (рис. 7).

Встановлено, що для твердості ґрунту 0,75 МПа при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – питомий опір зріс на 12,8 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – питомий опір збільшився на 20,9 %.

При твердості ґрунту 3 МПа при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – питомий опір збільшився на 14,3 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – питомий опір зріс на 24,9 %.

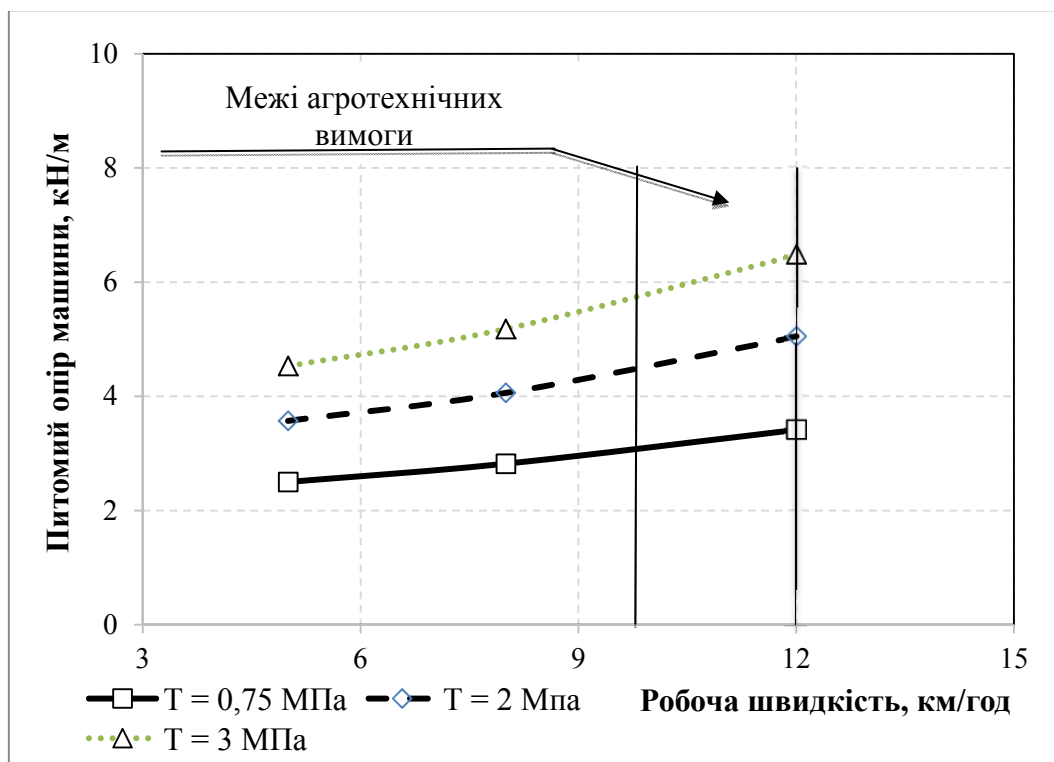


Рисунок 7– Залежність питомого опору машини від швидкості при змінній твердості ґрунту
Джерело: розроблено автором

Таким чином зі збільшенням твердості ґрунту при збільшенні швидкості інтенсивність зростання питомого опору ґрунту зростає.

За результатами моделювання отримано дані залежності буксування у залежності від робочої швидкості для змінної твердості ґрунту (рис. 8).

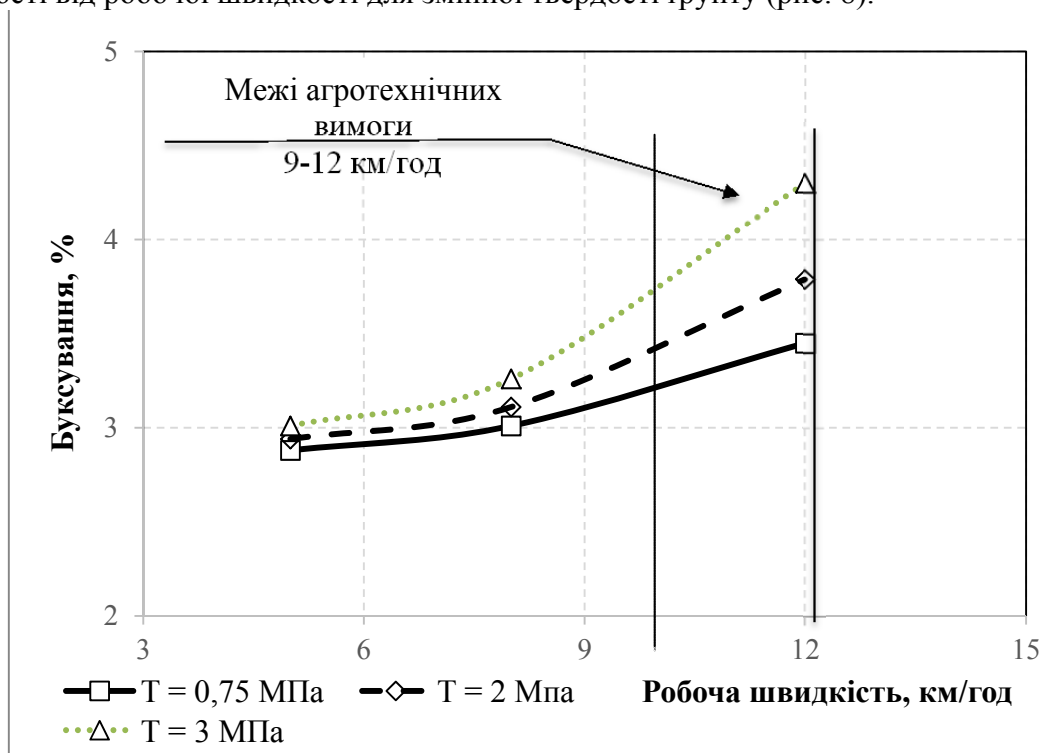


Рисунок 8 – Залежність буксування від швидкості при змінній твердості ґрунту
Джерело: розроблено автором

Аналізуючи графік залежності буксування від швидкості при твердості ґрунту 0,75 МПа встановлено, що при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – буксування зростає на 4,5 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – буксування збільшилось на 14,6 %.

При твердості ґрунту 3 МПа при зміні інтенсивності швидкості від 5 до 8 км/год – буксування збільшилось на 8,3 %, при зміні швидкості від 8 до 12 км/год – буксування зросло на 31,9 %.

Таким чином зі збільшенням твердості ґрунту при зростанні швидкості інтенсивність зростання буксування ґрунту зростає.

За результатами розрахунків отримана залежність загального опору машини від робочої швидкості (рис. 9).

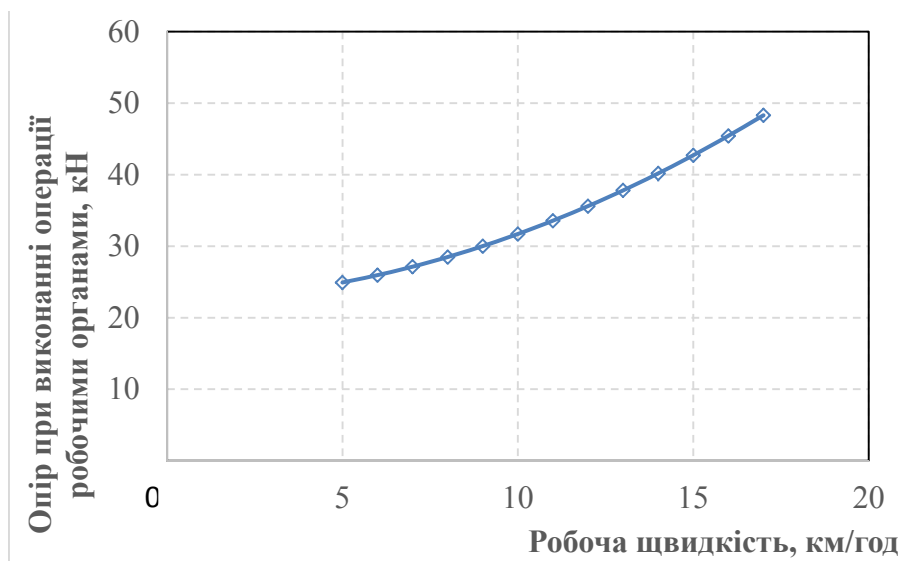


Рисунок 9 – Залежність загального опору від робочої швидкості

Джерело: розроблено автором

Аналіз залежності загального опору машини від робочої швидкості показує, що зі збільшенням швидкості опір зростає. Дану залежність можна описати наступним рівнянням:

$$R_p = 0.08V_p^2 + 0.09 V_p + 22.37. \quad (19)$$

На рис. 10 представлено залежність буксування рушіїв енергетичного засобу від робочої швидкості.

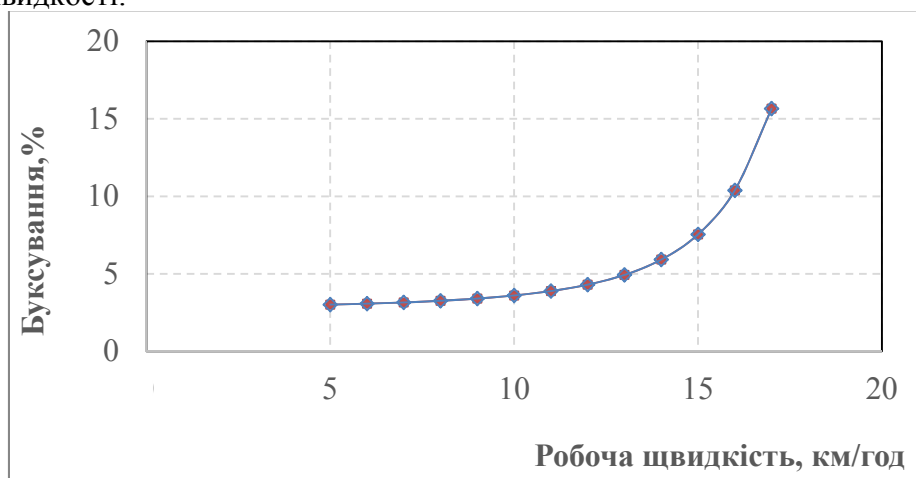


Рисунок 10 – Залежність буксування рушіїв від робочої швидкості

Джерело: розроблено автором

Аналіз залежності робочої швидкості та буксування показує, що зі збільшенням швидкості буксування зростає. Дану залежність можна описати наступним рівнянням:

$$\delta = 0.02 V_p^3 - 0.60 V_p^2 + 5.23 V_p - 11.31. \quad (20)$$

За основу для розрахунку нами взятий трактор Claas Axion 930 та дискова борона Lemken Rubin 10. Основні параметри трактора наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Основні параметри трактора Claas Axion 930

Потужність двигуна	265 кВт	Серія моделі	Axion
Задні шини	710/75R42	Передні шини	600/70 R34
Довжина транспорту	5.744 м	Транспортна висота	2.427 м
Швидкість подорожі	50 км/год	Тип передачі	stfi
Вага	13.5 т	Пристрій управління	-/4ew/dw
Рульове управління	h	Три-бальна категорія	3
Виробник двигуна	FPT	Тип двигуна Cursor	9
Робочий об'єм	8.71 л	Кількість циліндрів	6

Джерело: розроблено на підставі [26]

Основні параметри дискової борони викладено в таблиці 4:

Таблиця 4 – Основні параметри дискової борони Lemken Rubin 10

Rubin 10	TF/600
Кількість дисків	48
Діаметр диска, см	64,5
Відстань між дисками, см	12,5
Робоча ширина, см	600
Вага без котка, кг	5190
Необхідна потужність, кВт	175-300

Джерело: розроблено на підставі [27]

Висновки.

1. В статті викладено новий метод визначення робочого опору машини, який є альтернативою методу польового динамометрування. Метод включає кілька оновлень, підвищуючи точність отримання теоретичних досліджень, є основою обґрунтування ефективності комплектування машинних агрегатів для виконання робіт у рослинництві.

Метод базується на використанні показника питомого опору ґрунту на глибині обробітку k_0^a , що дозволяє враховувати умови, в яких працює машина, а не усереднені показники питомого опору, отримані емпіричним шляхом з використання плуга. Проведеними польовими дослідженнями встановлено залежність між твердістю та питомим опором ґрунту в різних шарах ґрунту. Тим самим маючи значення показника твердості ґрунту можна визначити питомий опір ґрунту та глибину обробітку.

2. У новій методиці запропоновано коефіцієнт, який враховує форму робочого органу, тобто форму поперечного перерізу борозенки, яка утворюється після проходження робочого органу. Так, наприклад, для кута атаки диска борони Lemken Rubin 10 10° $c = 0,67$.

Даний коефіцієнт показує, яка частина ґрунту створює опір машини з урахуванням форми робочого органу та глибини обробітку. Отриманий результат показує реальний опір робочих органів машини, тим самим визначається значення опору на всю робочу ширину машини з урахуванням реальних виробничих умов.

3. При обґрунтуванні робочого опору машини запроваджено коефіцієнт z , який враховує наявність рослинних решток. Саме наявність рослинних рештків має вплив на

робочий опір машини та якість виконання технологічного процесу, особливо на малих глибинах обробітку.

4. На підставі отриманих результатів розроблено алгоритм і створено програму в Microsoft Excel 2016 обґрунтування: робочої швидкості, опору агрегату, сили зчеплення по масі, сили зчеплення по потужності, буксування і продуктивності роботи машинного агрегату.

Список літератури

1. Зубко В. М. Концепція забезпечення якості механізованих агротехнологій : дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Київ, 2021, 393 с..
2. За механізацію сільського господарства : зб. матеріалів Наркомзему УРСР та УНДІМ. Київ : Держ. вид-во колгосп. і радгосп. літ-ри УРСР, 1937, 112 с. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/%D0%97%D0%B0_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8E_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0.1937.pdf.
3. Забродоцька Л. Ю. Основи агрономії : навч. посіб. Луцьк : ЛНТУ, 2021, 200 с. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%20%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%97.pdf>.
4. Качинський М. А. Фізика ґрунту : у 2 ч. К. : Мрія, 1996. URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/FIZYKA-GRUNTIV-laboratornyy-praktykum.pdf>
https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya_11_fizichni_vlastivosti_gruntiv.pdf
5. Al-Janobi A. A., Al-Suhaibani S. A. Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. Applied Engineering in Agriculture. 1998. Vol. 14, no. 4. P. 343–348..
6. Sahu R. K., Raheman H. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. Biosystems Engineering. 2006. Vol. 94, no. 2. P. 275–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.015>.
7. ASAE Standard (2003). ASAE D497.4. Agricultural Machinery Management Data. ASAE, St. Joseph, MI, USA
8. Grisso R. D., Yasin M., Kocher M. F. Tillage implement forces operating in silty clay loam. Transactions of the ASAE. 1996. Vol. 39, no. 6. P. 1977–1982.
9. Glancey J L; Upadhyaya S K; Chancellor W J; Rumsey J W. An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. Soil and Tillage Research, 14, 1989, 1–24.
10. Gupta P D; Gupta C P; Pandey K P. An analytical model for predicting draught forces on convex-type cutting blades. Soil and Tillage Research, 14, 1989. P. 131–144.
11. Swick W. C., Perumpral J. V. A model for predicting soil-tool interaction . *Journal of Terramechanics*. 1988. Vol. 25. P. 43–56
12. McKyes E. Soil cutting and tillage. Amsterdam ; New York : Elsevier, 1985. 218 p.
13. Godwin R. J., Spoor G., Soomro M. S. The effect of tine arrangement on soil forces and disturbances . *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1984. Vol. 30. P. 47–56.
14. Godwin R. J., Spoor G. Soil failure with narrow tines . *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1977. Vol. 22. P. 213–228.
15. Luth H. J., Wismer R. D. Performance of plane soil cutting blades in sand // Transactions of the ASAE. 1971. Vol. 14, No. 2. P. 255–259, 262.
16. Siemens J. C., Weber J. A., Thornburn T. H. Mechanics of soil as influenced by model tillage tools // Transactions of the ASAE. 1965. Vol. 8, No. 1. P. 1–7
17. Rowe R. J., Barnes K. K. Influence of speed on elements of draft of a tillage tool // Transactions of the ASAE. 1961. Vol. 4, No. 1. P. 55–57.
18. Glancey J. L., Upadhyaya S. K. An improved technique for agricultural implement draught analysis // Soil and Tillage Research. 1995. Vol. 35. P. 175–182.
19. Wheeler P. N., Godwin R. J. Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h // Journal of Agricultural Engineering Research. 1996. Vol. 63, No. 3. P. 243–250
20. Bulgakov, V.; Aboltins, A.; Beloev, H.; Nadykto, V.; Kyurchev, V.; Adamchuk, V.; Kaminskiy, V. Maximum Admissible Slip of Tractor Wheels without Disturbing the Soil Structure. Appl. Sci. 2021, 11, 6893. doi.org/10.3390/app11156893
21. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Agricultural Machinery Management Data. Standard ASAE D497.7 MAR2011. St. Joseph, MI: ASABE; 2011
22. Glancey J. L. Prediction of tillage implement draft with a reference tillage tool : Unpublished Ph.D. Thesis.

- Davis : University of California, Agricultural Engineering Department, 1990.
23. A. J. Pradoa; F. A. Auat Cheein; S. Blazicb; M. Torres-Torriti. Probabilistic self-tuning approaches for enhancing performance of autonomous vehicles in changing terrains. *Journal of Terramechanics* 78, 2018 39-51. doi.org/10.1016/j.jterra.2018.04.001
 24. Оптимізація комплексів машин і структури машинного парку та планування технічного сервісу : навчальний посібник / І. І. Мельник, В. Д. Гречкосій, В. В. Марченко та ін.]. К. : ВБІЦ НАУ, 2004. 151с.
 25. .K. Roul; H. Raheman; M.S. Pansare; R. Machavaram. Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. *Biosystems Engineering* 104 (2009) 476-485. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.09.004
 26. Claas Axion 950-920. URL: <https://ats.in.ua/products/claas-axion-950-920/93> (дата звернення: 28.02.2026).
 27. Борона дискова коротка Rubin 10 . ЛЕМКЕН Україна. URL: http://lemken.com.ua/ua/harrow_rubin_10 (дата звернення: 28.02.2026).

References

1. Zubko, V. M. (2021). *Kontseptsiiia zabezpechennia yakosti mekhanizovanykh ahrotekhnologii* [Concept of quality assurance of mechanized agricultural technologies] [Doctoral dissertation, Kyiv]. [in Ukrainian]
2. Za mekhanizatsiiu silskoho hospodarstva: zb. materialiv Narkomzemu URSR ta UNDIM. (1937). Derzh. vyd-vo kolhosp. i radhosp. lit-ry URSR. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/%D0%97%D0%B0_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8E_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0._1937.pdf [in Ukrainian]
3. Zabrodotska, L. Yu. (2021). *Osnovy ahronomii* [Fundamentals of Agronomy] [Navchalnyi posibnyk]. Luts'k: LNTU. <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%20%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%97.pdf> [in Ukrainian]
4. Kachynskyi, M. A. (1970). *Fizyka gruntiv* [Soil physics]: u 2 ch. Mria. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/FIZYKA-GRUNTIV-laboratory-praktykum.pdf> https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya_11_fizichni_vlastivosti_gruntiv.pdf [in Ukrainian]
5. Al-Janobi, A. A., & Al-Suhaibani, S. A. (1998). Draft of primary tillage implements in sandy loam soil. *Applied Engineering in Agriculture*, 14(4), 343–348.
6. Sahu, R. K., & Raheman, H. (2006). Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosystems Engineering*, 94(2), 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.015>
7. American Society of Agricultural Engineers. (2003). *ASAE D497.4: Agricultural machinery management data*. ASAE.
8. Grisso, R. D., Yasin, M., & Kocher, M. F. (1996). Tillage implement forces operating in silty clay loam. *Transactions of the ASAE*, 39(6), 1977–1982.
9. Glancey, J. L., Upadhyaya, S. K., Chancellor, W. J., & Rumsey, J. W. (1989). An instrumented chisel for the study of soil-tillage dynamics. *Soil and Tillage Research*, 14(1), 1–24. Swick, W. C., & Perumpral, J. V. (1988). A model for predicting soil tool interaction. *Journal of Terramechanics*, 25(1), 43–56.
10. Gupta, P. D., Gupta, C. P., & Pandey, K. P. (1989). An analytical model for predicting draught forces on convex-type cutting blades. *Soil and Tillage Research*, 14(2), 131–144.
11. Swick, W. C., & Perumpral, J. V. (1988). A model for predicting soil tool interaction. *Journal of Terramechanics*, 25(1), 43–56.
12. McKyes, E. (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier.
13. Godwin, R. J., Spoor, G., & Soomro, M. S. (1984). The effect of tine arrangement on soil forces and disturbances. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30(1), 47–56. Glancey, J. L., & Upadhyaya, S. K. (1995). An improved technique for agricultural implement draught analysis. *Soil and Tillage Research*, 35(3), 175–182.
14. Godwin, R. J., & Spoor, G. (1977). Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(4), 213–228.
15. Luth, H. J., & Wismer, R. D. (1971). Performance of plane soil cutting blades in sand. *Transactions of the ASAE*, 14(2), 255–259, 262. Glancey, J. L. (1990). *Prediction of tillage implement draft with a reference tillage tool* [Unpublished doctoral dissertation]. Agricultural Engineering Department, University of California, Davis.

16. Siemens, J. C., Weber, J. A., & Thornburn, T. H. (1965). Mechanics of soil as influenced by model tillage tools. *Transactions of the ASAE*, 8(1), 1–7.
17. Rowe, R. J., & Barnes, K. K. (1961). Influence of speed on elements of draft of a tillage tool. *Transactions of the ASAE*, 4(1), 55–57.
18. Glancey, J. L., & Upadhyaya, S. K. (1995). An improved technique for agricultural implement draught analysis. *Soil and Tillage Research*, 35(3), 175–182.
19. Wheeler, P. N., & Godwin, R. J. (1996). Soil dynamics of single and multiple tines at speeds up to 20 km/h. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(3), 243–250.
20. Bulgakov, V., Aboltins, A., Beloev, H., Nadykto, V., Kyurchev, V., Adamchuk, V., & Kaminskiy, V. (2021). Maximum admissible slip of tractor wheels without disturbing the soil structure. *Applied Sciences*, 11(15), 6893. <https://doi.org/10.3390/app11156893>
21. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2011). *Agricultural machinery management data* (Standard ASABE D497.7 MAR2011). ASABE.
22. Glancey, J. L. (1990). *Prediction of tillage implement draft with a reference tillage tool* [Unpublished doctoral dissertation]. Agricultural Engineering Department, University of California, Davis.
23. Prado, A. J., Auat Cheein, F. A., Blazic, S., & Torres-Torriti, M. (2018). Probabilistic self-tuning approaches for enhancing performance of autonomous vehicles in changing terrains. *Journal of Terramechanics*, 78, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.04.001>
24. Melnyk, I. I., Hrechkosii, V. D., Marchenko, V. V., ta in. (2004). *Optymizatsiia kompleksiv mashyn i struktury mashynnoho parku ta planuvannia tekhnichnoho servisu* [Optimization of machine complexes and machine park structure and technical service planning] [Navchalnyi posibnyk]. VVTs NAU. [in Ukrainian]
25. Roul, K., Raheman, H., Pansare, M. S., & Machavaram, R. (2009). Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network. *Biosystems Engineering*, 104(4), 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.004>
26. Claas Axion 950-920. (n.d.). ATS. <https://ats.in.ua/products/claas-axion-950-920/93>.
27. LEMKEN Ukraine. (n.d.). Rubin 10 disc harrow. https://lemken.com.ua/ua/harrow_rubin_10.

Vladyslav Zubko, Prof., Dr. Tech. Sci., **Olena Teslenko**

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Dependence of Agricultural Machinery Specific Resistance on Soil Hardness

The purpose of this study is to enhance the efficiency of machine unit assembly by developing a unified method for substantiating the specific resistance of machines equipped with various working tools, based on soil hardness values. The article investigates the dependence of the specific resistance of agricultural machinery on key factors: soil hardness, working tool shape and material, tillage depth, presence of crop residues, and operating speed.

Traditional field dynamometry is analyzed, highlighting its drawbacks (high labor intensity, requirement for specialized equipment, substantial time and financial costs). A novel approach is proposed for substantiating the specific resistance of agricultural machines with diverse working tools. This method substitutes the specific soil resistance during plowing with its hardness index (measured using a penetrometer), incorporating correction coefficients for working tool shape (c), working surface material (λ), presence of crop residues (z), and the nonlinear effect of travel speed.

Field experiments conducted on typical soils of the Sumy region (Institute of Agriculture of the North-East of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine) established a layered dependence of soil hardness and specific resistance on depth (0–30 cm) with high reliability. Based on the obtained data, a mathematical model of the total and specific resistance of the machine was developed, accounting for both static and dynamic (inertial) components.

Using the example of the Claas Axion 930 tractor aggregated with the Lemken Rubin 10 disc harrow, the pattern of increasing resistance and slippage with rising speed (5–12 km/h) and soil hardness (0.75–3.0 MPa) is demonstrated. It is shown that at higher soil hardness levels, the rate of increase in resistance and slippage with speed rises substantially.

For practical implementation, a program was created in Microsoft Excel 2016 to facilitate laboratory analyses. The proposed approach enables a significant reduction in costs for full-scale experiments, improves the accuracy of predicting traction characteristics, and optimizes the selection of tractors and implements under varying agrotechnical conditions.

soil hardness, soil resistivity, working speed, slippage, crop residues, working width, machine resistivity, working parts of agricultural machinery, productivity

Одержано (Received) 11.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 07.03.2026

М.В. Гаркуша, доц., канд. техн. наук, **О.О. Давиденко**, доц., канд. техн. наук

Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua

Розроблення рекомендацій із застосування бітумно-полімерної стикувальної стрічки в транспортному будівництві

Забезпечення водонепроникності та тріщностійкості в зоні примикання навіть за найвищих навантажень є сучасною вимогою до герметизуючих матеріалів. Сучасні вимоги до ремонту потребує застосування матеріалів, котрі дають змогу виконання ремонтних заходів без погіршення властивостей в умовах безперервного руху транспортних засобів. В роботі розроблено рекомендацій із застосування бітумно-полімерної стикувальної стрічки в транспортному будівництві.

асфальтобетон, бітумно-полімерна стрічка, дефекти, ремонт

Постановка проблеми. Постійно зростаючі навантаження на дорожні покриття вимагають інноваційних та високопродуктивних матеріалів. Довговічність та збереження вартості відіграють вирішальну роль. Забезпечення надійного з'єднання між суміжними полосами можна виконати із застосуванням бітумно-полімерних стикувальних стрічок. Бітумно-полімерні стрічки також ефективно застосовуються в мостових конструкціях, зокрема в зонах примикання різнорідних матеріалів для герметизації швів примикання та компенсації температурно - лінійних переміщень. Прикладами таких зон є примикання асфальтобетонного покриття до елементів деформаційного шва, примикання до бетону в разі використання підливу деформаційного шва, а також ділянки брівки та водовідводних лотків. Одним із слабких місць в асфальтобетонному покритті, де може виникнути передчасне руйнування у вигляді тріщини з подальшим лущенням, є зона стикування під час влаштування асфальтобетонних шарів, кромка яких здатна швидко охолоджуватися. Особливо даний тип руйнування характерний під час виконання часткового ремонту асфальтобетонного покриття. Зона стиків асфальтобетонного покриття має підвищену пористість, а отже і підвищене водонасичення, що негативно відображується за періодичного замороження — відтаювання, що є однією з найголовніших проблем руйнування асфальтобетонного покриття. Дані дефекти притаманні в зоні стиків асфальтобетону — цементобетону, асфальтобетону — бордюрного каменю та асфальтобетону — металу, у вигляді люків, решіток тощо. Додатковою проблемою є руйнування зон деформаційних швів мостів під впливом додаткових динамічних навантажень та накопичених напружень, що виникають внаслідок температурно - лінійних розширень (рис. 1 – фотоматеріали прикладних досліджень власно отримані авторами); ці фактори призводять до прискореного зношення швів, утворення щілин та втрати герметичності. Окремо слід відзначити, що зони примикання бордюрного каменю до бетону мостового полотна та примикання асфальтобетону до бордюрного

каменю на мостах є проблемними ділянками, які потребують додаткової герметизації, оскільки в цих місцях важко забезпечити безшовну гідроізоляцію мостового полотна. Інфільтрація води та агресивних солей у стикові ділянки викликає фізико-хімічну деградацію залізобетону мостового полотна, зниження міцності та утворення тріщин; у зимовий період вплив натрієво-хлоридних реагентів і циклів замороження-відтавання прискорює руйнування бетону і сприяє прискореному просуванню фронту карбонізації до арматури з наступним розвитком її корозії.

Розроблення рекомендацій із застосування бітумно-полімерної стикувальної стрічки в транспортному будівництві є важливим завданням для аналізу та подальшого вибору ефективного застосування матеріалів під час ремонту асфальтобетонного покриття транспортних споруд та автомобільних доріг в цілому.



Рисунок 1 – Дефекти асфальтобетонного покриття в зоні деформаційних швів мостів
Джерело: розроблено автором

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хімік Пауль Шаде в 1927 році, винайшов вазеліновий бандаж, який запатентував у 1927 році, як винахід розроблений для Берлінської газової мережі, проте згодом він революціонізував як пасивний захист від корозії для трубопроводів у всьому світі, та став передумовою винайдення бітумно-полімерної стикувальної стрічки, яку винайшли в 1977 році [1].

У Німеччині в 2016 році було запроваджено ZTV Fug-StB 15 (Додаткові технічні договірні умови та рекомендації щодо швів у зонах руху транспорту) [2], які разом із TL/TP Fug-StB (Технічні умови постачання заповнювачів швів у зонах руху транспорту) [3] регулюють умови обробки, постачання та випробування герметиків швів. Бітумні стрічки для герметизації швів успішно використовуються під час влаштування асфальтобетонних шарів майже 50 років. Особливістю їх застосування є відсутність спеціального обладнання, таке як термоплавкий лоток для герметиків. Бітумно-полімерні стикувальні стрічки для герметизації швів повинні проходити зовнішній контроль тричі на рік. Герметики швів гарячого нанесення N1 та N2 регулюються Європейським стандартом, що також діє в Україні – ДСТУ EN 14188-1 [4], де зовнішній контроль не потрібен.

На сьогоднішній день, існують різноманітні бітумно-полімерні стикувальні стрічки, які як потребують додаткового змащення в'язучою речовиною на основі бітуму, плавкі стрічки для швів повинні бути повністю розплавлені з «холодного» боку, самоклеючі стрічки для швів мають перевагу в тому, що плавлення не потрібне (рис. 2) [1].



Рисунок 2 – Застосування самоклеючих бітумно-полімерних стикувальних стрічок
Джерело: [1, 5]

У Кельні у 2015 році поверхневий шар дороги було відновлено мастиковим асфальтобетоном. Для стиків використовувалася спеціальна стрічка ТОК®, яка у своєму нинішньому вигляді настільки еластична, що може витримувати зміну зазору стику понад 15 % за температурі мінус 20°C. Навіть після 1,5 років та двох сезонів погодних умов стики були в ідеальному стані (рис. 3)[5] та інших об'єктів із застосуванням бітумно-полімерної стикувальної стрічки (рис. 3) [1].



Рисунок 3 – Стан бітумно-полімерних стикувальних стрічок після тривалої експлуатації
Джерело: [1, 5]

Бітумно-полімерні стикувальні стрічки ефективно застосовують під час будівництва автомобільних доріг з гібридним горизонтальним покриттям (крайні ліві смуги з асфальтобетонним покриттям, крайні праві смуги з цементобетонним покриттям). Впровадження цього інноваційного методу будівництва безсумнівно, представляє ефективне рішення для покращення довговічності та стійкості дорожніх покриттів (рис. 4) [6]. Існують різноманітні проектні рішення даних типів покриття (рис. 5) [6].



Автомагістраль А 61, 2017/18 роки (Німеччина)



Автомагістраль Тауерн А10 на перехресті Венген–Понгау, 2021 рік (Австрія)

Рисунок 4 – Гібридні системи покриття із застосуванням бітумно-полімерних стикувальних стрічок
Джерело: [6]

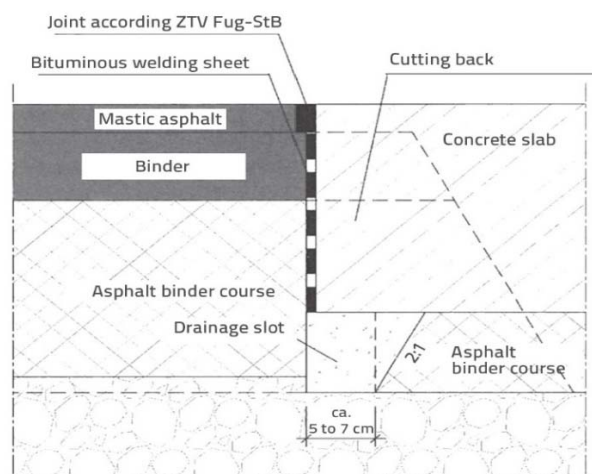


Рисунок 5 – Рішення із застосуванням гібридних систем покриття (мова оригіналу – англійська)
Джерело: [6]

Бітумно-полімерні стикувальні стрічки застосовуються під час влаштування покриття на транспортних спорудах [7, 8]. За сприяння Федерального дорожнього управління (FEDRO) Швейцарії було проведено дослідження на віадукці Лоппер на автомагістралі N2 у Гергісвілі [8]. Дев'ять різних гідроізоляційних з'єднань були встановлені в проміжку 1985 – 1992 років та перевірені через 4 роки. Оцінка вмісту хлоридної солі в бетонному мостовому полотні для 18 різних деталей з'єднання із середнім терміном використання понад 26 років дала дуже позитивні результати, варто відмітити, що дослідження показали ефективність застосування полімерно-бітумних стикувальних стрічок. В Швейцарських документах [7, 8] розроблено технічні рішення щодо застосування бітумно-полімерних стикувальних стрічок на транспортних спорудах, приклад наведено на рис. 6.

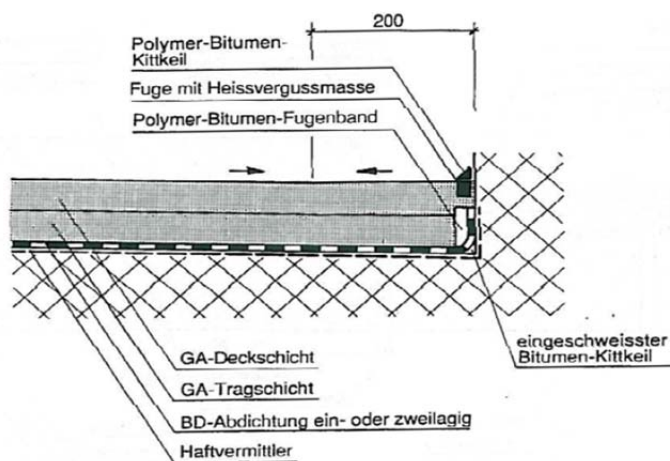


Рисунок 6 – Приклад крайового з'єднання на транспортних спорудах (мова оригіналу – німецька)
Джерело: [8]

На сьогоднішній день, актуальним залишається питання, щодо впровадження в Україні європейських підходів будівництва, ремонту та утримання споруд, адаптації їхніх нормативних документів, а також впровадження стандартів сучасних та ефективних дорожньо-будівельних матеріалів.

Постановка завдання. Таким чином, метою виконання даної роботи є розроблення рекомендацій із застосування бітумно-полімерної стикувальної стрічки в транспортному будівництві з поєднанням українських підходів та найкращих світових.

Науковою новизною отриманих результатів дослідження є встановлення основних технічних вимог до стикувальних стрічок та їх геометричних розмірів з розробкою особливостей їх застосування.

Виклад основного матеріалу. Стикувальні стрічки повинні відповідати вимогам діючих нормативних документів, технічних умов на них з урахуванням вимог ZTV Fug-StB 15 [2], TL Fug-StB 15 [3], ДСТУ EN 14188-1 [4]. Рекомендовані технічні показники стикувальних стрічок наведено у таблиці 1, 2.

Таблиця 1 – Основні технічні вимоги до стикувальних стрічок

Найменування показника	Вимоги	Методи випробування
1 Температура розм'якшення за KiK, °C, не менше ніж	90	ДСТУ EN 1427 [9]
2 Гнучкість на брусі радіусом 20 мм, при температурі 0 °C	На поверхні зразка не повинно бути тріщин	ДСТУ Б В.2.7-83 [10]
3 Пенетрація конусом при 25 °C, мм ⁻¹ не більше	30	ДСТУ EN 13880-2 [12]
4 Щільність, кг/дм ³ , не менше ніж	1,10	ДСТУ EN 13880-1 [13]
5 Адгезія до бетону, МПа, не менше ніж	0,3	згідно нормативних документів

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 – Додаткові технічні вимоги до бітумно-полімерного в'язучого стикувальних стрічок

Найменування показника	Вимоги	Методи випробування
1 Температура крихкості за Фраасом, °C, не більше ніж	Мінус 25	ДСТУ EN 12593 [13]
2 Витривалість, кількість циклів, не менше ніж	30000	згідно нормативних документів
3 Глибина проникнення голки, мм ⁻¹ , при температурі 25 °C, не більше ніж при температурі 0 °C, не менше ніж	60 25	ДСТУ EN 1426 [14]
4 Розтяжність, см, не менше ніж: при температурі 25 °C при температурі 0 °C	25 20	ДСТУ 8825 [15]
5 Еластичність, %, не менше ніж: при температурі 25 °C при температурі 0 °C	80 70	ДСТУ 9116 [16], ДСТУ EN 13398 [17]
6 Зміна температури розм'якшення після прогріву, °C, не більше ніж (за абсолютною величиною)	5	ДСТУ 9116 [16], ДСТУ EN 12607-2 [18]
7 Зчеплюваність з поверхнею щебеню після прогріття згідно з ДСТУ EN 12607-1 [19] бал, не менше ніж	5	ДСТУ 8787 [20]
8 Водонасичення, %, не більше ніж	0,2	згідно нормативних документів
9 Сумісність із розміточним матеріалом: міцність на відрив, МПа, не менше ніж	1,5	ДСТУ ISO 4624 [21]
10 Температура спалаху у відкритому тиглі, °C	250 – 260	згідно нормативних документів
11 Адгезія, %	100	ДСТУ EN 13614 [22]

Джерело: розроблено автором

Стрічки мають вигляд суцільної смуги прямокутного профілю, які виготовлені з бітумно-полімерного в'язучого, намотані на картонні або пластикові втулки або без них. Торцеві поверхні стрічки повинні бути присипані мінеральним порошком згідно з ДСТУ 9246-1 [23]. На зовнішню поверхню стрічки повинен бути нанесений захисний антиадгезійний шар полімерної плівки. Захисний шар має бути суцільним, без механічних пошкоджень і легко відокремлюватися від поверхні стрічки. Орієнтовні геометричні розміри наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Геометричні розміри стикувальних стрічок

Найменування показника	Значення
1 Форма виробу	стрічка, яка складається з мастичного та клеєвого шару
2 Висота (ширина) стрічки, h , мм	від 20 ± 2 до 100 ± 2
3 Товщина стрічки, b , мм	від $3 \pm 0,5$ до $20 \pm 0,5$
4 Довжина стрічки, м	від $8 \pm 0,2$ до $20 \pm 0,2$

Джерело: розроблено автором

Стрічки повинні зберігати геометричний профіль, та не злипатися в рулонах при транспортуванні та в умовах максимальних літніх температур. Стрічки повинні розмотуватися при мінімальних температурах навколишнього середовища за якого влаштовується асфальтобетонне покриття.

Теплостійкість стрічок повинна бути не нижче ніж теплостійкість в'язучого, що застосовується для виготовлення асфальтобетонної суміші. Морозостійкість стрічок повинна бути не вище морозостійкості в'язучого, що застосовується для виготовлення асфальтобетонної суміші.

Роботи з влаштування технологічних поздовжніх та поперечних швів асфальтобетонних шарів, ремонтних карт, швів сполучень з бордюрним каменем, виконується згідно з ДБН В.2.3-4 [24].

Бітумно-полімерні стикувальні стрічки для швів можна встановлювати тільки в суху погоду і при температурі поверхні асфальтобетону не нижче ніж 5°C .

За температури від 0°C до 5°C роботу можна виконувати лише за умови вживання додаткових заходів (наприклад, попередній підігрів боків).

Бітумно-полімерну стикувальну стрічку для швів рекомендовано застосовувати для зміни ширини щілини до 10 % в асфальтобетонних шарах, під час монтажу (наприклад, кришки люків, дренажів) і для з'єднань між бортовим каменем (цементобетонним або з природнього каменю) та асфальтобетоном.

Рекомендована ширина бітумно-полімерної стикувальної стрічки повинна бути не менше ніж 10 мм.

Заповнений шов повинен залишатися функціональним у довгостроковій перспективі, при виконанні ремонтних робіт заповнений шов не повинен бути пошкоджений.

Під час експлуатації, слід запобігти проникненню твердих частинок у з'єднання, щоб забезпечити вільне переміщення компонентів один проти одного.

Через підвищений рівень шуму та ризик механічного пошкодження країв стикових зазорів не слід передбачати ширину швів більше ніж 20 мм у місцях із інтенсивним рухом транспорту.

Оптимальний типорозмір стрічки для кожного типу покриття і складу суміші повинен визначатися на дослідних ділянках.

Під час застосування бітумно-полімерної стикувальної стрічки повинні бути рівні за розміром бокові поверхні.

З'єднувальні бокові поверхні повинні бути скошеними, точно фрезерованими або вирізаними. Вони повинні бути очищені від забруднень. Частинки іржі від сталевих деталей приладів та механізмів необхідно видалити. Залишки прилиплого бруду видаляють дріткою або стисненим повітрям. Боки повинні бути сухими.

На вертикальних поверхнях і поверхнях з нахилом до 20° бітумно-полімерної стикувальної стрічки повинні виступати орієнтовно на 5 мм за поверхню шару асфальтобетону. У разі застосування литих асфальтобетонів під час виконання ремонтних робіт бітумно-полімерної стикувальної стрічки необхідно встановлювати врівень. Виконання з'єднування бітумно-полімерної стикувальної стрічки з асфальтобетонним шаром та в місцях контакту з бортовим каменем наведено на рис. 7.

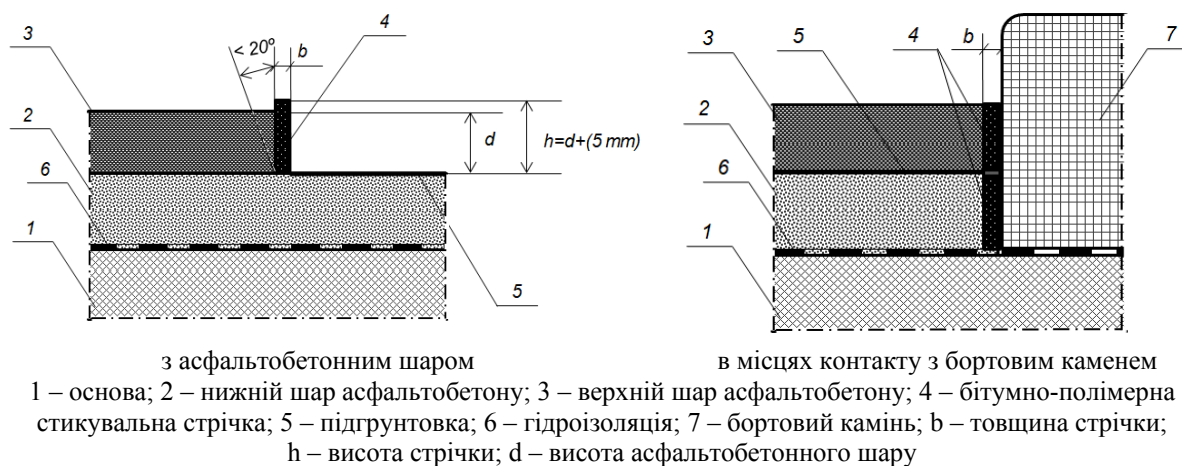


Рисунок 7 – З'єднування бітумно-полімерної стикувальної стрічки

Джерело: розроблено автором

До складу робіт з влаштування бітумно-полімерної стикувальної стрічки належать технологічні операції:

- видалення упаковки;
- розмотування рулонів стрічки вздовж робочої поверхні;
- фіксація стрічки на кромці та видалення захисної антиадгезійної плівки (паперу);
- влаштування та ущільнення асфальтобетонної суміші.

Кріплення полімер-бітумної стикувальної стрічки виконують відповідно до рекомендацій виробника.

Полімер-бітумна стикувальна стрічка буває самоклеючою без ґрунтовки або в комбінації з нанесенням ґрунтовки, або з нанесенням з використанням газового пальника та гаряча екструдована стикувальна стрічка (термопластична стрічка для швів), створена на місці на основі бітуму модифікованого полімером та наповнювачів.

Ґрунтовка наноситься на «холодну бокову сторону» і повинна повністю висохнути перед нанесенням стикової стрічки.

При використанні полімер-бітумної стикувальної стрічки необхідно враховувати, що стрічка повністю розплавлюється на «холодну бокову сторону» через температуру асфальтобетонної суміші.

Гаряча екструдована стикувальна стрічка утворюється в результаті нагрівання сирової маси в екструзійному пристрої. Підігріта сировинна маса з екструзійного пристрою продавлюється через профільну насадку і тим самим безпосередньо на

наявний фланг шва, форма профільної матриці визначає форму виготовленої на місці стикувальної стрічки.

Рулони звільняють від заводського пакування і розмотують уздовж кромки існуючого асфальтобетону антиадгезійною плівкою донизу.

Самоклеючу стрічку щільно прикладають внутрішньою стороною до кромки в рівень з покриттям, фіксують її натисканням і видаляють захисну антиадгезійну плівку.

За температури покриття нижче ніж 15 °С, для фіксації допускається прогрівати поверхню стрічки газовим пальником, після погодження з виробником стрічки.

Під час закріплення не самоклеючої стрічки попередньо необхідно прогріти кромку асфальтобетону газовим паяльником, якщо цього вимагає технологія влаштування стрічки або з попередньою ґрунтовкою кромки емульсією або іншою речовиною.

Кромка стрічки від рівня поверхні покриття не повинна перевищувати 5 мм.

З'єднання суміжних стрічок здійснюється встик. Заборонено заокруглювати в кутах.

Фіксація стрічки до бордюрного каменю аналогічна як і до асфальтобетону.

За необхідності наїзду технологічного транспорту в місцях закріплення стрічки, необхідно їх захистити дерев'яними настилами чи щитами.

Особливості влаштуванням асфальтобетонної суміші:

- необхідно щоб бокова частина шва була ретельно очищена від забруднень та висušена, з рівними, прямими боковими поверхнями (рис. 8, а);

- нанесення ґрунтовки на всю поверхню чистих сухих боків шва та повного висихання її, якщо застосування ґрунтовки технологічно непередбачено;

- використовувати газовий пальник для нагріву ділянки шва при використанні полімер-бітумної стикувальної стрічки заборонено, якщо технологічно це непередбачено;

- при заповненні ремонтної ділянки асфальтобетонною сумішю необхідно врахувати необхідний об'єм ремонтного матеріалу, щоб при ущільненні асфальтобетонної суміші не виник «пагорб» чи «яма»;

- влаштування асфальтобетонної суміші відбувається з перевищенням ремонтної ділянки на (2 – 3) см, надлишок необхідно відсунути назад до краю шва перед укаткою (рис. 8, б).

- перший прохід котка (трамбувальної плити) відбувається на холодній частині асфальтобетону, таким чином, щоб ущільнюючий механізм виходив орієнтовно на (5 – 10) см влаштовану гарячу асфальтобетонну суміш (рис. 8, в);

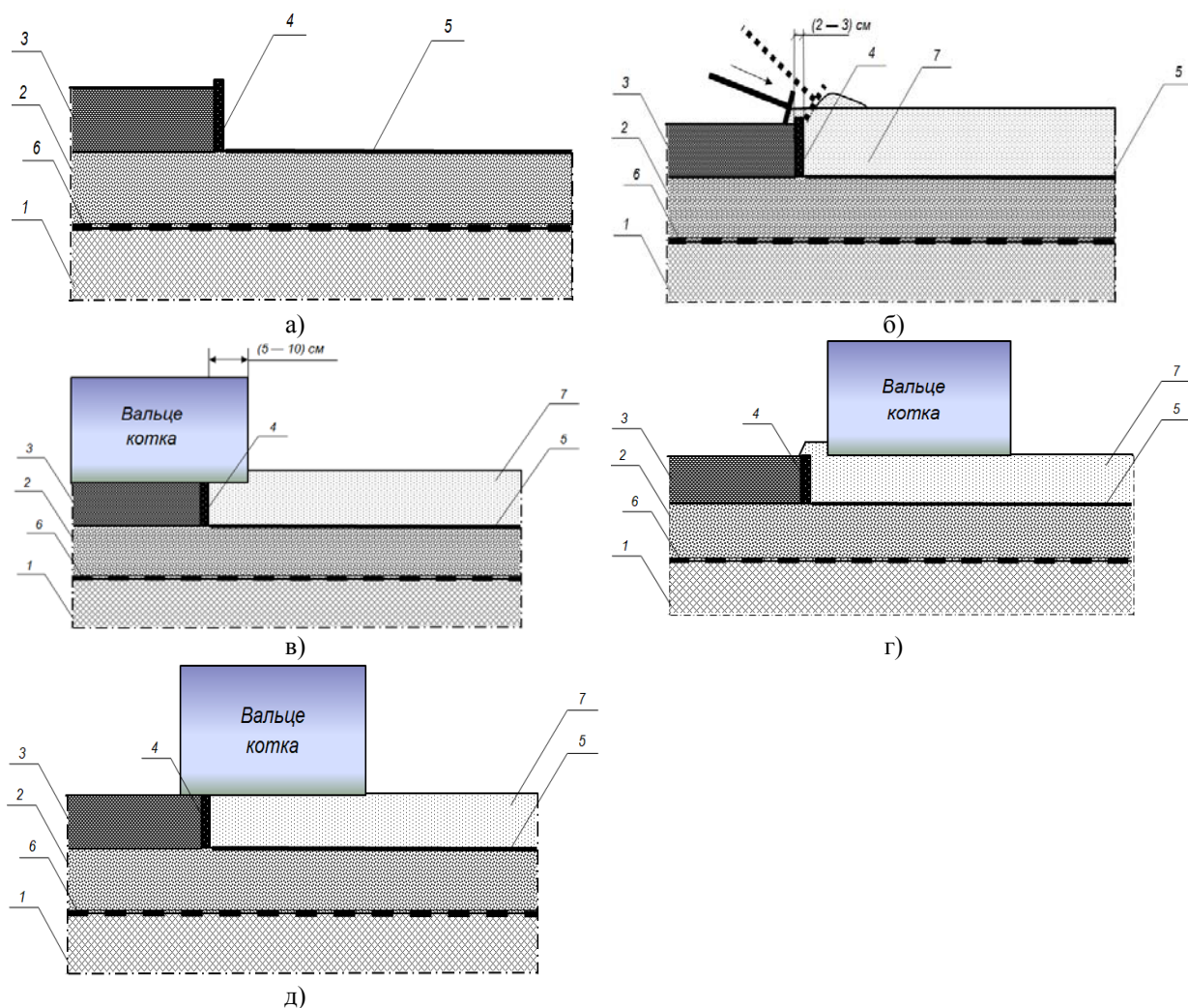
- наступний прохід котка (трамбувальної плити) відбувається на влаштованій асфальтобетонній суміші (рис. 8, г), з наступним ущільненням ремонтного шва з наїздом на холодну частину асфальтобетону (рис. 8, д).

Під час ущільнення асфальтобетонної суміші надмірна кількість в'язучого стрічки повинна видавлюватися на поверхню покриття.

Під час укочування вальцем котка надлишок укочується в шар асфальтобетону, утворюючи типову Т-подібну форму.

Вхідний контроль стикувальної стрічки виконується при постачанні стрічки в супроводі документів про якість (паспорта, сертифіката якості, тощо) із зазначенням технічних (фізико-механічних) характеристик поставленої стрічки.

Стан стикувальної стрічки перевіряють візуально. Рулон стикувальної стрічки не повинна містити більше ніж двох елементів. Поверхня повинна бути суцільною, без розривів суцільності і не мати сторонніх включень.



1 – основа; 2 – нижній шар асфальтобетону; 3 – верхній шар асфальтобетону; 4 – бітумно-полімерна стикувальна стрічка; 5 – підґрунтівка; 6 – гідроізоляція; 7 – ремонтний шар асфальтобетону (влаштування гарячої асфальтобетонної суміші)

Рисунок 8 – Влаштування гарячої асфальтобетонної суміші

Джерело: розроблено автором

Операційний контроль виконується під час робіт з влаштування стикувальної стрічки та контролюють:

- стан кромки суміжній смуги для фіксації стикувальної стрічки;
- максимальне відхилення кромки стикувальної стрічки від площини верхнього шару покриття;
- контроль технологічних параметрів процесу виконання робіт.

Контроль технологічних параметрів процесу виконання робіт здійснюється за нормами витрати стикувальної стрічки, температурою повітря, суцільністю покриття всієї поверхні кромки суміжної смуги.

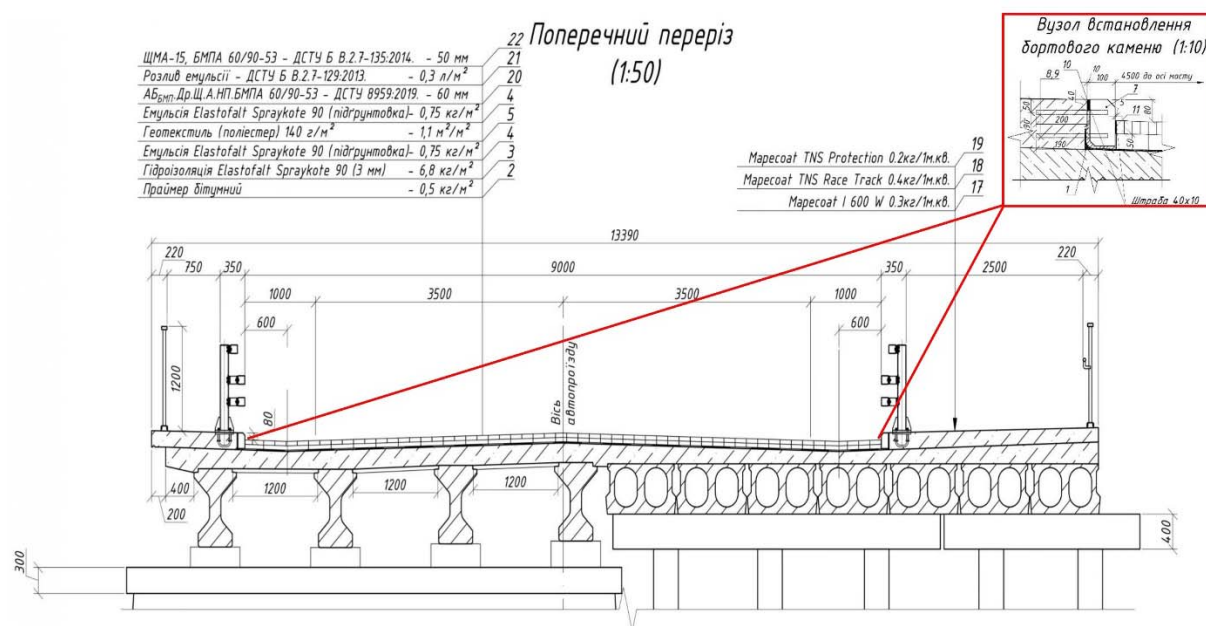
Температуру повітря контролюють за допомогою термометра згідно діючих нормативних документів.

Суцільність покриття поверхні кромки суміжної смуги контролюють візуально.

Поверхня кромки повинна бути повністю покрита на всю довжину захватки або технологічної карти.

Контроль якості при проведенні робіт з влаштування асфальтобетонних покриттів із застосуванням стикувальної стрічки необхідно дотримуватись вимог СОУ 45.2-00018112-028 [25], керуватися типовими інструкціями з охорони праці, а також повинні бути вжиті заходи щодо забезпечення безпеки руху автотранспорту.

Результати проведених досліджень було впроваджено під час поточного середнього ремонту моста на автомобільній дорозі Т-21-03 Харків – Золочів – контрольно-пропускний пункт «Олександрівка», км 18+554 у Харківській області в 2021 році (рис. 9).



1 – розчин цементний марки М200; 7 – бортовий камінь ІГП (180х100х1000) (46,8 кг); 8 – анкер Ø14 А400С, L=280 мм; 9 – клейова суміш типу HILTI HIT-RE 500 V3; 10 – герметик типу Marei Mareflex PU 45FT; 11 – бітумно-полімерна стрічка 50х5 мм;

Рисунок 9 – Проектне рішення застосування бітумно-полімерної стрічки на мостах

Джерело: розроблено автором

Висновки. Бітумно-полімерні стикувальні стрічки в транспортному будівництві застосовуються під час влаштування сучасних конструкцій асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг, аеродромних покриттів, покриттів транспортних споруд, сполучення покриття з бордюром каменем, водовідвідними лотками.

Практична цінність отриманих результатів пов'язана з розробленням рекомендацій із застосування бітумно-полімерної стикувальної стрічки в транспортному будівництві з урахуванням європейських підходів та вимог до бітумно-полімерних в'язучих, як складової стрічки. Вперше в Україні уніфіковано вимоги до бітумно-полімерних стикувальних стрічок. Розробка авторів, знайшла впровадження під час виконання роботи з розроблення нормативних документів України та є основою в нормативних документах: МР В.2.3-37641918-927:2021 «Методичні рекомендації з ремонту дорожнього одягу мостового полотна, Київ, 2021» та «Посібник з впровадження та дотримання основних міжнародних сучасних вимог проєктування автодорожніх мостів в Україні, Київ, 2023».

Список літератури

1. Сайт компанії DENSO. URL: <https://www.denso.net/> (дата звернення 17.01.2026).
2. ZTV Fug-StB 15, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugen in Verkehrsflächen. FGSV Verlag GmbH. Köln. 2015. P. 36.
3. TL Fug-StB 15, Technische Lieferbedingungen für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen, FGSV Verlag GmbH. Köln. 2015. P. 36.
4. ДСТУ EN 14188-1:2024 Заповнювачі та герметики шва. Частина 1. Технічні характеристики для герметиків гарячого застосування (EN 14188-1:2004, IDT). Чинний від 2025-05-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 22 с.
5. Gerhard Gebhards (2017). Fugenausbildung in Verkehrsflächen aus Asphalt. *Gussasphalt im Hochbau*. Bonn. pp. 30 – 31. URL: https://download.gussasphalt.de/magazin/gussasphaltMAGAZIN_2017.pdf (дата звернення 17.01.2026).
6. Hrapović, K. (2024). Sustainability in road construction – Two case studies, *GRADEVINAR*, 76 (5), 413 – 423. URL: <https://doi.org/10.14256/JCE.3979.2024> (дата звернення 17.01.2026).
7. Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung Requirements of connecting joint systems for asphalt pavements – Part 1: Experiences in the practice. Forschungsprojekt VSS 2007/401 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). 2014.
8. Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 – Anschlüsse von Brückenabdichtungen Paquet de recherche Etanchéité de ponts : EP6 - Raccords pour les étanchéités de ponts. Forschungsprojekt VSS 2006/516_OBF auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). 2014.
9. ДСТУ EN 1427:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення температури розм'якшеності за методом кільця і кулі (EN 1427:2015, IDT). Чинний від 2019-06-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 18 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-83:2014 Матеріали рулонні покрівельні та гідроізоляційні. Методи випробувань). Чинний від 2014-12-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. 58 с.
11. ДСТУ EN 13880-2:2022 Герметики для швів, нанесені гарячим способом. Частина 2. Метод випробування для визначення проникнення конуса за 25°C (EN 13880-2:2003, IDT). Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 13 с.
12. ДСТУ EN 13880-1:2022 Герметики для швів, нанесені гарячим способом. Частина 1. Метод випробування для визначення щільності за 25 °C (EN 13880-1:2003, IDT). Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 8 с.
13. ДСТУ EN 12593:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення температури крихкості за методом Фрааса (EN 12593:2015, IDT). Чинний від 2019-06-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 28 с.
14. ДСТУ EN 1426:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення глибини проникності голки (пенетрації) (EN 1426:2015, IDT). Чинний від 2019-06-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 12 с.
15. ДСТУ 8825:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення розтяжності. Чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 16 с.
16. ДСТУ 9116:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Бітуми дорожні, модифіковані полімерами. Технічні умови. Чинний від 2022-03-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 22 с.
17. ДСТУ EN 13398:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення еластичності (EN 13398:2017, IDT). Чинний від 2019-12-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 34 с.
18. ДСТУ EN 12607-2:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом тепла та повітря. Частина 2. Метод TFOT (EN 12607-2:2014, IDT). Чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 28 с.
19. ДСТУ Б EN 12607-1:2015 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина 1. Метод RTFOT (EN 12607-1:2014, IDT). Чинний від 2016-07-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 21 с.
20. ДСТУ 8787:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення зчеплюваності зі щебенем. Чинний від 2019-06-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 21 с.
21. ДСТУ ISO 4624:2019 Фарби та лаки. Визначення адгезії методом відриву (ISO 4624:2016, IDT). Чинний від 2019-06-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 32 с.
22. ДСТУ EN 13614:2020 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення зчеплюваності бітумних емульсій методом занурення у воду (EN 13614:2011, IDT). Чинний від 2021-07-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 18 с.
23. ДСТУ 9246-1:2023 Заповнювачі для асфальтобетонних сумішей та матеріалів, оброблених бітумним в'язучим. Технічні умови. Частина 1. Наповнювач. Чинний від 2024-04-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 28 с.

24. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. Чинний від 2016-04-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2015. 128 с.
25. СОУ 45.2-00018112-028:2008 Забезпечення якості при будівництві, ремонті та експлуатаційному утриманні автомобільних доріг та мостових споруд. Чинний від 2008-05-01. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 2008. 32 с.

References

1. Company website DENSO. [in German]. URL: <https://www.denso.net/>.
2. ZTV Fug-StB 15, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugen in Verkehrsflächen. FGSV Verlag GmbH. Köln. 2015. P. 36. [in German].
3. TL Fug-StB 15, Technische Lieferbedingungen für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen, FGSV Verlag GmbH. Köln. 2015. P. 36. [in German].
4. State Enterprise «UkrNDNC» (2024). *Joint fillers and sealants – Part 1: Specifications for hot applied sealants*. (DSTU EN 14188-1:2024). Kyiv [in Ukrainian].
5. Gerhard Gebhards (2017). Fugenausbildung in Verkehrsflächen aus Asphalt. *Gussasphalt im Hochbau*. Bonn. pp. 30 – 31. [in German].
6. URL: https://download.gussasphalt.de/magazin/gussasphaltMAGAZIN_2017.pdf
7. Hrapović, K. (2024). Sustainability in road construction – Two case studies, *GRADEVINAR*, 76 (5), 413 – 423. [in English]. URL: <https://doi.org/10.14256/JCE.3979.2024>
8. Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung Requirements of connecting joint systems for asphalt pavements – Part 1: Experiences in the practice. Forschungsprojekt VSS 2007/401 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). 2014. [in English].
9. Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 – Anschlüsse von Brückenabdichtungen Paquet de recherche Etanchéité de ponts : EP6 - Raccords pour les étanchéités de ponts. Forschungsprojekt VSS 2006/516_OBF auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). 2014. [in German].
10. State Enterprise «UkrNDNC» (2018). *Bitumen and bituminous binders – Determination of the softening point – Ring and Ball method*. (DSTU EN 1427:2018). Kyiv [in Ukrainian].
11. State Enterprise «UkrNDNC» (2014). *Rolled proofing and waterproof materials. Methods of testing*. (DSTU B V.2.7-83:2014). Kyiv [in Ukrainian].
12. State Enterprise «UkrNDNC» (2022). *Hot applied joint sealants - Part 2: Test method for the determination of cone penetration at 25°C*. (DSTU EN 13880-2:2022). Kyiv [in English].
13. State Enterprise «UkrNDNC» (2022). *Hot applied joint sealants. Part 1: Test method for the determination of density at 25 °C*. (DSTU EN 13880-1:2022). Kyiv [in English].
14. State Enterprise «UkrNDNC» (2018). *Bitumen and bituminous binders — Determination of the Fraass breaking point*. (DSTU EN 12593:2018). Kyiv [in Ukrainian].
15. State Enterprise «UkrNDNC» (2018). *Bitumen and bituminous binders — Determination of needle penetration*. (DSTU EN 1426:2018). Kyiv [in Ukrainian].
16. State Enterprise «UkrNDNC» (2019). *Bitumen and bituminous binders. Determination of the ductility*. (DSTU 8825:2019). Kyiv [in Ukrainian].
17. State Enterprise «UkrNDNC» (2021). *Bitumen and bituminous binders. Polymer modified road bitumen. Specification*. (DSTU 9116:2021). Kyiv [in Ukrainian].
18. State Enterprise «UkrNDNC» (2018). *Bitumen and bituminous binders — Determination of the elastic recovery of modified bitumen*. (DSTU EN 13398:2018). Kyiv [in Ukrainian].
19. State Enterprise «UkrNDNC» (2019). *Bitumen and bituminous binders — Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air — Part 2: TFOT Method*. (DSTU EN 12607-2:2019). Kyiv [in Ukrainian].
20. State Enterprise «UkrNDNC» (2015). *Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. Part 1: RTFOT method*. (DSTU B EN 12607-1:2015). Kyiv [in Ukrainian].
21. State Enterprise «UkrNDNC» (2018). *Bitumen and bituminous binders. Determination of adhesion with crushed stone*. (DSTU 8787:2018). Kyiv [in Ukrainian].
22. State Enterprise «UkrNDNC» (2019). *Paints and varnishes – Pull-off test for adhesion*. (DSTU ISO 4624:2019). Kyiv [in English].
23. State Enterprise «UkrNDNC» (2020). *Bitumen and bituminous binders — Determination of adhesivity of bituminous emulsions by water immersion test*. (DSTU EN 13614:2020). Kyiv [in Ukrainian].
24. State Enterprise «UkrNDNC» (2023). *Aggregates for asphalt mixtures and materials bounding bituminous binder specifications. Part 1. filler*. (DSTU 9246-1:2023). Kyiv [in Ukrainian].

25. Minregionalbud of Ukraine (2015). *Highways. Part I. Design. Part II. Building*. (DBN V.2.3-4:2015). Kyiv [in Ukrainian].
26. Ukravtodor (2008). *Quality assurance in the construction, repair and operational maintenance of roads and bridge structures*. (SOU 45.2-00018112-028:2008). Kyiv [in Ukrainian].

Mykola Harkusha, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Davydenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Development of Recommendations for the Application of Bitumen–Polymer Joint Sealing Tape in Transport Infrastructure Construction

The continuously increasing loads on road pavements necessitate the use of innovative and high-performance materials. Durability and life-cycle cost preservation play a decisive role. Ensuring waterproofing and crack resistance in joint zones, even under the highest load conditions, is a contemporary requirement for sealing materials. Modern repair practices require the use of materials that enable repair works to be carried out without deterioration of performance under conditions of uninterrupted traffic flow. Reliable bonding between adjacent pavement lanes can be achieved through the application of bitumen–polymer joint sealing tapes.

Bitumen–polymer tapes are also effectively used in bridge structures, particularly in transition zones between dissimilar materials, to seal construction joints and accommodate temperature-induced linear movements. Examples of such zones include the interface between asphalt concrete pavement and expansion joint elements, interfaces with concrete when expansion joint grouting is applied, as well as curb areas and drainage channels. Consideration of these specific features has been incorporated into the proposed technical requirements and installation procedures.

Bitumen–polymer joint sealing tapes are used in transport infrastructure construction during the installation of modern asphalt concrete pavement structures for highways, airfield pavements, and transport facilities, as well as at interfaces between pavements and curbstones and drainage channels.

This study develops recommendations for the application of bitumen–polymer joint sealing tape in transport infrastructure construction.

The practical significance of the obtained results lies in the development of recommendations for the application of bitumen–polymer joint sealing tape in transport construction, taking into account European approaches and requirements for bitumen–polymer binders as a constituent of the tape. For the first time in Ukraine, requirements for bitumen–polymer joint sealing tapes have been unified. The authors' development has been implemented in the preparation of national regulatory documents of Ukraine and forms the basis of the following standards: MR V.2.3-37641918-927:2021 Methodological Recommendations for the Repair of Pavement Structures of Bridge Decks, Kyiv, 2021 and Guidelines for the Implementation and Compliance with Key International Contemporary Requirements for the Design of Highway Bridges in Ukraine, Kyiv, 2023

asphalt concrete, bitumen–polymer tape, defects, repair

Одержано (Received) 19.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 10.02.2026

В.А. Пашинський¹, проф., д-р техн. наук, **А.А. Тихий**¹, доц., канд. техн. наук,
М.В. Пашинський¹, доц., канд. техн. наук, **Н.М. Мутель**²

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

¹Кропивницький будівельний фаховий коледж, м. Кропивницький, Україна

e-mail: mykola.pashynskyi@gmail.com

Аналіз результатів геодезичного контролю положення в плані колій мостових кранів у цеху машинобудівного заводу

Проаналізовані результати чотирирічних геодезичних спостережень за положенням у плані колій мостових кранів у цеху машинобудівного заводу. Відхилення відстаней між осями кранових рейок від проєктного значення можна подати у вигляді випадкової величини з нормальним законом розподілу. Встановлені орієнтовні значення середньої швидкості зміни відхилень в часі та рекомендовані періодичності геодезичних зйомок положення кранових рейок у межах 1,5...3 роки.

колії мостових кранів, геодезичний контроль, відхилення в плані, статистичний аналіз

Постановка проблеми. У цехах різних виробництв часто використовуються мостові крани для ремонтів обладнання та переміщення вантажів у межах цеху. Довговічність підкранових балок та безпека експлуатації мостових кранів залежить від технічного стану кранових колій. Значні відхилення кранових рейок від проєктного положення в плані призводять до зростання бічних сил, прискорюють зношування головок кранових рейок і реборд ходових коліс кранів, а також викликають руйнування підкранових балок та їх кріплень до колон. З метою недопущення вказаних явищ здійснюється контроль положення кранових рейок у плані геодезичними методами та виконується їх рихтування, що полягає у відновленні до проєктного положення. Значна трудомісткість проведення геодезичного контролю обумовлює актуальність визначення швидкості зміщення кранових колій у процесі експлуатації та встановлення раціональної періодичності їх рихтування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі експлуатації мостових кранів виникають перекоси, розширення та звуження кранових колій, які впливають на величину бічних сил [1, 2], роботу кранів, надійність і довговічність підкранових конструкцій [2, 3]. Ці особливості враховувалися по мірі удосконалення норм кранових навантажень [4, 5]. Вимоги до геометричного положення кранових рейок у плані унормовані в [6, 7, 8]. Основним експлуатаційним показником є відхилення відстані між осями кранових рейок одного прольоту, тобто звуження чи розширення кранових колій, яке на момент монтажу обмежується в ДСТУ [6] величиною ± 10 мм. У процесі експлуатації Правила [7, 8] допускають відхилення до ± 15 мм. Таким чином, для забезпечення нормальної експлуатації мостових кранів величина звуження чи розширення кранових колій повинна перебувати в межах ± 15 мм.

Правила [8] рекомендують контролювати положення кранових колій геодезичними методами. Геодезичні зйомки положення кранових рейок у плані можуть здійснюватися боковим нівелюванням з використанням теодолітів різних конструкцій та нівелірних рейок, горизонтально приставлених до головки кранової рейки [9, 10]. Відстань між крановими рейками впоперек прольоту визначають за допомогою

рулеток, лазерних далекомірів, або шляхом обчислення за результатами бокового нівелювання [9, 10].

Останнім часом контроль положення кранових рейок у плані виконують з використанням різноманітних лазерних приладів [10, 11]. Використовують електронні тахеометри [11, 12] та лазерні візирні, які дають промінь, орієнтований уздовж рейки. Відхилення від цього променя вимірюють з використанням екрана з координатною сіткою чи спеціальними фотореєструючими приладами. В дослідженні [9] підкреслена актуальність та ефективність використання комп'ютерної техніки для опрацювання результатів геодезичних вимірювань. Практична методика статистичного аналізу результатів геодезичних спостережень за геометрією кранових колій була розроблена й апробована у статті [12].

Постановка завдання. На основі раніше розробленої авторами методики виконати статистичний аналіз результатів геодезичних зйомок кранових колій, проведених у цеху машинобудівного заводу протягом декількох років експлуатації, оцінити їх відхилення від проєктного положення в плані та проаналізувати зміни цих відхилень у часі.

Виклад основного матеріалу.

Об'єкт дослідження та методика геодезичних вимірювань. Геодезичні зйомки положення кранових рейок у плані проводилися протягом чотирьох років підряд у головному корпусі машинобудівного заводу. Цех представляє собою семипролітну одноповерхову будівлю з каркасом із залізобетонних колон, встановлених з кроком 6 м, сталевих ферм і підкранових балок. Розміри в плані високої частини будівлі, яка й розглядається в даному дослідженні, становлять 168×96 м. Усі прольоти обладнані ремонтними й технологічними мостовими кранами вантажопідйомністю 10...30 тс з режимом роботи від 3К до 5К.

Положення кранових рейок у плані визначалося за допомогою теодоліта, або лазерного візира, які встановлювалися на гальмівних площадках. При проходженні уздовж кранових колій по спеціальному шаблону знімалися відліки напроти кожної з колон цеху, тобто у створі кожної з поперечних координатних осей 7...21, передавалися по радіозв'язку та фіксувалися в журналі геодезичної зйомки. Різна кількість результатів вимірювань у різних прольотах пояснюється тим, що деякі точки поблизу торців цеху в зонах відстою кранів були недоступними для зйомок. Таким чином для кожного ряду підкранових балок були отримані відхилення від візирної лінії, які за методикою та формулами з [12] перераховані в відхилення відстані між осями кранових рейок від проєктного значення 22500 мм. Саме ця величина підлягала статистичному аналізу, оскільки вона контролюється в ДСТУ [6] та в Правилах [7, 8]. При цьому було прийняте правило знаків згідно з яким "+" означає розширення, а "-" означає звуження кранових колій відносно проєктного значення відстані між ними.

На рисунку 1 показаний фрагмент плану цеху в осях, де виконувалися геодезичні спостереження. Уздовж буквенних осей показано положення кранових рейок, яке було зафіксоване в перший рік геодезичних зйомок. Відстань між буквенними осями (проліт цеху) становить 24000 мм, а відстань між цифровими осями (крок поперечних рам) дорівнює 6000 мм. У проєктному положенні осі кранових рейок повинні бути зміщені від буквенних осей на 750 мм до середини прольотів.

З рисунка 1 видно, що в процесі експлуатації цеху відбулося зміщення кранових рейок з їх проєктного положення. У деяких випадках, наприклад в осях 10...13 ряду В, відбулося зміщення кранових колій у бік ряду Г при збереженні відстані між ними. Причиною такого паралельного зміщення може бути нахил колон ряду В. В інших випадках спостерігається зміна проєктної відстані 1500 мм між крановими рейками, що знаходяться по різні боки тієї самої колони. Це вказує на переміщення кранових рейок по поверхні верхнього поясу підкранових балок унаслідок ослаблення кріплень рейок

до балки. Причиною може бути також зміщення самих балок відносно колон унаслідок ослаблення чи руйнування горизонтальних кріплень верхніх поясів балок до колон.

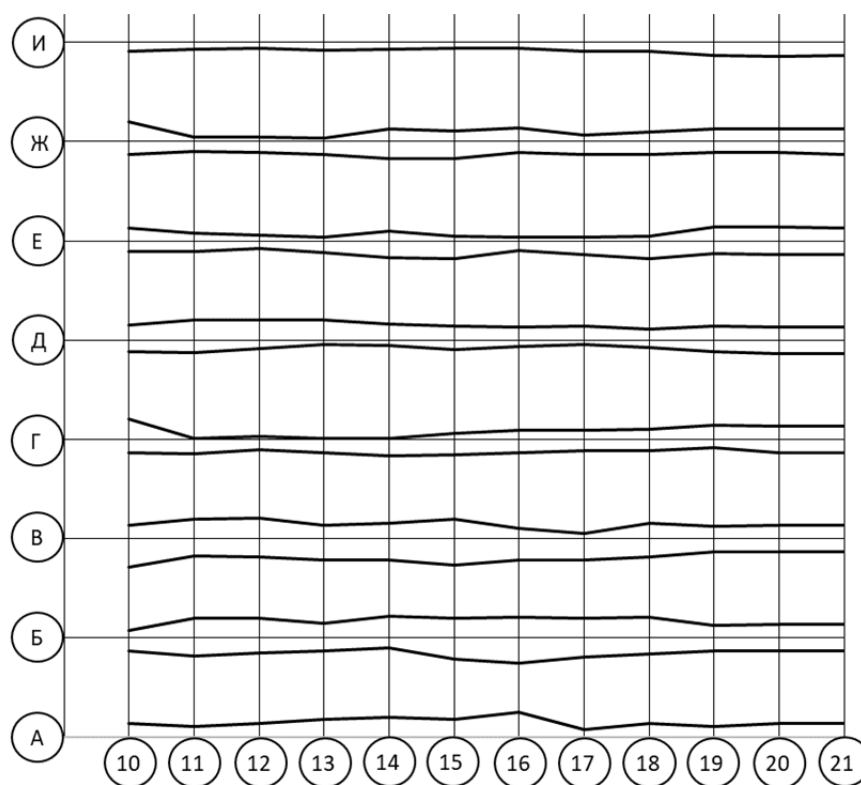


Рисунок 1 – Положення кранових колій на плані цеху станом на перший рік спостережень
Джерело: розроблено авторами

Унаслідок зміщень кранових рейок відбулися зміни відстані між їх осями в прольоті, яка згідно з проектом повинна становити 22500 мм. З рисунка 1 видно, що це обумовило перекося кранових рейок у плані, а також розширення та звуження кранових колій на окремих ділянках. З рисунка 1 видно, що найбільші звуження спостерігаються в осях 15, 16 прольоту А–Б, на осі 15 прольоту Б–В, а також на осі 10 прольотів Г–Д та Ж–И. Найбільші розширення спостерігаються на осі 17 прольоту В–Г, в осях 13, 14 прольоту Г–Д та в осях 11...13 прольоту Ж–И.

Статистичний аналіз результатів геодезичних вимірювань. У результаті чотирирічних геодезичних вимірювань у семи прольотах і початкової обробки за методикою [12] отримано 28 вибірок відхилень відстані між осями кранових рейок від проектної величини. Статистична обробка цих вибірок дала результати, наведені в таблиці 1, де для кожного прольоту й кожного року спостережень вказане середнє значення M_{Δ} та стандарт S_{Δ} вибірки випадкової величини досліджених відхилень.

Порівняння отриманих вибірок виконане методом однофакторного дисперсійного аналізу [13, 14]. У двох правих стовпцях таблиці 1 наведені результати порівняння вибірок даних вимірювання в різних прольотах, які виконувалися в протягом одного й того ж року. В усіх випадках фактично отримані значення F-критерію Фішера перевищують відповідні критичні значення F_{cr} для рівня значимості 0,05. Отже, вибірки відхилень у різних прольотах є значимо різними і їх не можна об'єднати. Результати порівняння вибірок відхилень ширини кранових колій, отриманих у різні роки спостереження в одному й тому ж прольоті, наведені у двох останніх рядках таблиці 1. Лише для прольотів А–Б і В–Г значення критерію F отримані меншими від критичних значень F_{cr} (виділені жирним курсивом), що вказує на стабільність відхилень в часі для

цих прольотів. Таким чином, різниці між вибірками відхилень відстаней між крановими коліями практично в усіх випадках є статистично значимими. Це не дозволяє об'єднувати вибірки відхилень для різних прольотів та років спостереження і змушує окремо аналізувати кожну з 28 вибірок, статистичні характеристики яких вказані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики відхилень кранових колій від проєктного положення в плані

Роки	Характеристики	Статистичні характеристики за прольотами							Дисп. аналіз	
		А–Б	Б–В	В–Г	Г–Д	Д–Е	Е–Ж	Ж–И	F	F _{cr}
1	M _Δ , мм	-8,1	-9,9	1,6	2,8	3,8	-9,5	-2,7	8,85	2,22
	S _Δ , мм	8,05	6,16	8,42	6,61	7,86	7,76	5,56		
2	M _Δ , мм	-14,2	-5,4	-1,8	0,5	12,2	0,9	-8,5	15,3	2,23
	S _Δ , мм	7,78	5,06	7,76	6,43	7,46	7,17	5,43		
3	M _Δ , мм	-13,2	-2,8	-1,1	-3,9	13,4	3,1	-1,6	10,1	2,23
	S _Δ , мм	8,11	5,89	8,98	8,69	9,06	8,67	5,66		
4	M _Δ , мм	-13,9	0,5	-1,6	4,8	4,1	0,6	-11,4	20,1	2,23
	S _Δ , мм	5,89	4,46	3,80	3,27	7,86	4,80	6,70		
Дисп. аналіз	F	1,54	8,27	0,46	4,17	4,17	7,08	7,05		
	F _{cr}	2,83	2,82	2,87	2,83	2,86	2,83	2,83		

Візуальний аналіз отриманих вибірок разом з фізичним обґрунтуванням природи відхилень відстані між крановими коліями від проєктного значення вказує на те, що отримані вибірки відхилень повинні підпорядковуватися нормальному закону розподілу [14]. Застосування критерію узгодженості Пірсона [13, 14] до побудованих дослідних гістограм показало, що на рівні значимості 0,05 не суперечить нормальному розподілу 21 гістограма, а на рівні значимості 0,02 – 24 дослідні гістограми з 28. Це дозволяє використовувати нормальний закон розподілу [13, 14] для опису випадкових величин відхилень відстані між осями кранових рейок від проєктного значення.

Використання нормального розподілу для опису відхилень ширини кранових колій від проєктного значення дозволяє ввести узагальнену оцінку стану кранових колій у вигляді ймовірності виходу відхилень за гранично допустиме значення. Ця оцінка визначається за формулою:

$$Q_{15} = 1 - F(\Delta_{\text{lim}}, M_{\Delta}, S_{\Delta}) + F(-\Delta_{\text{lim}}, M_{\Delta}, S_{\Delta}), \quad (1)$$

де $F(\Delta_{\text{lim}}, M_{\Delta}, S_{\Delta})$ – функція нормального розподілу досліджених відхилень; M_{Δ} й S_{Δ} – середнє значення й стандарт відповідної вибірки з таблиці 1; $\Delta_{\text{lim}} = 15$ мм – гранично допустиме значення, встановлене Правилами [7, 8].

Контрольною величиною ймовірності (1) доцільно вважати значення Q_{15} , обернене до кількості поперечних рам, на яких виконувалися вимірювання ширини кранових колій. Це дасть приблизно одне перевищення Δ_{lim} в обстеженому прольоті. У нашому випадку, при 10 поперечних рамах, ознакою істотної розладки кранових колій слід вважати ймовірність $Q_{15} > 0,1$. Результати обчислення ймовірностей Q_{15} за вказаними в таблиці 1 статистичними характеристиками усіх 28 наявних вибірок відхилень наведені в таблиці 2. Там же вказані фактичні кількості відхилень N_{Δ} , модуль яких перевищує $\Delta_{\text{lim}} = 15$ мм, а також найбільші виявлені відхилення Δ_{max} у міліметрах. Жирним курсивом виділені відхилення $\Delta_{\text{max}} > \Delta_{\text{lim}}$, а також значення $Q_{15} > 0,1$.

З таблиці 2 видно, що ймовірності Q_{15} загалом узгоджуються з фактичними кількостями N_{Δ} та значеннями Δ_{max} великих відхилень. Найбільша розладка кранових колій спостерігається в прольоті А–Б протягом усіх років спостережень, а також у прольоті Д–Е протягом перших трьох років спостережень.

Таблиця 2 – Зміни в часі параметрів стану кранових колій

Роки	Параметри	Характеристики відхилень за прольотами						
		А–Б	Б–В	В–Г	Г–Д	Д–Е	Е–Ж	Ж–И
1	N_{Δ}	2	4	1	1	1	2	
	Q_{15}	0,199	0,228	0,080	0,054	0,080	0,238	0,014
	$\Delta_{\max}$	24,0	21,8	18,2	20,0	17,8	20,0	9,3
2	N_{Δ}	5				3		1
	Q_{15}	0,459	0,031	0,060	0,020	0,286	0,040	0,117
	$\Delta_{\max}$	22,3	13,5	13,8	9,0	18,8	14,2	15,7
3	N_{Δ}	5				5	1	
	Q_{15}	0,412	0,034	0,097	0,110	0,366	0,109	0,010
	$\Delta_{\max}$	27,3	12,5	14,1	15,0	26,8	15,8	12,2
4	N_{Δ}	4						3
	Q_{15}	0,395	0,001	0,000	0,001	0,058	0,002	0,266
	$\Delta_{\max}$	25,0	8,0	7,0	11,3	10,0	7,5	21,8

Зміни в часі параметрів стану кранових колій відображені на рисунку 2, де показані зміни середніх відхилень M_{Δ} та ймовірностей Q_{15} відхилень ширини кранових колій від проєктного значення для усіх семи прольотів цеху. Функції $M_{\Delta}(t)$ побудовані за даними таблиці 1, а функції $Q_{15}(t)$ – за даними таблиці 2.

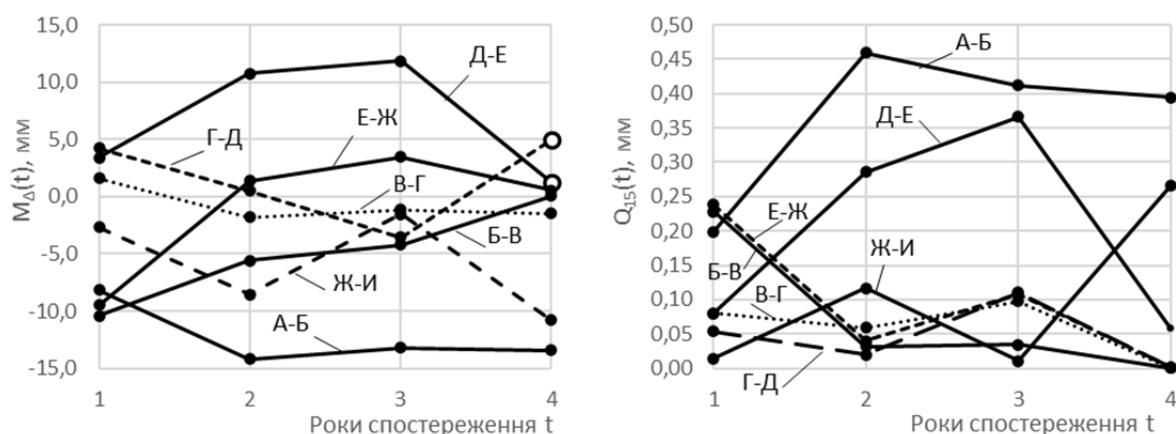


Рисунок 2 – Зміни в часі параметрів стану кранових колій

Джерело: розроблено авторами

Графіки рисунка 2 вказують на досить хаотичні зміни середніх параметрів стану кранових колій. Середні відхилення $M_{\Delta}(t)$ ширини колій від проєктного значення у більшості випадків нарастають за абсолютною величиною, але можуть також зменшуватися, як це спостерігається в прольотах Б–В і Г–Д, і навіть можуть змінювати знак подібно прольотам В–Г, Г–Д і Е–Ж. Різке поліпшення цього показника в прольотах Д–Е і Г–Д на четвертому році спостережень можна пояснити виконаним рихтуванням, тобто відновленням проєктного положення кранових рейок. Результати геодезичних зйомок, отримані після рихтування, відображені на графіку зміни $M_{\Delta}(t)$ більш крупними незалитими точками.

Імовірності $Q_{15}(t)$ виходу відхилень ширини колій за допустиму в процесі експлуатації межу $\Delta_{\lim} = 15$ мм змінюються значною мірою синхронно зі змінами середніх значень $M_{\Delta}(t)$. У прольотах В–Г, Г–Д, а також у прольотах Б–В і Е–Ж протягом 2...4 років спостережень імовірності Q_{15} практично не перевищують значення 0,1, яким у

таблиці 2 відповідають одне або ні одного фактичного перевищення граничного допустимого значення $\Delta_{\text{lim}} = 15$ мм. В інших випадках отримано $Q_{15} > 0,2$ та значна кількість фактичних перевищень допустимого значення відхилення ширини колій.

Дані таблиці 1 дозволяють орієнтовно оцінити швидкість зміни відхилень від проектної ширини кранових колій у процесі експлуатації та рекомендувати раціональну періодичність їх геодезичного контролю. Швидкості зміни відхилень V_{Δ} дорівнюють модулям коефіцієнтів лінійних рівнянь, отриманих у результаті апроксимації наведених у таблиці 1 функцій $M_{\Delta}(t)$ за методом найменших квадратів [13, 14]. При цьому з розгляду виключені відмічені на рисунку 2 крупними точками дані, отримані після рихтування кранових рейок. Результати обчислень наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Швидкості зміни відхилень та доцільна періодичність контролю

Позначення прольотів:	А–Б	Б–В	В–Г	Г–Д	Д–Е	Е–Ж	Ж–И
Швидкість зміни відхилень V_{Δ} , мм/рік	1,49	3,29	1,35	3,90	4,22	3,22	1,74
Періодичність спостережень T_{κ} , місяці	40	18	44	15	14	19	34

Згідно з нормами [6] допуск монтажу на ширину кранових колій становить ± 10 мм, а в процесі експлуатації Правила [7, 8] допускають відхилення до ± 15 мм. Таким чином, після чергового рихтування рейок можна допустити зміщення кранових рейок не більше, ніж на 5 мм. Тоді раціональну періодичність геодезичного контролю положення кранових колій у плані, виражену в місяцях, можна визначити за формулою

$$T_{\kappa} = 12 \times 5 / V_{\Delta}, \quad (2)$$

результати обчислень за якою наведені в таблиці 3.

З таблиці видно, що рекомендована періодичність геодезичного контролю положення кранових колій у плані змінюється від 14 місяців для прольоту Д–Е до 44 місяців (3,7 року) для прольоту В–Г. З метою планування геодезичних зйомок положення кранових колій згідно з даними таблиці 3 можна рекомендувати виконувати їх у прольотах Г–Д і Д–Е щорічно, в прольотах Б–В і Е–Ж – кожні 1,5 року, а в прольотах

А–Б, В–Г і Ж–И з періодичністю 3 роки. Доцільно також виконувати геодезичні зйомки після рихтування рейок, що дасть змогу уточнювати наступні терміни обстежень з урахуванням останніх отриманих результатів.

Висновки. Аналіз результатів геодезичних зйомок положення в плані колій мостових кранів, які виконувалися в багатопролітній будівлі головного корпусу машинобудівного заводу протягом чотирьох років поспіль, показав наступне:

- контрольованим показником є випадкова величина відхилення відстані між осями кранових рейок від проектного значення, яка описується нормальним законом розподілу;
- дисперсійний аналіз показав, що різниці між вибірками відхилень відстаней між крановими коліями в різних прольотах і в різні роки спостереження є статистично значимими, що не дозволило об'єднати ці вибірки для подальшого аналізу;
- у якості узагальненого показника стану кранових колій доцільно використовувати ймовірність виходу відхилень відстаней між осями кранових рейок, отриманих за результатами геодезичної зйомки, за встановлені нормами допустимі значення;
- попри значні випадкові коливання, аналіз результатів чотирирічних геодезичних вимірювань дозволив орієнтовно встановити середні швидкості зміни відхилень у часі та доцільні періодичності геодезичних зйомок у межах 1,5...3 роки для різних прольотів.

Список літератури

1. Григоров О. В., Турчин О. В., Аніщенко Г. О., Петренко Н. О., Стрижак В. В., Радченко В. С. Бічні сили, що діють на колеса мостових кранів, і деякі методи їх зниження. *Підйомно-транспортна техніка*, № 1 (60), 2019, с. 4–15. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/46181> (дата звернення: 22.12.2025).
2. Пічугін С.Ф. Вплив кранових навантажень на каркаси виробничих будівель. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського*. Випуск 5, 2010 р. С. 106–116 URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/7729/1/ZNPISK_2010_5_12.pdf (дата звернення: 22.12.2025).
3. Заїдання рейки колеса мостового крана: основні стратегії технічного обслуговування URL: https://www.nucleonglobal.com/uk/posts/overhead-crane-wheel-rail-biting-essential-maintenance-strategies/?gtm_latency=1 (дата звернення: 22.12.2025).
4. Pichugin S. Development of crane load codes on the basis of experimental research. *Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : Нац. ун-т імені Юрія Кондратюка, 2021. Вип. 1 (56). С. 18–29. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/11336> (дата звернення: 22.12.2025).
5. Пічугін С.Ф. Розвиток нормування кранових навантажень на будівельні конструкції. *Комунальне господарство міст*, 2021, том4, випуск 164. С. 82–97 URL: <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/uk/article/view/5825/5744> (дата звернення: 22.12.2025).
6. ДСТУ Б В.2.6-200:2014. Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу. К.: Мінрегіонбуд України, 2014, 73 с. URL: https://dbn.co.ua/_ld/12/1206_dstu_b_v2_6_200.pdf (дата звернення: 22.12.2025).
7. ДНАОП 0.00-1.03-02. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів. URL: https://dnaop.com/html/84_16.html (дата звернення: 22.12.2025).
8. НПАОП 0.00-1.80-18. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання. Затверджено наказом Міністерства соціальної політики України 19.01.2018 № 62, 214 с. URL: <https://universalkranservis.com/images/uks/NPAOP-18.pdf> (дата звернення: 22.12.2025).
9. Мазикіна О.Б. Підвищення точності та оперативності геодезичного контролю при експлуатації мостових кранів і підкранових колій Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.24.01. КНУБА, К., 2000. URL: <http://tekhnosfera.com/povyshenie-tochnosti-i-operativnosti-geodezicheskogo-kontrolya-pri-ekspluatatsii-mostovyh-kranov-i-podkranovyh-putey> (дата звернення: 22.12.2025).
10. Бачишин Б.Д. Інженерна геодезія : навчальний посібник [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2020, 196 с. URL: <https://surl.li/phzwwj> (дата звернення: 22.12.2025).
11. Смірнова О., Кльось С., Тритяк В. Дослідження геометричних параметрів підкранових колій з використанням електронного тахеометра. URL: <https://openreviewhub.org/geoterrace/paper/doslidzhennya-geometrichnih-parametriv-pidkranovih-kolij-z-vikoristannyam> (дата звернення: 22.12.2025).
12. Пашинський В.А., Тихий А.А., Пашинський М.В., Пічугін С.Ф. Статистичний аналіз результатів геодезичних зйомок колій мостових кранів у виробничих будівлях. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2020, no. 81, page 87-96. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2020-81/81-9.pdf> (дата звернення: 22.12.2025).
13. Горбань І.І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів. Київ, 2003, 244 с. URL: http://www.immsp.kiev.ua/perspages/gorban_i_i/Publications/4.pdf (дата звернення: 22.12.2025).
14. Пашинський В.А., Пашинський М.В. Методи в інженерних дослідженнях. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти з інженерних спеціальностей. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. 106 с.

References

1. Hryhorov, O. V., Turchyn, O. V., Anishchenko, H. O., Petrenko, N. O., Stryzhak, V. V., & Radchenko, V. S. (2019). Lateral forces acting on overhead crane wheels and some methods for their reduction. *Hoisting and Conveying Equipment*, 1(60), 4–15. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/46181>
2. Pichuhin, S. F. (2010). Influence of crane loads on industrial building frames. *Collected Scientific Papers of the V. M. Shimanovskiy Ukrainian Research and Design Institute of Steel Structures*, 5, 106–116. https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/7729/1/ZNPISK_2010_5_12.pdf
3. Nucleon Global. (n.d.). Overhead crane wheel rail biting: Essential maintenance strategies. <https://www.nucleonglobal.com/uk/posts/overhead-crane-wheel-rail-biting-essential-maintenance-strategies/>
4. Pichugin, S. (2021). Development of crane load codes on the basis of experimental research. *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(56), 18–29. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/11336>
5. Pichuhin, S. F. (2021). Development of standardization of crane loads on building structures. *Municipal Economy of Cities*, 4(164), 82–97. <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/uk/article/view/5825/5744>

6. Ministry for Regional Development, Construction, Housing and Utilities of Ukraine. (2014). *DSTU B V.2.6-200:2014. Steel building structures. Requirements for erection*. https://dbn.co.ua/_ld/12/1206_dstu_b_v2_6_200.pdf
7. State Committee of Ukraine for Occupational Safety. (2002). *DNAOP 0.00-1.03-02. Rules for the design and safe operation of lifting cranes*. https://dnaop.com/html/84_16.html
8. Ministry of Social Policy of Ukraine. (2018). *NPAOP 0.00-1.80-18. Occupational safety rules during operation of lifting cranes, lifting devices and related equipment*. <https://universalkranservis.com/images/uks/NPAOP-18.pdf>
9. Mazykina, O. B. (2000). *Improving accuracy and efficiency of geodetic control during operation of overhead cranes and crane runways* (PhD thesis abstract). Kyiv National University of Construction and Architecture. <http://tekhnosfera.com/povyshenie-tochnosti-i-operativnosti-geodezicheskogo-kontrolya-pri-ekspluatatsii-mostovyh-kranov-i-podkranovyh-putej>
10. Bachyshyn, B. D. (2020). *Engineering geodesy* (Textbook, electronic edition). National University of Water and Environmental Engineering. <https://surl.li/phzwaj>
11. Smirnova, O., Klios, S., & Trytiak, V. (n.d.). Investigation of geometric parameters of crane runways using an electronic total station. <https://openreviewhub.org/geoterrace/paper/doslidzhennya-geometrichnih-parametriv-pidkranovih-kolij-z-vikoristannyam>
12. Pashynskiy, V. A., Tykhyi, A. A., Pashynskiy, M. V., & Pichuhin, S. F. (2020). Statistical analysis of geodetic survey results of overhead crane runways in industrial buildings. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 81, 87–96. <http://visnyk-odaba.org.ua/2020-81/81-9.pdf>
13. Horban, I. I. (2003). *Probability theory and mathematical statistics for researchers and engineers*. Kyiv. http://www.immsp.kiev.ua/perspages/gorban_i_i/Publications/4.pdf
14. Pashynskiy, V. A., & Pashynskiy, M. V. (2020). *Methods in engineering research*. Central Ukrainian National Technical University.

Victor Pashynskiy, Prof., Dr. Tech. Sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Pashynskiy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Nataliia Mutel

Kropyvnytskyi Construction Vocational College, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Geodetic Control Results for the Plan Position of Overhead Crane Tracks in a Machine-Building Workshop

A statistical analysis of the results of geodetic surveys of crane tracks carried out in one of the workshops of a machine-building plant over four years of operation was performed. The purpose of the study was to assess the deviations of overhead crane tracks from their design plan position and to analyse the changes in these deviations over time.

The investigated workshop is a multi-span single-storey building with overall dimensions of 168×96 m, equipped with overhead cranes with lifting capacities of 10–30 tf. Geodetic surveys of the plan position of the crane rails were performed using a theodolite or a laser sight installed on the braking platforms of the crane girders. Based on the survey results, deviations of the distances between the crane rail axes from the design value of 22,500 mm were calculated in the plane of each transverse frame. Over four years of measurements, 28 samples of deviations were obtained in seven spans. According to regulatory documents, these deviations at the time of installation should be within ± 10 mm, and during operation should not exceed ± 15 mm.

Analysis using Pearson's chi-squared test showed that the vast majority of the obtained samples do not contradict the normal distribution, which was therefore used to describe the random variable representing deviations of the distance between the crane rail axes from the design value. Analysis of variance indicated that the differences between deviation samples in different spans, as well as in different years of observation, are statistically significant.

The probability of the measured deviations of the distances between the crane rail axes exceeding the permissible limit of ± 15 mm specified by standards was used as a generalised indicator of the crane tracks condition. For different spans and different years of observation, these probabilities vary from fully acceptable values below 0.1 to clearly unacceptable values reaching 0.4–0.45. Temporal changes in this probability and in the span-averaged deviations are largely random; however, analysis of the observed trends made it possible to determine the average rates of change of the deviations of the distances between the crane rail axes over time. Assuming an allowable increase in deviations of 5 mm after installation or subsequent alignment of the crane rails, appropriate intervals for geodetic surveys of 1.5–3 years were established for different spans of the workshop.

overhead crane tracks, geodetic control, plan deviations, statistical analysis

Одержано (Received) 23.12.2025

Прорецензовано (Reviewed) 27.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 10.02.2026

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.025

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).322-333](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).322-333)

Ів. Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **М. Я. Сташків**, доц., канд. техн. наук,
Т. А. Довбуш, доц., канд. техн. наук, **М. Г. Левкович**, доц., канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
Ів. Б. Гевко, доц., канд. техн. наук
*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і
природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м.
Бережани, Україна*
e-mail: gevkoivan1@ukr.net

Проектування трансформаційних контейнерів з метою ефективного перевезення габаритних вантажів автотранспортними засобами

У межах дослідження реалізовано структурно-схемний синтез трансформаційних контейнерів. Із застосуванням методів морфологічного аналізу розроблено морфологічну таблицю ознак конструктивних елементів та сформовано модель механічної системи «Трансформаційний контейнер». На основі результатів експертного оцінювання ідентифіковано пріоритетні морфологічні ознаки, що визначають конфігурацію об'єкта. Систематизація зазначених ознак дозволила згенерувати низку варіантів конструкцій, зокрема з функціями вертикальної та горизонтальної трансформації. Такі технічні рішення забезпечують можливість ефективного транспортування габаритних вантажів або спеціальної техніки в закритому (маскованому) стані з використанням автотранспортних засобів. Також в роботі проведено дослідження напружено-деформованого стану трансформаційних контейнерів яке показало, що рівень напружень у розгорнутому стані контейнера сягає сотень МПа, що на порядок перевищує показники у складеному стані. З метою підвищення жорсткості та несучої здатності конструкції обґрунтовано необхідність інтеграції додаткових елементів жорсткості (перемичок). Зокрема, для розсувного контейнера з габаритними розмірами 5х2х1м встановлено доцільність встановлення додаткових перемичок у зонах четвертого та восьмого напрямних елементів. Це дозволяє оптимізувати розподіл внутрішніх зусиль та забезпечити надійність експлуатації системи при максимальних експлуатаційних навантаженнях.

проекування, морфологічний аналіз, структурно-схемний синтез, розсувний, контейнер, автотранспортний засіб

Постановка проблеми. Сучасний стан вантажних перевезень характеризується значною динамічністю і широким використанням новітніх та модернізованих механічних систем, і це в значній мірі стосується автотранспортних та інших засобів спеціалізованої техніки, а також кузовів, причепів та контейнерів. Проблема створення контейнерів нестандартних розмірів стає досить актуальною за необхідності перевезення габаритних вантажів і загального підвищення ефективності логістичних процесів. Досить часто виникає потреба у збільшенні габаритних розмірів контейнерів для їх відповідності до габаритів вантажу, що зумовлює потребу у пошуку таких технічних рішень. Особливо важливою ця проблема постала під час проведення бойових дій, коли існує підвищена потреба у перевезеннях в закритому чи замаскованому стані військової техніки. Тож вищезазначені виклики зумовлюють необхідність активізації пошуку та розробки інноваційних, вдосконалених конструкцій контейнерів нестандартних розмірів. Пріоритет повинен надаватись рішенням, які

передбачають функціонал трансформації їх габаритів шляхом розсування, зсування чи інших модифікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Збільшення обсягів вантажоперевезень, спричинене зростанням населення та технологічним розвитком, формує нові, жорсткіші вимоги до вантажного автотранспорту. Попри те, що наукова спільнота [1–12, 18] активно працює над методиками проектування та синтезу ефективних конструкцій механічних систем для проведення ефективної логістики, залишається певна потреба у подальшому дослідженні проектування багатофункціональних нестандартних контейнерів з функцією трансформації їх габаритів шляхом розсування, зсування чи інших модифікацій, для перевезення автотранспортними та іншими засобами. Такі дослідження широко проводяться з використанням різноманітних методів та синтезу і, зокрема, з методом морфологічного аналізу з використанням ієрархічного групування отримання ефективних конструктивних альтернатив [13–15, 18]. Проте, аналіз наявних досліджень виявляє низку невирішених питань, що вимагають подальшого вивчення. Це необхідно для пошуку та проектування багатофункціональних нестандартних контейнерів для автотранспортних та інших перевезень.

Метою роботи є проектування трансформаційних контейнерів з метою ефективного перевезення габаритних вантажів автотранспортними засобами.

Виклад основного матеріалу. Пошук і проектування трансформаційних контейнерів проведено з метою одержання конструкцій контейнерів, що дозволяють ефективно перевезення габаритних вантажів чи військової техніки в закритому або замаскованому стані автотранспортними засобами.

Загалом контейнери були створені для морських перевезень. Товщина матеріалу, з якого виготовляються морські контейнери, зазвичай становить близько 3 мм. При цьому бічні стінки, дах і двері, як правило, виготовляють з гофрованого сталюгого листа, як правило марки Corten, товщиною 1,6 ... 2,0 мм. Каркас (дверний та інший) для більшої міцності та жорсткості виготовляють із сортового прокату товщиною 4,0 ... 6,0 мм [16]. Дно контейнера зазвичай виготовляють з деревини і закріплюють на сталевих поперечних балках. Сталь Corten (COR-TEN), яка є легованою, для будівництва контейнерів вибрано не випадково, вона містить мідь, хром, нікель та фосфор і є надзвичайно стійкою до корозії. На поверхні деталей виготовлених із цієї сталі під впливом погодних умов утворюється захисний шар іржі, що в подальшому значно запобігає корозії. Крім того, деталі виготовлені з цієї сталі мають значну міцність і довговічність [16].

Вантажний контейнер визначають, як стандартизовану, багаторазову тару, що використовується для перевезення більшості сухих товарів. Оскільки ці контейнери не мають вбудованого обладнання для контролю температури (на відміну від рефрижераторних контейнерів або рефконтейнерів), вони не підходять для вантажів, що вимагають особливого температурного режиму. Існує кілька типів морських контейнерів з різними розмірами та габаритами. Стандартними й найпоширенішими є контейнери 20 футів (6,1 м) та 40 футів (12,2 м). Крім того, на ринку представлені й інші розміри, зокрема 10 футів (3,05 м), 45 футів (13,7 м), 53 фути (16,15 м) та інші спеціалізовані варіанти [16]. 20-футіві контейнери є універсальними та зручними для логістики завдяки легкому укладанню на судах і простоті перевантаження (з корабля на потяг, а потім на вантажівку до складу). Для перевезення крупногабаритних вантажів та з метою економії для одночасного транспортування значних партій товарів використовують 40-футіві контейнери, а для виробів з більшою висотою використовують 40-футіві High Cube, який у порівнянні зі стандартними 40-футівими є вищими на 30 см. Крім наведених вище стандартних контейнерів використовуються і спеціальні стандартних типорозмірів. Зокрема Open top (відкриті контейнери зі знімним дахом для завантаження товару зверху) з внутрішньою довжиною 5,894 м або 12,028 м,

та Flat rack (без даху і бічних стінок) з внутрішньою довжиною 5,940 м та 12,130 м. Також використовуються 20 та 40 футові контейнери з бічним відкриттям дверей (SIDE DOOR), спецконтейнери, контейнери з відкидним дахом (TOP КОНТЕЙНЕР та HARD TOP), гаражі контейнерного типу, 10 (3,05 м), 45 (13,7 м) та 53 (16,15 м) футові контейнери тощо [16].

На відміну від морських перевезень, автомобільні допускають зміну габаритних розмірів не лише по довжині та висоті контейнера, а й по ширині. Тож для генерації прогресивних конструкцій нестандартних контейнерів було застосовано метод синтезу ієрархічних груп на основі модифікованого морфологічного аналізу [13-15]. Цей підхід дозволив отримати низку рішень шляхом генерування альтернатив на окремих ієрархічних рівнях у межах визначених конструктивних ознак елементів системи. Проведене експертне оцінювання впливу різноманітних факторів на конструкції трансформаційних контейнерів дозволило ідентифікувати ключові морфологічні ознаки конструктивних елементів та встановити їхні функціональні взаємозв'язки. Результати цього аналізу стали основою для:

а) побудови морфологічної таблиці ознак конструктивних елементів трансформаційних контейнерів (табл. 1);

б) формування структурної моделі механічної системи «Трансформаційний контейнер» (рис. 1).

Шляхом експертного аналізу, здійсненого під час структурно-схемного синтезу, було визначено наступні основні морфологічні ознаки елементів трансформаційних конструкцій трансформаційних контейнерів:

- тип і геометрична форма стінок, днища, даху та дверей: конструкція, розміщення листів, товщина листа, отвори для кріплення, геометрична форма листів, наявність та геометрична конфігурація ребер жорсткості;
- каркаси (бічні та кутові): конструкція; форма; отвори для кріплення;
- з'єднання на основі: стикове, таврове;
- спосіб з'єднання елементів: нерухоме і рухоме.

При цьому не розглядалися конструктивні рішення пов'язані із варіантами зміни габаритних розмірів контейнерів за допомогою пневматичних, гідравлічних, гвинтових чи іншого типу механічних передач, позаяк це значно ускладнить конструкцію контейнера і не є раціональним рішенням контейнерів, які повсякчас використовуються для перевезення автотранспортними засобами. Приймається варіант, у якому під дією навантаження (з допомогою кранового чи іншого стороннього обладнання чи оснащення) проходить розтягування чи стягування контейнера на необхідну величину і скріплення його стінок, днища, даху, дверей та каркасів (бічних чи/та кутових) простим болтовим з'єднанням в отворах для кріплення (ознаки 4 і 10 з табл. 1).

Таблиця 1 - Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів трансформаційних контейнерів

Тип і геометрична форма стінок, днища, даху та дверей						
1. Конструкція	2. Розміщення листів	3. Товщина листа	4. Отвори для кріплення	5. Геометрична форма листів	Ребра жорсткості	
					6. Наявність	7. Геометрична конфігурація
1.1. Стаціонарна.	2.1. Суцільний лист.	3.1. 1,6 мм. 3.2. 2 мм. 3.3. 2,5 мм.	4.1. Присутні. 4.2. Відсутні.	7.1. Прямий 7.2. Трапецієвидний. 7.3. Трикутний. 7.4. Трапецієвидний з трикутним.	6.1. Присутні. 6.2. Відсутні.	7.1. Квадрат. 7.2. Гнугий профіль з рівними сторонами. 7.3. Швелер стандартний. 7.4. Гнугий профіль із округло вигнутою
1.2. Розсувна.	2.2. Торцеве з боковим з'єднанням. 2.3. Торцеве	3.4. 3 мм.				

	із з'єднанням через ребро жорсткості.			7.5. Дугоподібний.		стороною. 7.5. Гнутий профіль із округло вгнутою стороною. 8.6. Профільна труба. 8.7. Кутник рівносторонній із тупим кутом. 9.8. М-подібний профіль.
Каркаси (бічні та кутові)						
8. Конструкція	9. Форма			10. Отвори для кріплення	10. З'єднання на основі	17. Спосіб з'єднання
8.1. Стационарна. 8.2. Розсувна.	9.1. Квадратна труба. 9.2. Профільна труба. 9.3. Прямокутна труба. 9.4. Кутник. 9.5. Швелер стандартний. 9.6. Швелер рівносторонній. 9.7. Швелер із загнутими до середини кінцями. 9.8. Конструкція з елементом Т-подібної форми. 9.9. Квадратний прокат. 9.10. Прямокутний прокат.			10.1. Присутні. 10.2. Відсутні.	11.1. Стикове. 11.2. Таврове.	12.1. Зварне. 12.2. Клепане.

Джерело: розроблено авторами

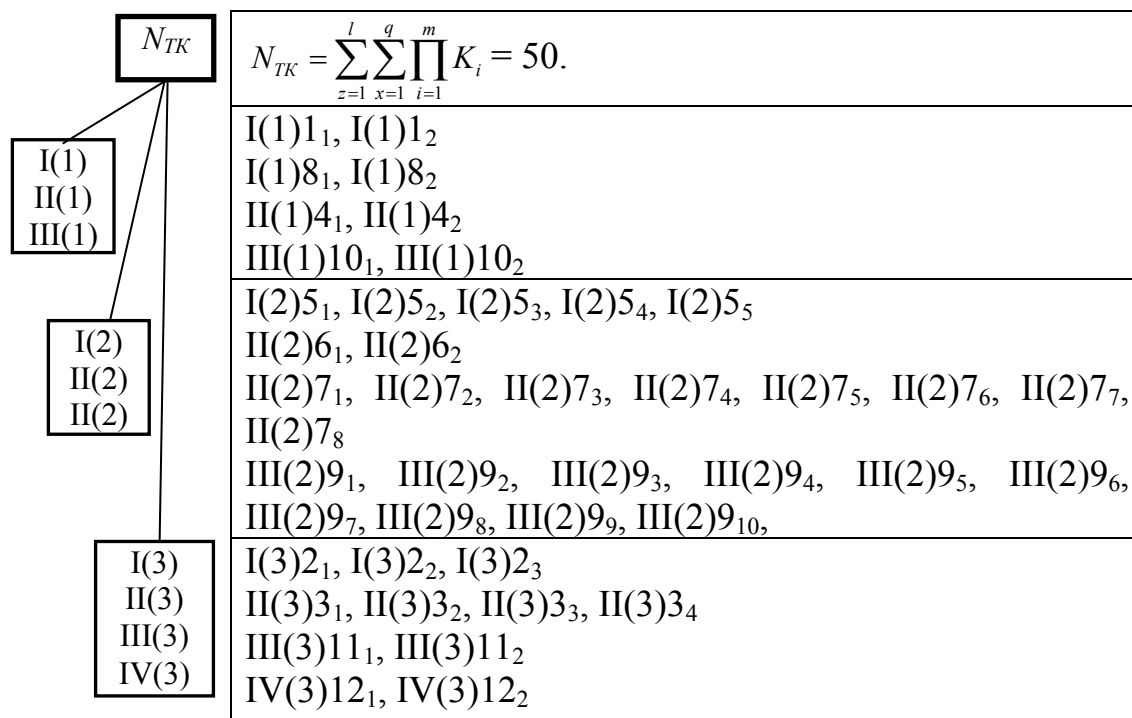
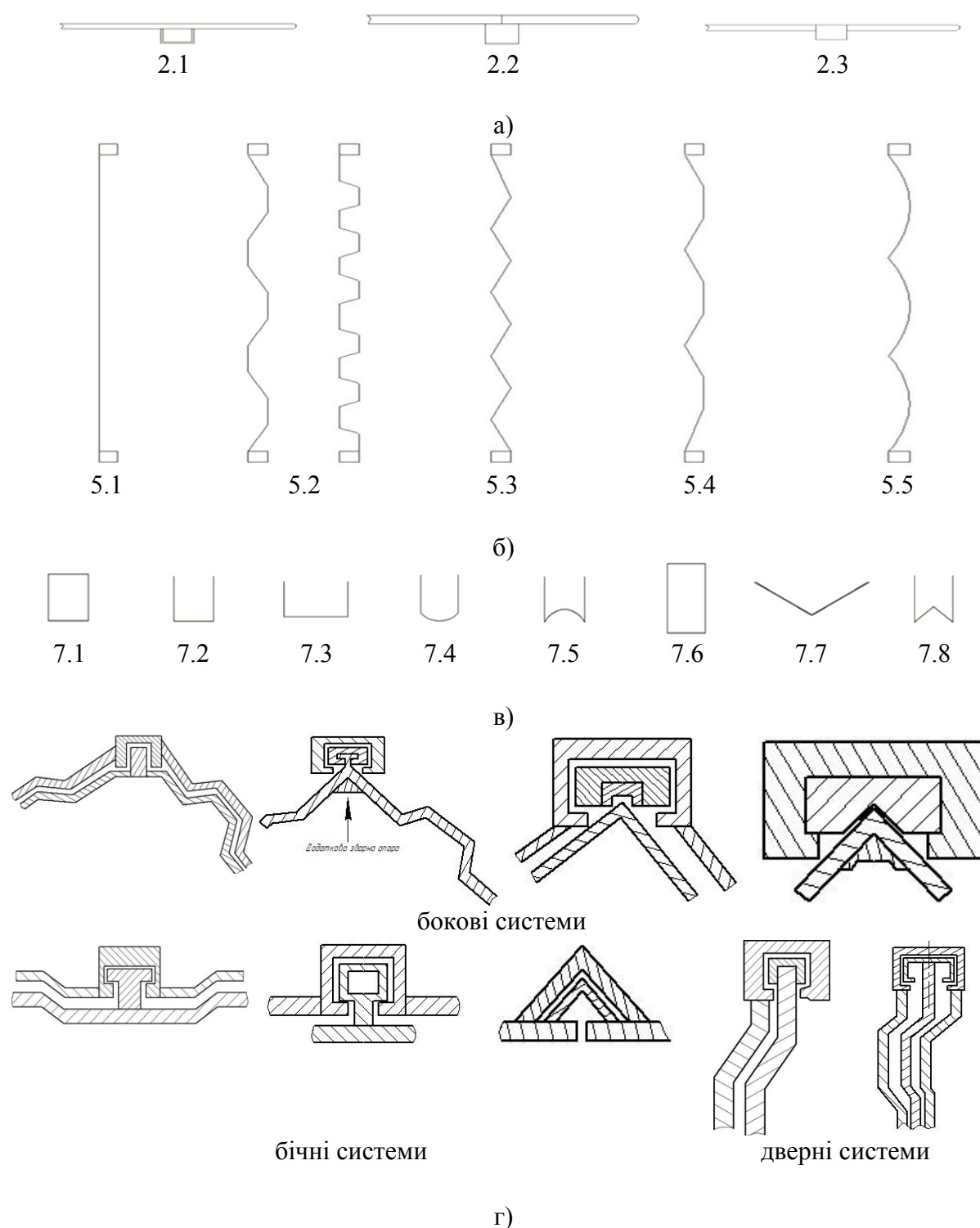


Рисунок 1 - Модель механічної системи «Трансформаційний контейнер»

I - IV – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Джерело: розроблено авторами



г)

Рисунок 2 - Конструктивні рішення з використанням елементів з табл.1:

а) розміщення листів; б) геометрична форма листів; в) геометрична конфігурація ребер жорсткості; г) поєднання геометричної форми стінок, днища, даху та дверей з каркасами (бічним та кутовими)

Джерело: розроблено авторами

На основі проведеного дослідження розроблено конструкції розсувних контейнерів, які наділені властивістю розсування у вертикальному (рис. 3) та горизонтальному (рис. 4) напрямках, що дозволяє змінювати їх габаритні розміри при необхідності перевезення габаритних вантажів автотранспортними засобами. Зокрема

на конструкцію контейнера з функцією розсування у вертикальному напрямку отримано патент на корисну модель України [17], а на конструкцію контейнера з функцією розсування у горизонтальному напрямку подано заявку на отримання патенту на корисну модель України.

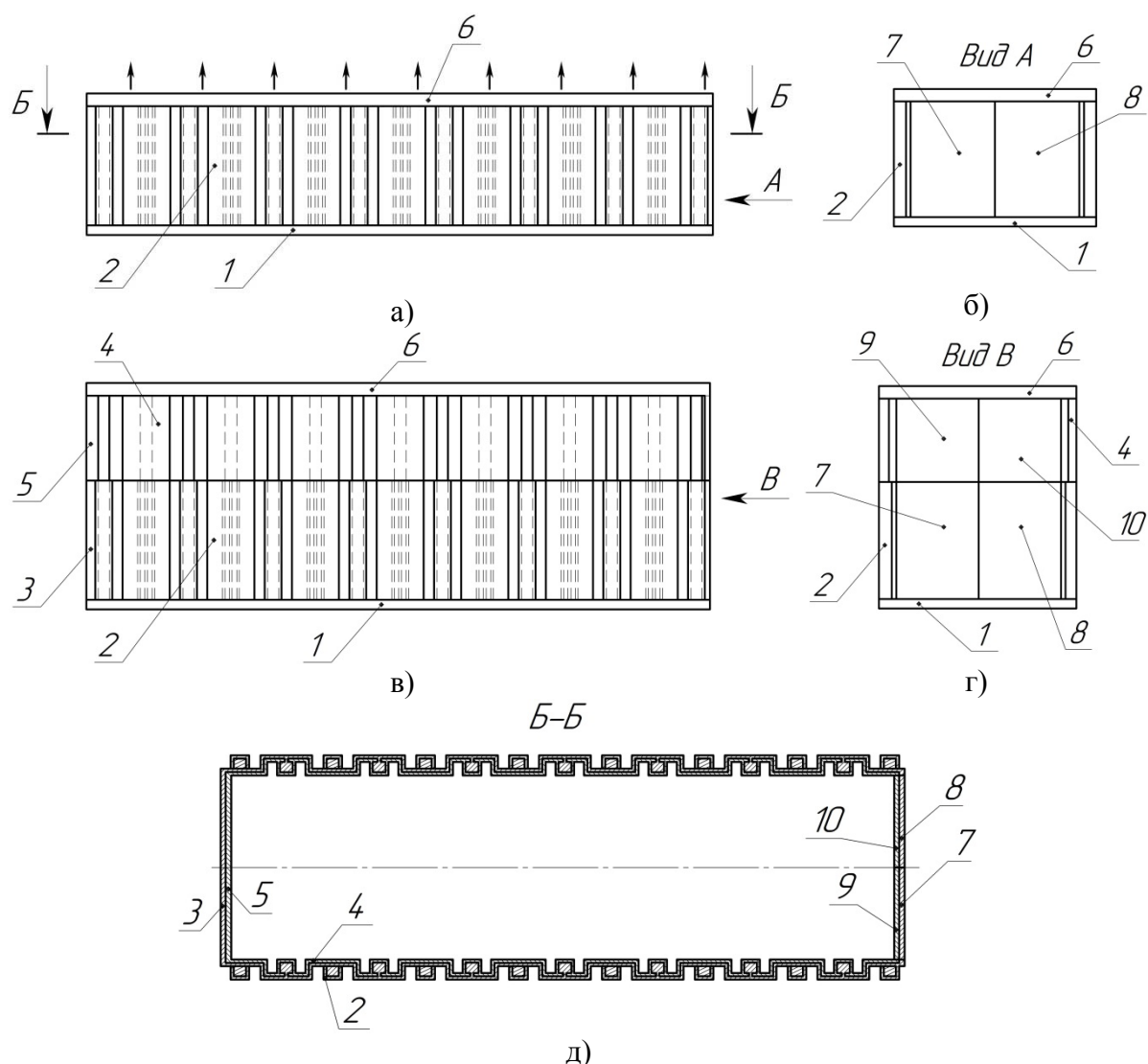


Рисунок 3 – Розсувний контейнер з функцією розсування у вертикальному напрямку:
а) у складеному вигляді; б) вид по А у складеному вигляді; в) у розкладеному вигляді;
г) вид по В у розкладеному вигляді; д) вид по Б

Джерело: розроблено авторами

Розсувний контейнер з функцією розсування у вертикальному напрямку (рис. 3) виконаний у вигляді днища 1, нижніх частин бічних бортів 2 і переднього борта 3, верхніх частин бічних бортів 4 і переднього борта 5, даху 6, нижніх лівої 7 та правої 8 частини заднього борта, а також верхніх лівої 9 та правої 10 частини заднього борта. До днища 1 жорстко закріплені нижні частини бічних бортів 2 та передній борт 3, відповідно у яких з можливістю осьового пересування з метою зміни висоти контейнера закріплені верхні частини бічних бортів 4 та передній борт 5. Верхні частини бічних бортів 4 та передній борт 5 жорстко закріплені до даху 6. Нижні ліва 7 та права 8 частини заднього борта, а також верхні ліва 9 та права 10 частини заднього борта, відповідно закріплені з можливістю здійснення колового провертання (на завісах) до нижніх та верхніх частин бічних бортів 2 і 4.

Використання розсувного контейнера з функцією розсування у вертикальному напрямку у складеному (рис. 3 а і рис. 3.б) чи розкладеному (рис. 3 в і рис. 3.г) положеннях. Для приведення у розкладений стан проводиться осьове зміщення верхніх частин бічних бортів 4, переднього борта 5, лівої 9 та правої 10 частин заднього борта вгору відносно нижніх частин бічних бортів 2, переднього борта 3, лівої 7 та правої 8 частин заднього борта. Далі проводиться їх фіксація нижніх та верхніх частин бортів на необхідній величині відомим методом.

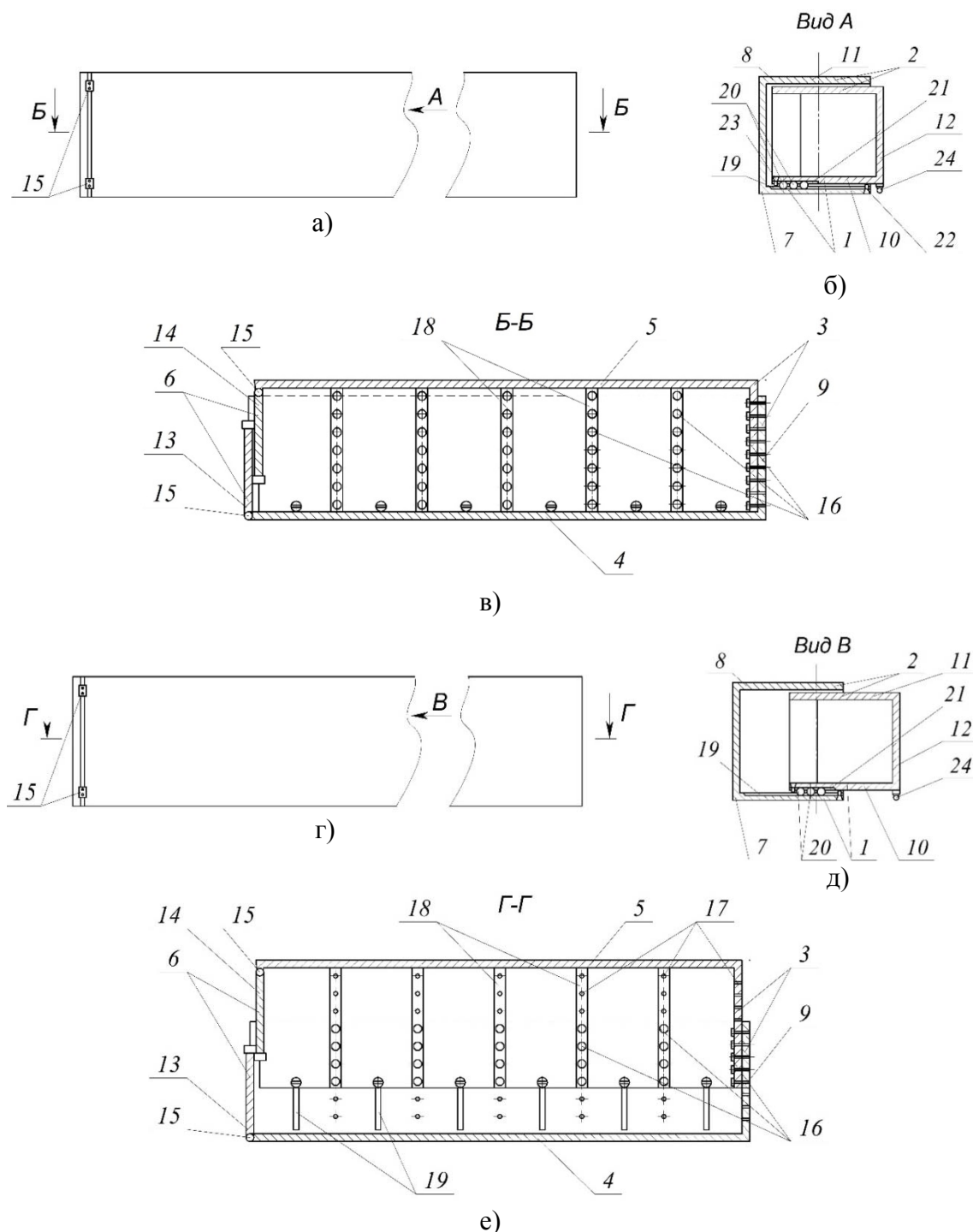


Рисунок 4 – Розсувний контейнер з функцією розсування у горизонтальному напрямку:

а) у складеному вигляді; б) вид по А у складеному вигляді; в) вид по Б-Б у складеному вигляді; г) у розкладеному вигляді; д) вид по В у розкладеному вигляді; е) вид по Г-Г у розкладеному вигляді
Джерело: розроблено авторами

Розсувний контейнер для автомобільних перевезень з функцією розсування у горизонтальному напрямку (рис. 4) виконаний у вигляді днища 1, даху 2, переднього борта 3, лівого бічного борта 4, правого бічного борта 5 та заднього борта 6. Днище 1, дах 2 та передній борт 3 складаються із двох частин, лівої та правої. Ліва частина днища 7, ліва частина даху 8 і ліва частина переднього борта 9 жорстко закріплені до лівого бічного борта 4, а права частина днища 10, права частина даху 11 і права частина переднього борта 12 жорстко закріплені до правого бічного борта 5. Права частина днища 10, права частина даху 11 і права частина переднього борта 12 знаходяться з можливістю осьового зміщення, відповідно, у лівій частині днища 7, лівій частині даху 8 і лівій частині переднього борта 9. Задній борт 6 виконаний у вигляді лівих дверей 13 і правих дверей 14, які встановлено на завісах 15 з можливістю здійснення колового зміщення. Зависи 15 закріплені на торцевих частинах лівого бічного борта 4 та правого бічного борта 5. Причому ліві двері 13 при закриванні накладаються на праві двері 14. Ліва частина днища 7 та права частини днища 10, ліва частина даху 8 і права частина даху 11, а також ліва частина переднього борта 9 та права частина переднього борта 12 жорстко з'єднані між собою з допомогою болтових з'єднань 16, які розміщені у кріпильних отворах 17, що періодично виконані на певній відстані між собою в каркасах 18 лівої частини днища 7 та правої частини днища 10, лівої частини даху 8 і правої частини даху 11, а також лівої частини переднього борта 9 та правої частини переднього борта 12. На верхній торцевій поверхні лівої частини днища 7 у повздовжніх пазах 19 знаходяться кульки 20, які контактують із нижньою торцевою поверхнею повздовжніх пазів 21 правої частини днища 10. Довжина осьового зміщення кульок 20 у повздовжніх пазах 19 і 21 обмежена стопорними гвинтами 22 і 23, які, відповідно, загвинчено у повздовжні пази 19 і 21 лівої частини днища 7 та правої частини днища 10. На нижній торцевій поверхні правого бічного борта 5 закріплено з можливістю провертання опорні колеса 24.

Використання розсувного контейнера з функцією розсування у горизонтальному напрямку (рис. 4) здійснюється наступним чином. Якщо немає потреби у значних обсягах накопичення та перевезення габаритних вантажів, то розсувний контейнер для автомобільних перевезень з функцією розсування у горизонтальному напрямку використовується у складеному вигляді, як зображено на фіг. 1. Якщо виникає потреба у накопиченні та перевезенні більш габаритних вантажів, то розсувний контейнер для автомобільних перевезень з функцією розсування у горизонтальному напрямку використовується у розкладеному вигляді, як зображено на фіг. 2. Для його розкладання проводиться осьове зміщення на необхідну величину одних відносно інших правої частини днища 10, правої частини даху 11 і правої частини переднього борта 12 відносно лівої частини днища 7, лівої частини даху 8 і лівої частини переднього борта 9, з подальшим жорстким з'єднанням між собою з допомогою болтових з'єднань 16 у кріпильних отворах 17 каркасів 18.

Дослідження напружено-деформованого стану розсувних елементів (стінок) розсувних контейнерів проводилось за методикою, представленою у [1, 5, 14]. Результати розрахунків представлені на рис. 5. Дослідження показало, що напруження в розкладених контейнерах знаходяться в діапазоні сотень МПа і є на порядок більшими, ніж у складених контейнерах. Тому, є зміст додавати додаткові перемички. Зокрема, при проведеному розрахунку напружено-деформованого стану розсувного контейнера розміром 5х2х1м (рис. 5) додаткові перемички доцільно додати в зоні четвертого та восьмого направляючого елемента.

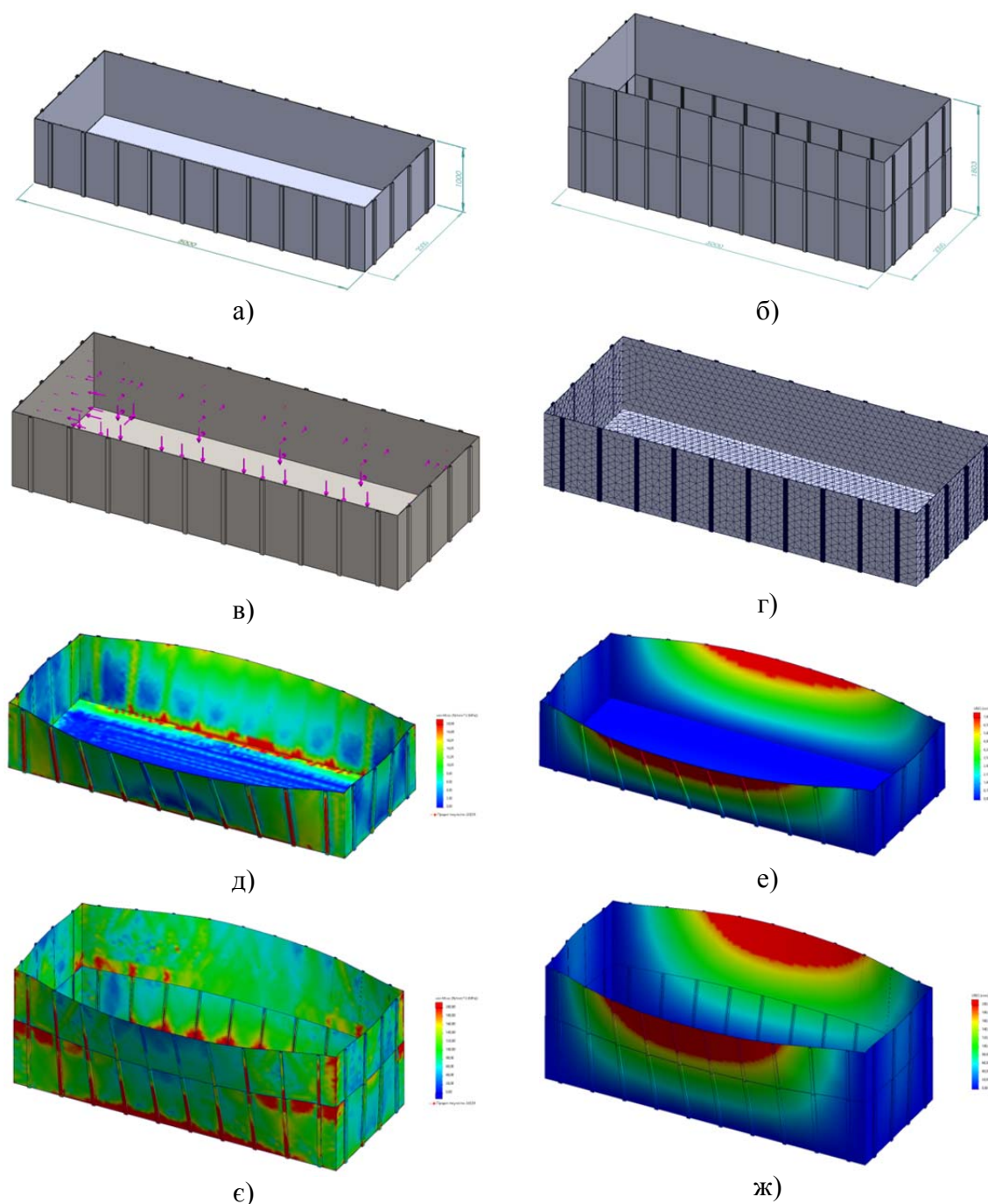


Рисунок 5 – Схеми з дослідження напружено-деформованого стану розсувного контейнера розміром 5х2х1м: а) складений вигляд; б) розкладений вигляд; в) з гідростатичним розподілом навантаження по стінках у 100000 Н (10 т); г) розмір елементів кінцево-елементної сітки – 100 мм для стінки та 5 мм для направляючих елементів; д) статичні напруження, що діють на елементи в складеному вигляді; е) переміщення верхніх кромek елементів контейнера в складеному вигляді (> 10 мм); є) статичні напруження, що діють на елементи у розкладеному вигляді; ж) переміщення верхніх кромek елементів контейнера у розкладеному вигляді (> 100 мм)

Джерело: розроблено авторами

Висновок. Проведено структурно-схемний синтез трансформаційних контейнерів. При використанні морфологічного аналізу побудовано морфологічну таблицю ознак конструктивних елементів трансформаційних контейнерів і модель механічної системи «Трансформаційний контейнер». Проведений експертний аналіз

дозволив обрати певні морфологічні ознаки трансформаційних контейнерів: тип і геометрична форма стінок, днища, даху та дверей: конструкція, розміщення листів, товщина листа, отвори для кріплення, геометрична форма листів, наявність та геометрична конфігурація ребер жорсткості; каркаси (бічні та кутові): конструкція; форма; отвори для кріплення; з'єднання на основі: стикове, таврове; спосіб з'єднання елементів: нерухоме і рухоме. Це дозволило отримати відповідну кількість варіантів конструкцій трансформаційних контейнерів з різними конструктивними ознаками, і, зокрема, з функціями розсування у вертикальному та горизонтальному напрямках, що можуть забезпечити ефективне перевезення габаритних вантажів чи військової техніки в закритому або замаскованому стані автотранспортними засобами.

Також було проведено дослідження напружено-деформованого стану розсувних елементів (стінок) розсувних контейнерів, яке показало, що напруження в розкладених контейнерах знаходяться в діапазоні сотень МПа і є на порядок більшими, ніж у складених контейнерах. Тому, є зміст додавати додаткові перемички. Зокрема, при проведеному розрахунку напружено-деформованого стану розсувного контейнера розміром 5х2х1м додаткові перемички доцільно додати в зоні четвертого та восьмого направляючого елемента.

Список літератури

1. Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків М. Я., Капський Д. В. Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричепа вантажного автомобіля. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон: Херсонська державна морська академія. 2021. № 1 (24). С 93-103.
2. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / Гевко І.Б. та ін., – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 276 с.
3. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Гевко І.Б., та ін., – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. 2021. 544 с.
4. Liashuk O., Hevko I., Hud V., Khoroshun R., Hevko B., Matviishyn A., Sipravska M. Stands for car suspension research. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, No. 26 (2022). С 93-103.
5. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023, 118, 161-172. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>.
6. Sokil B., Lyashuk O., Sokil M., Vovk Y., Lebid I., Hevko I., Levkovych M., Khoroshun R., Matviyishyn. Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension A.. - *COMMUNICATIONS*, 2022. Vol. 24, № 3, P. 247-258.
7. Lyashuk O., Aulin V., Rohatynskiy R., Gevko I., Hupka A., Mironov D., Martyniuk V., Lutsyk A., Denysiuk N. Mathematical modelling of hybrid powertrain systems for improved energy efficiency. *COMMUNICATIONS*, 2025. Vol. 27, № 2, P. 36-52.
8. Rohatynskiy R., Gevko I., Lyashuk O., Aulin V., Tson O., Nikerui Y., Horkunenko A., Serilko L., Gevko B., Mosiy O. Substantiation of parameters of cargo movement by car rope systems. *COMMUNICATIONS*, 2024.- Vol. 26, № 4, P. 225-236.
9. Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Хорошун Р.В., Романюк О.Б. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : Херсонська державна морська академія. 2021. № 2 (25). С. 72–81.
10. Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Хорошун Р.В., Шевчук В.В. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. *Вісник ЛДУБЖД*. Львів, 2023. № 28. С. 115–122.
11. Ляшук О.Л., Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Хорошун Р.В., Кашканова Г.Г., Антонюк О.П. Модель проходження повороту автомобілем. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2023. Випуск №2(18) С. 87-93.
12. Міронов Д.В., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Гупка А.Б., Слободян Л.М., Гевко Б.Р., Хорошун Р.В. Розробка моделі узагальненого діагностичного показника технічного стану ходової частини автомобіля з використанням математичних методів теорії планування експерименту. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. № 2 (21). Луцьк: 2023. С. 135 – 144.
13. Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Левкович М.Г., Клендій В.М., Гупка В.В. Структурний синтез гальмівних систем з техніко-економічним обґрунтуванням. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Вип. 71. Луцьк. Ред.-вид. відділ ЛТНУ. 2021. С. 228-233.

14. Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Левкович М.Г., Тесля В.О. Структурний синтез кузова напівпричепа вантажного автомобіля з техніко-економічним обґрунтуванням. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36) II. С. 25-33.
15. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Рогатинський Р.М., Матвійшин А.Й., Хорошун Р.В. Синтез підвіски автотранспортних засобів. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник». Кропивницький*, 2023. Випуск №8(39) I. С. 153-164.
16. Розміри та ваги морських контейнерів [Електронний ресурс]. – Hz-Containers. – Режим доступу: <https://hz-containers.com/uk/%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%B8-%D1%82%D0%B0-%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D0%B8-%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D1%85-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD/> (дата звернення: 07.01.2026).
17. Розсувний контейнер : пат. 155042 Україна, МПК В60Р 1/26 . № u202303613; опубл. 10.01.2024. Бюл. № 2/2024.
18. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Довбуш Т.А., Хорошун Р.В., Гевко І.Б. Проектування трансформаційних причепів для оптимізації площ зберігання в автотранспортних підприємствах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький*, 2025. Випуск №12(43) II. С. 236-243.

References

1. Liashuk O. L., Hevko I. B., Levkovych M. H., Vovk Yu. Ya., Stashkiv M. Ya., Kapskyi D. V. Study of the stress-strain state of the bottom of a semi-trailer truck body. Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy: scientific journal. – Kherson: Kherson State Maritime Academy, 2021. No. 1 (24). p. 93–103.
2. Technical and economic justification of engineering solutions at service stations and motor transport enterprises: Textbook . compilers: Hevko I.B., Liashuk O.L., Lutsykyi I.V., Plekan U.M., Klendii V.M. Ternopil: Ivan Pul'uj Ternopil National Technical University Publishing House, 2021. 276 p.
3. Fundamentals of Automobile Production and Repair Technology: Textbook. Compiled by: Hevko I.B., Rohatynskyi R.M., Liashuk O.L., Levkovych M.H., Hud V.Z., Stashkiv M.Ya., Sipravska M.D. Ternopil: Ivan Pul'uj Ternopil National Technical University Publishing House, 2021. 544 p.
4. Liashuk O., Hevko I., Hud V., Khoroshun R., Hevko B., Matviishyn A., Sipravska M. Stands for car suspension research. Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research, No. 26 (2022). p. 93-103.
5. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023, 118, p. 161-172. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>.
6. Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. B. Sokil, O. Lyashuk, M. Sokil, Y. Vovk, I. Lebid, I. Hevko, M. Levkovych, R. Khoroshun, A. Matviyishyn. - COMMUNICATIONS, 2022. - Vol. 24, № 3, p. 247-258.
7. Mathematical modelling of hybrid powertrain systems for improved energy efficiency. O. Lyashuk, V. Aulin, R. Rohatynskyi, I. Gevko, A. Hupka, D. Mironov, V. Martyniuk, A. Lutsyk, N. Denysiuk. - COMMUNICATIONS, 2025. - Vol. 27, № 2, P. 36-52.
8. Substantiation of parameters of cargo movement by car rope systems. R. Rohatynskyi, I. Gevko, O. Lyashuk, V. Aulin, O. Tson, Y. Nikerui, A. Horkunenko, L. Serilko, B. Gevko, O. Mosiy. - COMMUNICATIONS, 2024. - Vol. 26, № 4, p. 225-236.
9. Rohatynskyi R.M., Liashuk O.L., Hevko I.B., Khoroshun R.V., Romaniuk O.B. Model of vehicle motion on a curved track. Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy: scientific journal. Kherson: Kherson State Maritime Academy, 2021. No. 2 (25). p. 72–81.
10. Rohatynskyi R.M., Liashuk O.L., Hevko I.B., Khoroshun R.V., Shevchuk V.V. Model of vehicle motion on a curved track. Bulletin of the Lviv State University of Railway Transport. Lviv, 2023. No. 28. p. 115–122.
11. Liashuk O.L., Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Khoroshun R.V., Kashkanova H.H., Antoniuk O.P. Model of a car turning. Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. Vinnytsia, 2023. Issue No. 2(18) pp. 87-93.
12. Mironov D.V., Liashuk O.L., Hevko I.B., Hupka A.B., Slobodian L.M., Hevko B.R., Khoroshun R.V. The development of a model for a generalized diagnostic indicator of the technical condition of a vehicle's running gear using mathematical methods of experimental design theory. Modern technologies in mechanical engineering and transport. No. 2 (21). Lutsk: 2023. p. 135–144.
13. Hevko I.B., Rohatynskyi R.M., Levkovych M.H., Klendii V.M., Hupka V.V. Structural synthesis of braking systems with technical and economic justification . Interuniversity collection “Scientific Notes.” Issue 71. Lutsk. Edited and published by the LTNU Publishing Department. 2021. p. 228–233.
14. Hevko I.B., Rohatynskyi R.M., Liashuk O.L., Levkovych M.H., Teslia V.O. Structural synthesis of a semi-trailer truck body with technical and economic justification. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2022. Issue 5(36) II. p. 25–33.

15. Hevko Iv. B., Liashuk O. L., Rohatynskyi R. M., Matviishyn A. Y., Khoroshun R. V. Synthesis of suspension systems of motor vehicles. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Kropyvnytskyi, 2023. Issue No. 8(39), Part I. P. 153–164.
16. Dimensions and weights of shipping containers [Electronic resource]. – Hz-Containers. – Available at: <https://hz-containers.com/uk/%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%B8-%D1%82%D0%B0-%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D0%B8-%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D1%85-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD/> (accessed: 07.01.2026).
17. Sliding container : Pat. 155042 Ukraine, IPC B60P 1/26. No. u202303613; published 10.01.2024. Bulletin No. 2/2024.
18. Hevko Iv. B., Liashuk O. L., Dovbush T. A., Khoroshun R. V., Hevko I. H. Design of transformational trailers for optimization of storage areas at motor transport enterprises. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Kropyvnytskyi, 2025. Issue No. 12(43), Part II. P. 236–243.

Ivan Hevko, Prof., Dr. Tech. Sci., **Mykola Stashkiy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Taras Dovbush**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykhailo Levkovich**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Hevko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Berezhany Professional College of the National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Berezhany, Ukraine

Design of Transformation Containers for the Purpose of Efficient Transportation of Oversized Cargo by Motor Vehicles

The current state of cargo transportation is characterized by significant dynamism and widespread use of the latest and most modernized mechanical systems, and this largely applies to motor vehicles and other specialized equipment, as well as bodies, trailers and containers. The problem of creating containers of non-standard sizes becomes quite relevant when it is necessary to transport oversized cargo and generally increase the efficiency of logistics processes. Quite often, there is a need to increase the overall dimensions of containers to match their cargo dimensions, which necessitates the search for such technical solutions. This problem has become especially important during hostilities, when there is an increased need for transportation of military equipment in a closed or camouflaged state. Therefore, the above-mentioned challenges necessitate the intensification of the search and development of innovative, improved designs of containers of non-standard sizes. Priority should be given to solutions that provide for the functionality of transforming their dimensions by sliding, sliding or other modifications.

The increase in freight traffic, caused by population growth and technological development, creates new, more stringent requirements for freight vehicles. Despite the fact that the scientific community is actively working on methods for designing and synthesizing effective structures of mechanical systems for effective logistics, there remains a certain need for further research into the design of multifunctional non-standard containers with the function of transforming their dimensions by sliding, sliding or other modifications, for transportation by road and other means. Such research is widely carried out using various methods and synthesis and, in particular, with the method of morphological analysis using hierarchical grouping to obtain effective design alternatives. However, the analysis of existing research reveals a number of unresolved issues that require further study. This is necessary for the search and design of multifunctional non-standard containers for road and other transportation. The purpose of the work is to design transformation containers for the effective transportation of oversized cargo by motor vehicles.

The work carried out a structural and schematic synthesis of transformation containers. Using morphological analysis, a morphological table of features of structural elements of transformation containers and a model of the mechanical system “Transformation container” were built. The expert analysis made it possible to select certain morphological features of transformation containers: type and geometric shape of walls, bottom, roof and doors: design, placement of sheets, sheet thickness, holes for fastening, geometric shape of sheets, presence and geometric configuration of stiffeners; frames (lateral and corner): design; shape; holes for fastening; connection on the base: butt, T-shaped; method of connecting elements: fixed and movable. This made it possible to obtain a corresponding number of variants of transformation container designs with different structural features, and, in particular, with functions of sliding in vertical and horizontal directions, which can ensure effective transportation of oversized cargo or military equipment in a closed or camouflaged state by motor vehicles.

A study of the stress-strain state of the sliding elements (walls) of sliding containers was also conducted, which showed that the stresses in the unfolded containers are in the range of hundreds of MPa and are an order of magnitude higher than in the folded containers. Therefore, it makes sense to add additional jumpers. In particular, when calculating the stress-strain state of a sliding container measuring 5x2x1m, it is advisable to add additional jumpers in the area of the fourth and eighth guide elements.

design, morphological analysis, structural-schematic synthesis, sliding, container, vehicle

Одержано (Received) 07.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 10.02.2026

Д.В. Голуб, доц., канд. техн. наук, О.Ю. Ювженко, Р.П. Кічура

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: Dimchik529@gmail.com, 40101001@gmail.com, romnik83@ukr.net

Визначення інтенсивності зміни показників ефективності експлуатації вантажних автомобілів різних марок залежно від напрацювання в умовах агропромислового виробництва

Розглянуто проблему підвищення ефективності експлуатації парку вантажних автомобілів різних марок, що використовуються для забезпечення виробничого процесу підприємств агропромислового виробництва. Виявлено, що у сучасних умовах функціонування значну частку рухомого складу таких підприємств становлять вантажні автомобілі зарубіжного виробництва, які часто мають значний початковий пробіг до початку експлуатації на території країни. А отже за умов зростання конкуренції у сфері вантажних перевезень та обмеженості фінансових ресурсів підприємств аграрної сфери особливої актуальності набуває завдання зниження експлуатаційних витрат та підвищення ефективності використання рухомого складу. Тому раціональне формування структури автопарку та обґрунтований вибір марок і моделей вантажних автомобілів дозволять підвищити ефективність транспортного обслуговування виробничих процесів агропромислового сектору.

вантажні автомобілі, агропромислове виробництво, ефективність експлуатації, технічний стан, напрацювання, економічний ефект, транспортний процес, парк рухомого складу, технічна готовність, витрати на експлуатацію

Постановка проблеми. На сьогоднішній день в структурі вантажних автомобільних перевезень агропромислового виробництва (АПВ) значну долю займають автомобілі зарубіжного виробництва, у яких до початку експлуатації в країні є початковий пробіг. З урахуванням щорічного зростання конкуренції в області вантажоперевезень, одним з найбільш важливих напрямів підвищення ефективності роботи парку вантажних автомобілів АПВ, є скорочення витрат на їх експлуатацію.

Вимоги сьогодення вказують на те, що підприємства АПВ повинні самі визначати свої довгострокові цілі розвитку транспортного обслуговування і стратегію їх досягнення. У цих умовах функціонування значущість витрат таких підприємств зростає та з'явилися стимули для їх зниження. Підтримка оптимального рівня витрат є основною умовою для забезпечення ефективної діяльності парку вантажних автомобілів АПВ, оскільки зростання доходів обмежене ринковим попитом споживачів.

Однією з проблем сучасних підприємств АПВ є незадовільний рівень організації процесів експлуатації парку вантажних автомобілів, який як правило є різноплановим та складається з автомобілів різних марок. Також важливу роль відіграє низька якість процесів планування і проведення технічних дій щодо рухомого складу для підтримки і відновлення працездатності [1, 8, 10, 11, 18].

На ринку вантажних автомобілів, що задіяні в обслуговуванні транспортного процесу АПВ склалася ситуація невизначеності вибору, що залежить від вартості нового автомобіля, як правило сідельного тягача, яка варіюється від 100...160 тис. євро для нових транспортних засобів і 35...70 тис. євро - для вживаних 5...7 років з пробігом від 400...700 тис. км. і більше. Обґрунтованість таких капіталовкладень відсутня,

оскільки у користувача немає інформації про їх ефективність [3, 8, 9]. Відомий факт більшої надійності автомобілів іноземного виробництва в порівнянні з вітчизняними [2, 4, 7]. Проте не менш відомий факт і більшої вартості запасних частин і матеріалів іноземної техніки, а також вартості технічного обслуговування (ТО) [5, 6, 8, 17, 18]. В залежності від умов функціонування та завдань АПВ експлуатація вантажних автомобілів іноземного виробництва не завжди ефективніша в порівнянні з вітчизняними аналогами, які в досить великій кількості теж представлені в автопарках таких підприємств [14, 16]. В зв'язку з цим необхідною є розробка комплексних показників, які можуть оцінювати ефективність рухомого складу різних марок при його придбанні для обслуговування виробничого процесу АПВ, а також в подальшій його експлуатації.

Внаслідок зміни технічного стану вантажних автомобілів АПВ в залежності від напрацювання, кількість необхідного часу для підтримки їх працездатного стану поступово збільшується. Із зростанням напрацювання з початку експлуатації необхідне виконання складних, трудомістких робіт по ремонту вузлів і агрегатів таких автомобілів, в зв'язку з чим вони все частіше можуть простоювати в обслуговуванні і ремонті [10, 11, 13, 15]. В результаті робочий час, впродовж якого може виконуватися виробничий транспортний процес на підприємстві, також скорочується. Тому скорочуються і пробіги автомобілів.

Для підвищення міри доцільності утримування на підприємстві АПВ рухомого складу вантажних автомобілів необхідно проводити різні заходи по зниженню сумарної кількості витрат на одиницю транспортної роботи, що проводиться. Зміна ефективності експлуатації вантажних автомобілів в умовах АПВ від напрацювання є недостатньо вивченим процесом. Наслідком цього є те, що на сьогоднішній день недостатньо вирішено завдання вибору раціональної структури парку таких автомобілів з урахуванням зміни ефективності їх експлуатації залежно від напрацювання. Інтенсивне використання парку вантажних автомобілів різних марок вимагає оцінки зміни ефективності експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У технічній експлуатації автомобілів існує обґрунтована думка погіршення показників їх ефективності в залежності від напрацювання [5, 6, 11, 15, 18]. Любий парк вантажних автомобілів комплексно старіє з підвищенням сумарного пробігу. Відбувається зниження коефіцієнту технічної готовності вантажних автомобілів, оскільки збільшуються простой в технічному обслуговуванні і ремонті (ТО і Р) з підвищенням напрацювання з початку експлуатації. При тривалому функціонуванні вантажних автомобілів різних марок в умовах АПВ відчутно падає основний показник їх безвідмовності, а саме напрацювання на відмову. Для підтримки їх працездатності необхідна все більша кількість запасних частин внаслідок аварійних відмов і відповідних дорогих поломок систем особливо автомобілів вітчизняного виробництва. Це призводить до підвищення рівня витрат на експлуатацію парку вантажних автомобілів в АПВ. Повертаючись до основ теорії надійності, необхідно відмітити період нормальної експлуатації вантажних автомобілів, який характеризується відносною постійністю в часі показників їх технічної експлуатації [1, 4, 5, 10, 13, 15, 18]. Знос більшості деталей вантажних автомобілів в АПВ має мінімальну величину, а кількість відмов, що віднесена до періоду напрацювання - величину, близьку до незмінної. Робота, що виконується рухомим складом буде легко прогнозованою, оскільки коефіцієнт технічної готовності таких автомобілів також відрізнятиметься постійністю його значення в часі.

Вивчаючи стан вантажних автомобілів з початку експлуатації в умовах експлуатації АПВ до його остаточного списання, функція матиме експоненціальну залежність [12]. Це пов'язано з тим, що з напрацюванням стан вузлів і агрегатів

автомобілів змінюватиметься на стільки, що це приведе до відчутного погіршення показників їх технічної експлуатації в галузі, а значить і до економічної неефективності функціонування парку рухомого складу. Для того, щоб не досягати залежності такого виду, необхідно своєчасно виконувати додаткові роботи, що більше стосуються організаційних питань технічної експлуатації вантажних автомобілів в АПВ. Таким чином буде досягнута фіксація значення комплексу показників, що оцінюють ефективність їх застосування. Тому у той момент, коли експоненціальна залежність змінює свою інтенсивність, необхідно вирішувати питання щодо виконання або додаткових робіт по заміні деталей, вузлів і агрегатів, або готуватися до заміни вантажного автомобіля на інший. Визначити конкретні рамки, в межах яких необхідно виконувати відповідні заміни, можна з прив'язкою до основ теорії надійності автомобілів.

Для систем вантажних автомобілів, що безпосередньо впливають на безпеку управління, допустима ймовірність безвідмовної роботи може коливатися в межах 0,90...0,98 %. Для інших вузлів і агрегатів допустимими є значення в діапазоні 0,85...0,90 % [15]. Таким чином, з урахуванням поступового старіння вантажного автомобіля з його напрацюванням в умовах АПВ, слід визначити деяке значення цього показника, яке при його досягненні сигналізуватиме про необхідність тієї або іншої дії. Є інший підхід за оцінкою надійності автомобіля. Основним показником довговічності, як основної властивості надійності, є γ -відсотковий ресурс. Його допустиме значення також вказується в основах технічної експлуатації автомобілів та може варіюватися залежно від умов і особливостей функціонування рухомого складу, проте зазвичай знаходиться в межах 80...95 % [15]. Застосовуючи аналогічний спосіб, з урахуванням можливості старіння техніки, а значить і зміни її показника довговічності, можна також проводити планування робіт по відновленню стану систем через його обмеження. Причому воно може бути виконане не лише через мінімальне значення відсотка, але і через призначення конкретного напрацювання, впродовж якого виконуватиметься вказана умова.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка комплексного підходу щодо оцінки ефективності експлуатації вантажних автомобілів різних марок з урахуванням їх напрацювання в умовах агропромислового виробництва на основі запропонованих показників, що дозволяє визначити вплив зміни їх технічного стану на продуктивність функціонування та обґрунтовану подальшу оптимізацію парку.

Виклад основного матеріалу.

Для оцінки ефективності експлуатації конкретної марки вантажного автомобіля в АПВ, необхідно враховувати витрати на придбання нової одиниці транспортного засобу, а також деяку компенсацію витрат за рахунок продажу автомобіля, що відпрацював свій ресурс. Відомо, що з плином напрацювання вартість вантажного автомобіля знижується:

$$B_{авт} = F_{B_{авт}}(x), \quad (1)$$

де $F_{B_{авт}}$ - функція зміни вартості автомобіля з напрацюванням; x - напрацювання, років експлуатації або км пробігу.

Залежність зміни вартості $F_{B_{авт}}$ носить експоненціальний характер [8]. Для отримання залежності знадобиться вивчення вартості рухомого складу від напрацювання в АПВ. Встановлення вартості вантажного автомобіля на n -му році експлуатації можна виконувати з урахуванням існуючих методик за оцінкою залишкової вартості [16].

Запропоновано ввести коефіцієнт зміни вартості вантажного автомобіля в залежності від напрацювання у мовах АПВ:

$$K_{B_{авт}}^n = \frac{B_{авт}^n}{B_{авт}^1}, \quad (2)$$

де $B_{авт}^1$, $B_{авт}^n$ - ринкова вартість вантажного автомобіля відповідно на 1-му і n -му році експлуатації, грн.

Продуктивність вантажних автомобілів змінюється залежно від віку, тому в умовах АПВ виконується заміна рухомого складу з досягненням автотранспортними засобами граничного стану. Зміна продуктивності на n -му році експлуатації Q^n можна виразити через коефіцієнт зміни продуктивності вантажного автомобіля:

$$K_Q^n = \frac{Q_{авт}^n}{Q_{авт}^1}, \quad (3)$$

де $Q_{авт}^1$, $Q_{авт}^n$ - продуктивність вантажного автомобіля відповідно на 1-му і n -му році експлуатації, т-км.

Відомо, що з часом напрацювання технічний стан вантажних автомобілів безперервно змінюється, і з досягненням деякого пробігу починають відмовляти їх різні складні системи, що вимагають відповідного дорогого ремонту і замін елементів. Зміна собівартості транспортного процесу в умовах АПВ пов'язана зі зниженням витрат на ремонт застарілої техніки, яку можна виразити через коефіцієнт зміни собівартості перевезень, що характеризуватиме величину витрат на підтримку працездатності [15]:

$$K_{B_Q}^n = \frac{B_{нід}^n}{B_{нід}^1}, \quad (4)$$

де B - витрати відповідно на 1-му і n -му році експлуатації, які залежать від напрацювання вантажних автомобілів, грн.

Також одним з комплексних показників, що може оцінити ефективність експлуатації вантажних автомобілів в АПВ, є економічний ефект від експлуатації. Його питому величину E_{num} , у співвідношенні до напрацювання S можна визначити за наступною формулою, представленої у вигляді цільової функції:

$$E_{num} = f(P, B, S) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Результат діяльності від експлуатації вантажного автомобіля в АПВ можна визначити за залежністю:

$$P = Q_{авт} T, \quad (5)$$

де $Q_{авт}$ - продуктивність вантажного автомобіля, т-км; T - тарифна ставка на одиницю транспортної роботи, грн./т-км.

Витрати на забезпечення результату діяльності від експлуатації вантажного автомобіля в АПВ можна визначити за залежністю:

$$B = B_{нід} + B_{пал} + B_a + B_n, \quad (6)$$

де $B_{нід}$ - витрати на підтримку працездатності вантажних автомобілів, грн.; $B_{пал}$ - витрати на паливо, грн.; B_a - витрати на амортизацію, грн.; B_n - витрати на податки, грн.

Замінюючи складові в (4) по формулах (5) - (6), отримуємо цільову функцію в розгорнутому вигляді:

$$E_{num} = \frac{Q_{авт} T - B_{нід} - B_{пал} - B_a - B_n}{S}. \quad (7)$$

Розглянемо складові результату діяльності вантажних автомобілів в АПВ. Коефіцієнт використання вантажопідйомності автомобілів γ залежить від організаційних факторів, тому його значення можна приймати постійним всередині підприємств АПВ.

Коефіцієнт випуску вантажних автомобілів $\alpha_{\text{вип}}$ залежить від організаційних і технічних факторів [8, 14-17], і для того щоб виокремити з даного комплексного показника тільки технічну характеристику процесу їх експлуатації, необхідно перейти до технічного показника - коефіцієнта технічної готовності α_{tex} [15].

$$\alpha_{\text{вип}} = \alpha_{\text{tex}} (1 - \alpha_{\text{орг}}), \quad (8)$$

де $\alpha_{\text{орг}}$ - коефіцієнт, що враховує відношення кількості часу простою з організаційних причин до кількості днів циклу експлуатації.

Середньодобовий пробіг вантажних автомобілів $L_{\text{сд}}$ залежить від організаційних факторів на підприємстві АПВ. Коефіцієнт використання пробігу за їзду β є величиною, що безпосередньо залежить лише від організаційних факторів підприємства. Вантажопідйомність q вказується в технічних характеристиках рухомого складу і може варіюватися між моделями вантажних автомобілів при оновленні рухомого складу підприємства АПВ. Значення тарифу T встановлюється з урахуванням значень, що діють на ринку, і також не залежать від технічного стану вантажного автомобіля. Позначимо добуток організаційних факторів $\Phi_{\text{орг}}$ таким чином:

$$\Phi_{\text{орг}} = \gamma\beta(1 - \alpha_{\text{орг}}). \quad (9)$$

Для обліку зміни продуктивності з часом експлуатації рухомого складу запропоновано використати коефіцієнт фактичної продуктивності K_Q^n . Тоді з урахуванням того, що розглядається один вантажний автомобіль, значення вантажопідйомності q буде однаковим, також як і значення $\Phi_{\text{орг}}$.

Значення витрат включає лише одну складову, яке має залежність від технічного стану парку вантажних автомобілів в АПВ $B_{\text{ТЕ}}$. У свою чергу в цій складовій витрати на паливо $B_{\text{нал}}$ є незалежними від їх технічного стану за умови справності при експлуатації. Витрати на технічне обслуговування $B_{\text{ТО}}$ і поточний ремонт $B_{\text{пр}}$, а також витрати на запасні частини $B_{\text{зч}}$ і експлуатаційні матеріали $B_{\text{ем}}$ носять технічний характер, тому мають бути враховані при визначенні економічного ефекту. Витрати на амортизацію B_a і автомобільні шини $B_{\text{ш}}$ не залежать від технічного стану, проте можуть сильно варіюватися між різними марками вантажних автомобілів, тому повинні також враховуватися. Оскільки капітальні витрати $B_{\text{кан}}$, загальногосподарські витрати $B_{\text{зг}}$ і соціальні витрати $B_{\text{соц}}$ при заміні рухомого складу вантажних автомобілів в АПВ можна прийняти за постійні, то даними змінними можна знехтувати.

Витрати на поточний ремонт рухомого складу $B_{\text{пр}}$ залежать від технічного стану вантажного автомобіля і варіюються при відмінностях в умовах експлуатації. Залежно від надійності автомобіля інтенсивність наростання витрат може бути різною. Оскільки в період нормальної експлуатації швидкість зміни технічних параметрів близька до постійної, та зміна і надійності також буде лінійним залежно від напрацювання. Чим більше вантажний автомобіль простоюватиме в зонах ТО і Р, тим більше ресурсів знадобиться для його відновлення. Таким чином, витрати на підтримку працездатного стану мають безпосередню лінійну залежність від загального напрацювання транспортного засобу в АПВ. Якщо розглядати тільки період нормальної експлуатації, зміна показників якого є мінімально або близькою до нуля, то залежності буде властива лінійність наступного виду:

$$Y = \alpha \cdot x + b, \quad (10)$$

де Y - досліджуваний показник; x - напрацювання, км; α - коефіцієнт, що характеризує швидкість зміни показника; b - початкове значення досліджуваного показника.

Таким чином залежність сумарної вартості підтримки працездатного стану вантажних автомобілів в АПВ виглядатиме таким чином:

$$B_{n\text{до}} = I_{\epsilon} \cdot L + B_n, \quad (11)$$

де I_{ϵ} - інтенсивність зміни витрат для конкретної моделі вантажного автомобіля, грн./км; L - пробіг конкретної моделі вантажного автомобіля, км; B_n - початкове значення витрат, грн.

Таким чином, отримавши дослідним шляхом значення зміщення функції відносно початку координат і параметр, що характеризує кут нахилу самої залежності, можна спрогнозувати подальший розвиток значень витрат на підтримку працездатності вантажних автомобілів в АПВ. Проте прогнозування можливо лише до закінчення інтервалу їх нормальної експлуатації. Якщо розглядати залежність показника на тому ж інтервалі напрацювання з більш високим значенням достовірності регресії, то будуть отримані функції полінома n -го ступеня виду:

$$Y = \alpha_1 \cdot x^n + \alpha_2 \cdot x^{n-1} + \alpha_3 \cdot x^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^2 + \alpha_n \cdot x + b. \quad (12)$$

Причому чим більше необхідна точність прогнозування, тим більше значення n . Проте підвищення значення n даватиме усе менше наближення регресійної моделі до кореляційних хмар. Тому для конкретних випадків слід виконувати визначення необхідного рівня достовірності функціональної залежності. Знову повертаючись до теоретичних основ технічної експлуатації вантажних автомобілів і оцінюючи міру зміни якісних показників на одиницю напрацювання, спостерігається залежність, яка є наближеною до прямолінійної. Отримувана варіація функції відносно середнього рівня тільки підтверджує, що прогнозування доцільніше виконувати за лінійним законом. Зміщення відносно середнього значення можливе як у бік пониження, так і підвищення внаслідок безпосередньої залежності функції від закону розподілу безвідмовності кожної конкретної деталі, що описується законом Гауса.

Застосування лінійної функції сильно спрощує як процес планування стану вантажного автомобіля при експлуатації в АПВ, так і виконання самого прогнозування, визначення відповідних значень коефіцієнтів, що характеризують зміщення функції відносно системи координат, а також її вид і тенденцію зміни з напрацюванням.

Для оцінки зміни витрат на підтримку працездатного стану вантажних автомобілів в АПВ при заміні введемо відповідний коефіцієнт K_{B_Q} :

$$K_{B_Q} = \frac{B_{n\text{до}}^n}{B_{n\text{до}}^{\bar{n}}}. \quad (13)$$

де $B_{n\text{до}}^{\bar{n}}$, $B_{n\text{до}}^n$ - відповідно базові та нові витрати на підтримку працездатності вантажних автомобілів, грн.

Значення витрат на амортизацію B_a рухомого складу визначається добутком річної амортизаційної ставки P_a , значення якої буде індивідуальним для кожного конкретної конкретної марки вантажного автомобіля, на кількість років експлуатації в АПВ t_e . На основі цього можна оцінити також коефіцієнти витрат на амортизацію K_a та витрат на податки K_n при заміні вантажного автомобіля в АПВ.

У результаті інші комплексні коефіцієнти показників по відношенню до значень базового вантажного автомобіля в АПВ визначатимуться по наступних формулах:

$$K_Q = \frac{q_n \cdot \alpha_{\text{тех } n}}{q_{\bar{o}} \cdot \alpha_{\text{тех } \bar{o}}}, \quad (14)$$

де $q_{\bar{o}}$, q_n - відповідно базова і нова вантажопідйомність вантажного автомобіля в АПВ, т; $\alpha_{\text{тех } \bar{o}}$, $\alpha_{\text{тех } n}$ - відповідно базове і нове значення коефіцієнту технічної готовності вантажного автомобіля в АПВ.

$$K_{B_{\text{авт}}} = \frac{B_{\text{авт}}^n}{B_{\text{авт}}^{\bar{o}}}, \quad (15)$$

де $B_{\text{авт}}^{\bar{o}}$, $B_{\text{авт}}^n$ - відповідно базова і нова ринкова вартість вантажного автомобіля в АПВ, грн.

Результуюча математична модель питомого економічного ефекту від експлуатації вантажного автомобіля в АПВ, матиме вигляд:

$$E_{\text{пит}} = \frac{TQ_{\text{авт}} K_Q^n - B_{\text{під}} K_{B_Q}^n - B_{\text{нал}} Q_{\text{нал}} - H_{\alpha^t} - B_n}{S_n \alpha_{\text{тех}}}. \quad (16)$$

де H_{α^t} - додаткові витрати, що виникають внаслідок зменшення використання вантажного автомобіля через організаційні простой в певному році експлуатації.

Оновлення парку автомобілів є одним способів підвищення ефективності його експлуатації [2-7, 11, 16, 17]. При цьому виникає проблема раціонального вибору вантажних автомобілів, експлуатація яких буде найбільш ефективною для умов АПВ. Питомий економічний ефект від заміни вантажного автомобіля в АПВ можна виразити наступною формулою:

$$E_3^{\text{пит}} = \frac{\Delta E_3}{S} = \frac{E_n - E_{\bar{o}}}{S} \rightarrow \max, \quad (17)$$

де ΔE_3 - різниця між економічними ефектами від експлуатації вантажних автомобілів при їх заміні, грн.; E_n , $E_{\bar{o}}$ - відповідно економічні ефекти від експлуатації нового і базового вантажних автомобілів, грн.

Обмеженням цільової функції є платоспроможність підприємств АПВ $\Pi_{\text{АПВ}}$ для придбання або заміни вантажних автомобілів, а також значення результату діяльності P , що перевищує значення витрат на забезпечення діяльності B_o , які залежать від напрацювання при пробігу вантажного автомобіля S , що має бути більше нуля:

$$\Pi_{\text{АПВ}} \geq B_{\text{авт}}, P(S) \geq B(S), S \geq 0. \quad (18)$$

В такому випадку математична модель питомого економічного ефекту від заміни базового вантажного автомобіля в АПВ прийме наступний вид:

$$E_3^{\text{пит}} = \frac{TQ^n (K_Q - 1) + C_{\text{нал}} F_{\text{нал}}^n (K_{\text{нал}} - 1) + H_a^n t_e^n (K_a - 1) + B_n^n (K_n - 1) + B_{\text{під}}^n (1 - K_{B_{\text{під}}})}{S_n \alpha_{\text{тех}}} \quad (19)$$

Величина питомого економічного ефекту $E_{\text{пит}}$, що визначається з попередніх залежностей, комплексно характеризує ефективність експлуатації вантажних автомобілів в АПВ. Максимізація питомого економічного ефекту від їх заміни $E_3^{\text{пит}}$ призводить до підвищення ефективності експлуатації парку рухомого складу, що є однією з основних цілей виробничого транспортного процесу в АПВ. Значення цього техніко-економічного показника дозволяє визначити найбільш ефективний алгоритм оновлення парку рухомого складу підприємств АПВ за рахунок визначення марки і

моделі вантажного автомобіля, що має найбільш високе значення ефекту E_{num} за відповідних умов експлуатації транспортних засобів.

Особливістю математичної моделі (19) є використання часткових техніко-експлуатаційних показників, що оцінюють ефективність експлуатації вантажних автомобілів в АПВ. Залежність дозволяє визначити питомий ефект від заміни базового вантажного автомобіля в АПВ з урахуванням віку, пробігу, технічних характеристик. Показники, що характеризують інтенсивність зміни технічного стану вантажних автомобілів, дозволяють оцінити, наскільки швидко транспортний засіб втрачає свою ефективність експлуатації залежно від напрацювання в умовах АПВ. Порівняння питомих економічних ефектів від експлуатації між собою дає можливість вибрати вантажний автомобіль, ефективність експлуатації якого змінюється з мінімальною інтенсивністю, а економічний ефект, що отримується від експлуатації автомобіля конкретної марки, буде найбільш високим.

В результаті проведених досліджень виконана оцінка інтенсивності зміни ефективності експлуатації базових марок вантажних автомобілів, що задіяні для забезпечення виробничого процесу підприємств АПВ Кіровоградської області від напрацювання по значеннях запропонованих коефіцієнтів. Вивчені зміни показників, які були запропоновані для комплексної оцінки технічного стану рухомого складу, а також його ефективності, показали, що вантажні автомобілі зарубіжного виробництва мають більш високі значення продуктивності, а також менші значення витрат на підтримку працездатності в АПВ. Проте, початкова вартість таких автомобілів дуже висока, а залежно від напрацювання її зміна інтенсивніша.

У таблиці 1 представлені отримані функції зміни показників залежно від напрацювання в умовах АПВ для різних марок автомобілів вітчизняного і зарубіжного виробництва.

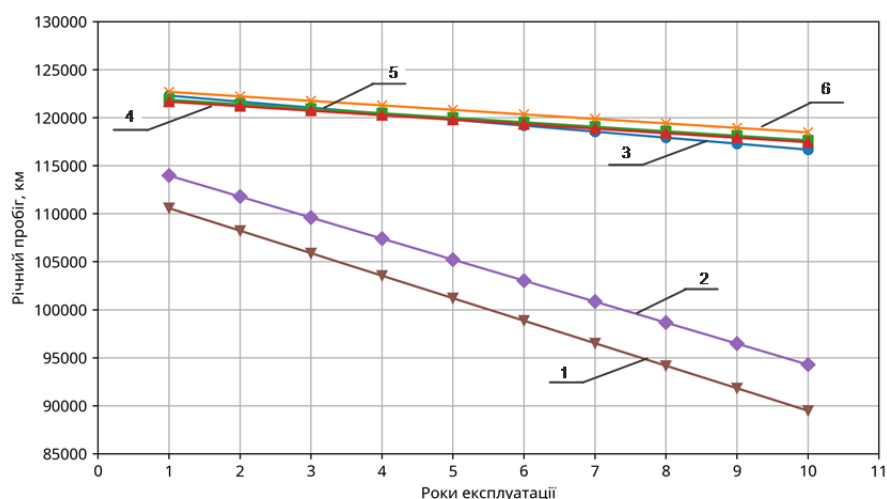
В результаті порівняння ефективності експлуатації по значеннях запропонованих коефіцієнтів складно комплексно оцінити ефективність експлуатації вантажних автомобілів різних марок в АПВ, оскільки результати досліджень визначили, що найбільш раціональне значення, яке повинне бути високим для продуктивності і відповідно низьким для складових витрат, варіюється між автомобілями.

Таблиця 1 - Функції зміни показників залежно від напрацювання в умовах АПВ для різних марок автомобілів вітчизняного і зарубіжного виробництва

Показник	Марка вантажного автомобіля					
	КамАЗ	МАЗ	Mercedes	Renault	Scania	Volvo
K_Q^n	$y = -2 \cdot 10^{-7}x + 1,0265$	$y = -2 \cdot 10^{-7}x + 1,0235$	$y = -3 \cdot 10^{-8}x + 1,003$	$y = -2 \cdot 10^{-7}x + 1,0235$	$y = -3 \cdot 10^{-8}x + 1,003$	$y = -3 \cdot 10^{-8}x + 1,003$
K_{BQ}^n	$y = 9 \cdot 10^{-7}x + 0,8895$	$y = 8 \cdot 10^{-7}x + 0,8958$	$y = 6 \cdot 10^{-7}x + 0,9312$	$y = 2 \cdot 10^{-7}x + 0,9745$	$y = 4 \cdot 10^{-7}x + 0,9514$	$y = 2 \cdot 10^{-7}x + 0,9746$
$K_{B_{\text{апр}}}^n$	$y = 1,1098e^{-8E-0,7x}$	$y = 1,1536e^{-1E-0,6x}$	$y = 1,0694e^{-5E-0,7x}$	$y = 1,0948e^{-7E-0,7x}$	$y = 1,0882e^{-7E-0,7x}$	$y = 1,1112e^{-8E-0,7x}$

Для комплексної оцінки ефективності експлуатації вантажних автомобілів різних марок в АПВ залежно від напрацювання необхідно визначити значення питомих економічних ефектів від їх експлуатації, а також від заміни транспортних засобів.

На рис. 1 представлені значення пробігів різних марок вантажних автомобілів в АПВ за 10 років експлуатації при плановому значенні середньорічного пробігу 120 тис. км.



1 - КамАЗ, 2 - МАЗ, 3 - Renault, 4 - Mercedes, 5 - Volvo, 6 - Scania

Рисунок 1 - Значення пробігів різних марок вантажних автомобілів в АПВ за 10 років експлуатації при плановому значенні середньорічного пробігу 120 тис. км.

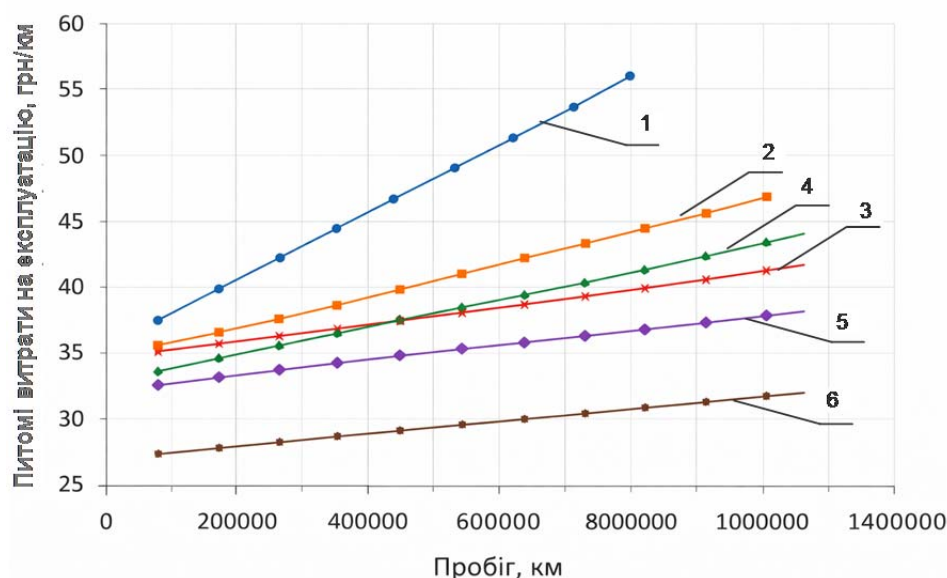
Джерело: розроблено авторами

Середньорічне значення пробігів вітчизняних марок вантажних автомобілів в АПВ більш інтенсивно знижується залежно від напрацювання, чим у зарубіжних марок автомобілів. Наприклад до десятого року експлуатації значення середньорічного пробігу у автомобілів КамАЗ знижується з 120 тис. км до 90 тис. км, що складає біля 70 % необхідного значення. Значення пробігів вітчизняних марок вантажних автомобілів після 10 років експлуатації при середньорічних пробігах 120 тис. км знижується до критичних, а раціональність подальшої експлуатації ставиться під знаком питання. За ті ж 10 років експлуатації значення середньорічних пробігів марок вантажних автомобілів зарубіжного виробництва падає не більше ніж на 10% і складає близько 115 тис. км в рік.

Питомий економічний ефект від експлуатації різних марок вантажних автомобілів в АПВ є комплексним показником, який оцінює їх ефективність. Значення показника залежить від продуктивності вантажного автомобіля конкретної марки, результату діяльності від його експлуатації, а також витрат на реалізацію цієї діяльності. Значення витрат і продуктивності безпосередньо залежать від технічного стану рухомого складу, а також від інтенсивності зниження показників ефективності вантажних автомобілів залежно від напрацювання в умовах АПВ. З метою обліку повної самоокупності різних марок вантажних автомобілів в АПВ амортизаційна ставка розраховувалася для 10 років експлуатації. Витрати на податки включали податкові обкладення, які збираються з автомобіля в залежності від потужності двигуна внутрішнього згорання. Витрати на підтримку працездатного стану вантажних автомобілів, які також є складовою питомого економічного ефекту, визначалися як сума витрат, що є необхідною для забезпечення працездатності парку рухомого складу в умовах АПВ: виконання технічного обслуговування, поточного ремонту вантажних автомобілів, а також у разі виконання ТО автомобілів на гарантії включалася сума витрат, що необхідна для їх переміщення на гарантійний спеціалізований сервіс. Тарифна ставка на виконання одиниці роботи у т-км, визначалася по середніх значеннях тарифів, що діють на сучасних АТП для перевезення вантажів. Продуктивність різних марок вантажних автомобілів, яка залежить від комплексу організаційних факторів в АПВ, розраховувалася для них з постійним значенням коефіцієнта використання вантажопідйомності, пробігу, а також з постійним значенням простоїв з незалежних від технічного стану причин. Витрати на паливо розраховувалися з урахуванням нормативів по витраті палива, що діють на АПВ та не

залежать від напрацювання автомобілів з початку експлуатації. Результат діяльності від експлуатації автомобілів безпосередньо пов'язаний зі значенням коефіцієнта технічної готовності, який визначався для кожного року експлуатації в АПВ. В результаті була отримана функція залежності коефіцієнта від напрацювання різних марок вантажних автомобілів, від значення якого залежить як продуктивність, так і результат діяльності від експлуатації в АПВ.

На рис. 2 представлені значення питомих економічних витрат на експлуатацію різних марок вантажних автомобілів залежно від напрацювання в АПВ.



1 - КамАЗ, 2 - МАЗ, 3 - Renault, 4 - Mercedes, 5 - Volvo, 6 - Scania

Рисунок 2 - Значення питомих економічних витрат на експлуатацію різних марок вантажних автомобілів залежно від напрацювання в АПВ

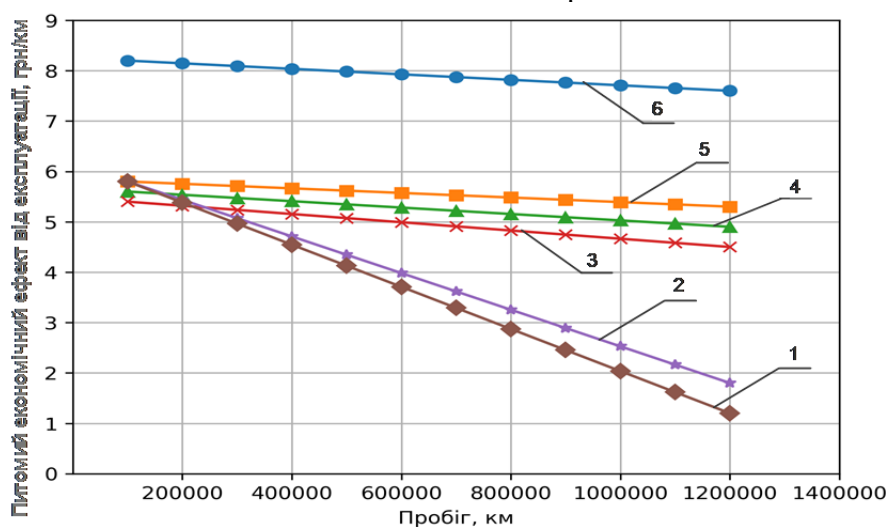
Джерело: розроблено авторами

За отриманими результатами найбільш високе значення витрат на експлуатацію з аналізованих різних марок вантажних автомобілів має КамАЗ. На початку експлуатації значення витрат цієї марки вантажного автомобіля нижче, ніж у автомобілів марок Mercedes і Scania за рахунок більш високої вартості останніх, а значить необхідності великих матеріальних засобів для самокупності. Проте за рахунок зниження ефективності експлуатації залежно від напрацювання досліджуваний показник зростає і на пробігу близько 200 тис. км перевищує значення автомобілів Mercedes і Scania. До десятого року експлуатації питомі витрати автомобілів КамАЗ стають вище за витрати автомобілів марки Mercedes. При порівнянні з автомобілями Renault це значення складає на 10-му році буде ще більшим, причому пробіг автомобілів КамАЗ відрізняється від пробігу автомобілів Renault на 20 %, що пов'язано з нижчим значенням коефіцієнта технічної готовності автомобілів КамАЗ впродовж тривалої експлуатації, що негативно позначається на продуктивності автомобілів, а також на результаті діяльності від експлуатації в АПВ.

Аналогічно зростають з більш високим темпом питомі витрати залежно від напрацювання в АПВ і у вантажних автомобілів МАЗ. На початку експлуатації питомі витрати цієї марки автомобіля є найнижчими з отриманих, проте на пробігу 200 тис. км вони перевищують значення найбільш низьких витрат на експлуатацію з іноземних автомобілів. Далі на пробігу в 400 тис. км значення питомих витрат на експлуатацію вантажних автомобілів марки МАЗ починають перевищувати значення іншого автомобіля зарубіжного виробництва марки Volvo. Після 600 тис. км пробігу значення

питомих витрат на кілометр пробігу автомобілів марки МАЗ починає перевищувати витрати автомобілів Mercedes і Scania, які в експлуатації виявилися найбільш дорогими в групі автомобілів іноземного виробництва. Сумарне значення пробігу автомобілів марки МАЗ до десятого року експлуатації при середньорічному значенні пробігів 120 тис. км менше ніж у автомобілів іноземного виробництва в середньому на 15%, що також пов'язане з частими простоями автомобілів в зонах обслуговування і ремонту замість виконання перевезень АПВ. Найбільш низькі значення питомих витрат на експлуатацію мають вантажні автомобілі марки Renault. Найбільш витратомістким в експлуатації АПВ вантажним автомобілем з іноземних виявився Mercedes. Вартість запасних частин, а також витрати на заміну елементів, що відмовили, в даному випадку складають найбільш високі значення в порівнянні з аналогами.

На рис. 3. представлені значення питомих економічних ефектів від експлуатації різних марок вантажних автомобілів залежно від напрацювання в АПВ.



1 - КамАЗ, 2 - МАЗ, 3 - Renault, 4 - Mercedes, 5 - Volvo, 6 - Scania

Рисунок 3 - Значення питомих економічних ефектів від експлуатації різних марок вантажних автомобілів залежно від напрацювання в АПВ

Джерело: розроблено авторами

Найбільш високе значення питомого економічного ефекту досягається у разі експлуатації автомобілів марки Scania. На це впливає як висока надійність рухомого складу, так і низьке значення питомих витрат на експлуатацію, а також найвища вантажопідйомність в даному випадку серед інших марок автомобілів, що відчутно позначається на значенні продуктивності і відповідно, результаті діяльності в АПВ.

Якщо порівнювати функціонування в АПВ вантажних автомобілів марок Renault, Mercedes і Volvo то інтенсивність падіння показника залежно від напрацювання у цих транспортних засобів має дуже близьке між собою значення. За період експлуатації 10 років, або 1200000 км пробігу, значення питомих економічних ефектів не падає більш ніж на 10%.

Що стосується вітчизняних марок вантажних автомобілів КамАЗ і МАЗ то значення їх питомих економічних ефектів падають з напрацюванням в АПВ найбільш інтенсивно. Як і у разі розгляду питомих витрат на експлуатацію, первинне значення економічних ефектів перевищує значення зарубіжних марок вантажних автомобілів, проте до пробігу в 200 тис. км ситуація змінюється на протилежну і різниця між ефектами росте щорічно, знижуючи ефективність вітчизняних марок вантажних автомобілів в порівнянні із зарубіжними.

Висновки.

1. Розглянуто процес зміни технічного стану вантажних автомобілів різних базових марок в умовах експлуатації в АПВ, вплив морального і фізичного їх старіння, процес накопичення несправностей в деталях, вузлах і агрегатах.

2. Наведено основні фактори, що впливають на технічний стан вантажних автомобілів в АПВ, а також на інтенсивність його зміни з напрацюванням.

3. Розглянуто техніко-економічні показники, що характеризують ефективність функціонування парку вантажних автомобілів різних марок в умовах АПВ та отримано залежність для розрахунку питомого економічного ефекту від їх експлуатації.

4. Врахована зміна ефективності експлуатації вантажних автомобілів в АПВ залежно від напрацювання через введення коефіцієнтів зміни: вартості автомобілів з напрацюванням, продуктивності, витрат на підтримку працездатності.

5. На основі запропонованого комплексу показників оцінки ефективності функціонування вантажних автомобілів різних марок в умовах АПВ в залежності від напрацювання розроблено підхід оцінки впливу їх технічного стану на продуктивність, а отже і на ефективності їх експлуатації для обґрунтованого оновлення парку.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лівіцький О.М. Вплив стратегій технічного обслуговування і ремонту мобільної сільськогосподарської техніки на її стан, умови і охорону праці операторів. *Вісник ЖНАЕУ: науково-теоретичний збірник*. вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. Житомир, 2014. С. 37-50.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В., Дьяченко В.О. Підхід до забезпечення надійності транспортних засобів та системи агропромислового виробництва шляхом оптимізації парку рухомого складу. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали. XI Міжнародна науково-практична конференція, 1-3 листопада 2017 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 15-17.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В., Дьяченко В.О. Підвищення ефективності функціонування підприємств сільськогосподарського виробництва на основі логістичного підходу. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали. XI Міжнародна науково-практична конференція, 1-3 листопада 2017 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 232-234.
4. Аулін В.В., Голуб Д.В., Великодний Д.О. та ін. Розв'язання проблеми надійності технологічних процесів вантажних перевезень підприємствами агропромислового виробництва. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, Вип. 1(32), 2019. С. 36-45.
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В. Підвищення ефективності використання транспортних машин у агропромисловому виробництві узгодженням їх експлуатаційних характеристик та умов функціонування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, Вип. 6(37) ч.ІІ, 2022. С.45-57.
6. Аулін В.В., Голуб Д.В., Кічура Р.П. та ін. Забезпечення та підвищення надійності й ефективності процесу автомобільних вантажних перевезень побудовою дерева відмов структурних елементів транспортної системи. *Вісник машинобудування та транспорту*, №18(2), 2023. С. 46-55.
7. Вергун М.Г. Управління перевезеннями вантажів у сільському господарстві. *Агроінком*, № 5-6, 2008. С. 39-43.
8. Гнезділова О.М. Організація обліку та аналізу роботи транспортних засобів аграрних підприємств: автореф. дис. кандидата екон. наук: 08.06.04. Київ, 2006. 20 с.
9. Голуб Д.В., Аулін В.В., Кічура Р.П., Ювженко О.Ю. Застосування динамічних моделей управління для оптимізації виробничо-транспортних витрат вантажних перевезень. *Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. сталій розвиток транспортних систем: наука і практика*: матеріали Міжнародна науково-практична конференція, 25-26 листопада 2024 р. Харків: ХНАДУ, 2024. С. 149-152.
10. Голуб Д.В., Кічура Р.П. Оптимізація системи технічної експлуатації автомобілів в агропромисловому виробництві застосуванням інноваційних підходів у ТОВ "АРК ГРУПП 19": звіт з НДР № ДР 0125U003363. Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2025. 32 с.
11. Голуб Д.В., Ювженко О.Ю. Підвищення ефективності використання автопарку транспортних засобів агропромислового виробництва у ТОВ "АРК ГРУПП 19": звіт з НДР № ДР 0125U003360. Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2025. 36 с.

12. Дмитриченко М.Ф., Матейчик В.П., Гришук О.К. та ін. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. К.: НТУ, 2014. 168 с.
13. Керничний Б.Я. Інноваційні шляхи підвищення ефективності використання автомобільного важковагового транспорту (на прикладі організації сезонних перевезень сільськогосподарських вантажів). *Проблеми економіки транспорту. Збірник наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, Вип. 11, 2016. С. 31-36.
14. Придюк В.М. Особливості організації перевезень сільськогосподарських вантажів автомобільним транспортом. *Сільськогосподарські машини*, Вип. 28, 2014. С. 68–72.
15. Формальчик Є. Ю., Олісевич М. С., Мاستикаш О. Л., Пельо Р. А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів: навч. посіб. Львів: Афіша, 2004. 492 с.
16. Фришев С.Г. Основи транспортного процесу в АПК: посібник. К.: Державна академія керівних кадрів, 2009. 420 с.
17. Vojtov V.A., Muzylyov D.A., Berezhnaja N.G. Integrated approach in calculation of the economic effect of the functioning of the transport and logistic complex with the account of the risk factor. *International academy journal Web of Scholar*, Vol. 1., № 3(21), 2018. P. 12-18.
18. Shafi U. Vehicle remote health monitoring and prognostic maintenance system. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 20, 2018. Pp. 1-10.

References

1. Aulin, V. V., Holub, D. V., Livitskyi, O. M. (2014). Influence of maintenance and repair strategies of mobile agricultural machinery on its condition, working conditions and labor protection of operators. *Bulletin of Zhytomyr National Agroecological University*, 2(45), Vol. 4, Part II, 37-50 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Diachenko, V. O. (2017). Approach to ensuring the reliability of vehicles and the system of agro-industrial production through optimization of the rolling stock fleet. *Problems of Design, Production and Operation of Agricultural Machinery: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference*, Kropyvnytskyi, November 1-3, 15-17 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Diachenko, V. O. (2017). Improving the efficiency of agricultural production enterprises based on a logistics approach. *Problems of Design, Production and Operation of Agricultural Machinery: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference*, Kropyvnytskyi, November 1-3, 232-234 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Holub, D. V., Velykodnyi, D. O., et al. (2019). Solving the problem of reliability of technological processes of freight transportation by agro-industrial enterprises. *Central Ukrainian Scientific Bulletin: Technical Sciences*, 1(32), 36-45 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., Lysenko, S. V., & Holub, D. V. (2022). Improving the efficiency of the use of transport machines in agro-industrial production by coordinating their operational characteristics and operating conditions. *Central Ukrainian Scientific Bulletin: Technical Sciences*, 6(37), Part II, 45-57 [in Ukrainian].
6. Aulin, V. V., Holub, D. V., Kichura, R. P., et al. (2023). Ensuring and improving the reliability and efficiency of the road freight transportation process through the construction of a fault tree of structural elements of the transport system. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 18(2), 46-55 [in Ukrainian].
7. Verhun, M. H. (2008). Management of freight transportation in agriculture. *Ahroinkom*, 5-6, 39-43 [in Ukrainian].
8. Hnezdilova, O. M. (2006). Organization of accounting and analysis of the operation of vehicles of agricultural enterprises. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
9. Holub, D. V., Aulin, V. V., Kichura, R. P., & Yuvzhenko, O. Yu. (2024). Application of dynamic management models for optimization of production and transport costs of freight transportation. *Modern Problems of Functioning of Logistics Systems. Sustainable Development of Transport Systems: Science and Practice: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, Kharkiv, 149-152 [in Ukrainian].
10. Holub, D. V., Kichura, R. P. (2025). Optimization of the system of technical operation of vehicles in agro-industrial production using innovative approaches at LLC "ARK GROUP 19": Research report No. DR 0125U003363. Kropyvnytskyi: Central Ukrainian National Technical University, 32 p. [in Ukrainian].
11. Holub, D. V., Yuvzhenko, O. Yu. (2025). Improving the efficiency of the use of the vehicle fleet of agro-industrial production at LLC "ARK GROUP 19": Research report No. DR 0125U003360. Kropyvnytskyi: Central Ukrainian National Technical University, 36 p. [in Ukrainian].
12. Dmytrychenko, M. F., Mateichyk, V. P., Hryshchuk, O. K., et al. (2014). *Methods of system analysis of automotive technology properties*: textbook. Kyiv: National Transport University, 168 p. [in Ukrainian].

13. Kernychnyi, B. Ya. (2016). Innovative ways to improve the efficiency of using heavy road transport (on the example of organizing seasonal transportation of agricultural goods). *Problems of Transport Economics*, 11, 31-36 [in Ukrainian].
14. Prydiuk, V. M. (2014). Peculiarities of organizing transportation of agricultural goods by road transport. *Agricultural Machines*, 28, 68-72 [in Ukrainian].
15. Fornalchyk, Ye. Yu., Oliskevych, M. S., Mastyakash, O. L., & Pelo, R. A. (2004). *Technical operation and reliability of vehicles*: textbook. Lviv: Afisha, 492 p. [in Ukrainian].
16. Fryshev, S. H. (2009). *Fundamentals of the transport process in the agro-industrial complex*: textbook. Kyiv: State Academy of Managerial Staff, 420 p. [in Ukrainian].
17. Vojtov, V. A., Muzylyov, D. A., & Berezchnaja, N. G. (2018). Integrated approach in calculation of the economic effect of the functioning of the transport and logistic complex with the account of the risk factor. *International Academy Journal Web of Scholar*, 1(3), 12-18 [in English].
18. Shafi, U. (2018). Vehicle remote health monitoring and prognostic maintenance system. *Journal of Advanced Transportation*, 20, 1-10 [in English].

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Oleksandr Yuvzenko**, **Ruslan Kichura**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determination of the Intensity of Change in the Efficiency Indicators of Operation of Trucks of Different Brands Depending on the Operating time in the Conditions of Agro-Industrial Production

The problem of improving the efficiency of operation of a fleet of trucks of different brands used to support the production processes of agro-industrial enterprises is considered. It has been found that under modern operating conditions a significant share of the vehicle fleet of such enterprises consists of foreign-manufactured trucks, which often have a considerable initial mileage before the start of their operation within the country. Therefore, in the conditions of increasing competition in the field of freight transportation and limited financial resources of agricultural enterprises, the task of reducing operating costs and improving the efficiency of the use of rolling stock becomes particularly relevant. Thus, the rational formation of the fleet structure and a well-grounded selection of truck brands and models will make it possible to increase the efficiency of transport support for production processes in the agro-industrial sector.

An analysis of the factors influencing changes in the technical condition of different truck brands during their operation in agro-industrial production has been carried out. It has been established that with an increase in the service life of vehicles, the technical and operational performance indicators of their functioning gradually deteriorate, the technical readiness coefficient decreases, the duration of downtime for maintenance and repair increases, and the costs of maintaining operational capability also rise. As a result, the average annual mileage of vehicles decreases, the time of their effective use in the production transport process of agro-industrial production is reduced, and the cost of performing transport work increases.

For a comprehensive assessment of the efficiency of truck operation, a system of technical and economic indicators has been proposed that takes into account changes in the vehicle value, the productivity of its operation, and the costs of maintaining its serviceable condition depending on the accumulated operating mileage. Based on the proposed indicators, a mathematical model has been developed to determine the specific economic effect of operating different brands of trucks under conditions of agro-industrial production. The model makes it possible to take into account the influence of the technical condition of the vehicle fleet on the productivity of the transport process, the level of operating costs, and the performance results obtained from the use of vehicles in agro-industrial production.

The regularities of changes in annual mileage, specific costs, and the economic effect from the operation of trucks of different brands depending on their accumulated mileage in the agro-industrial sector have been determined. It has been established that foreign-manufactured trucks are characterized by more stable values of technical and operational indicators and a lower rate of efficiency decline during long-term operation compared with domestic counterparts. The proposed approach makes it possible to make a well-grounded choice of the brand and model of a truck, as well as to optimize the processes of renewing the vehicle fleet of enterprises in the agro-industrial sector.

trucks, agro-industrial production, operational efficiency, technical condition, accumulated mileage, economic effect, transport process, vehicle fleet, technical readiness, operating costs

Одержано (Received) 06.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

В.В. Драгобецький, проф., д-р техн. наук, **А.А. Черниш**, канд. техн. наук, **Д.В. Молоштан**, канд. техн. наук

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

e-mail: vldrag@kdu.edu.ua, chernyshkrnu@gmail.com, moloshtandima@gmail.com

Підвищення експлуатаційної надійності та захищеності екіпажу спеціального бронеавтомобілю для розмінувальних команд

У наданому дослідженні розглянуто і визначено напрямки розвитку теорії і практики проектування, виробництва та випробування військової броньованої техніки здатної виконувати функціональні задачі з транспортування вибухових речовин та боєприпасів у зони мінування та з зон розмінування. Балістична стійкість елементів бронезахисту розрахована шляхом формулювання та рішення задачі лінійного програмування з урахуванням обмежень пікових значень тиску у відсіках екіпажу, відколеного руйнування, виникнення тріщин. Запропонована математична модель, що враховує динамічну поведінку шаруватих елементів, дію ударних хвиль за броньованою преградою.

броньована техніка, транспортування вибухових речовин, бронезахист, броньована преграда

Постановка проблеми. Військові формування збройних сил України виконують значну кількість бойових завдань в умовах вогневої протидії супротивника. Різні модифікації транспортних засобів військового призначення знаходяться на озброєнні збройних сил України. Багатоцільові броньовані колісні машини підвищеної прохідності здатні виконувати завдання з вогневої підтримки, перевезення особистого складу, транспортування вантажів та обладнання до району бойових дій, проведення тактичних операцій військовими підрозділами. Перелік модельного ряду спеціалізованих броньованих машин включає «броньовані тачанки» - пікапи, транспортні машини для прикордонних військ, бронетранспортери, броньовані вантажівки, операційні модулі польового шпиталю, мобільні штабні пункти та ін. Однак слід визначити що в умовах сучасності, враховуючі наявність воєнного стану, військові підрозділи що виконують бойові задачі з мінування і розмінування місцевості не оснащені спеціалізованою броньованою технікою функціональне призначення якої – це транспортування у райони мінування та евакуація з районів розмінування вибухових речовин, мін, снарядів та бомб, що не здетонували і не вибухнули. В умовах мирного часу цієї потреби не існувало. Необхідно було тільки дотримуватись правил з перевезення вибухових речовин та засобів підірвання. Для перевезення вибухових речовин і пристроїв, в умовах необхідності подолання мінно-вибухових загороджень і застосування противником сучасної зброї необхідне створення спеціалізованої броньованої техніки. Тобто на сьогоднішній день гостро поставлена проблема розробки і виготовлення транспортних засобів з підвищеною мінною та балістичною стійкістю.

Результати попередніх досліджень надають практичні напрямки формування концептуальних проектів зразків транспортних засобів для безпечного виконання завдань, що до мінування та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Виробництво закордонних та вітчизняних аналогів такої техніки недостатньо, особливо

в умовах військового стану. Крім того їх вартість дуже висока. Тому розробка, удосконалення та створення таких транспортних засобів потрібно починати з наукових досліджень. Практична значимість результатів досліджень також пов'язана зі значним збереженням матеріальних та людських ресурсів, сприяє підвищенню ефективності виконання бойових задач транспортування.

Проблема розвитку теорії і практики створення військової броньованої техніки здатної виконувати необхідні технічні, практичні бойові і функціональні задачі з транспортування є актуальною і потрібною в умовах сучасності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологія воєнно-наукових досліджень для забезпечення ефективного комплексу проектно-дослідних робіт прийняття технічних рішень надано у роботах М. Єрмакова, М. Миронюка, Д. Гриба [1, 2].

Концептуальна стадія при створенні зразка військової техніки починається з аналізу та фіксування протиріччя між потрібними та наявними функціональними можливостями, які має існуючий зразок, розглядаємого виду, що є на озброєнні, бажано країн НАТО. Формування технічного завдання та синтез і проектування зразка, у нашому дослідженні транспортного засобу, здійснюється шляхом реалізації принципу, що виражається у формі критерію «цільовий ефект – витрати – реалізованість».

У роботах [3], [4], [5], [6] проведена комплексна порівняльна оцінка зразків озброєння та військової техніки. Розроблена методика порівняльної оцінки тактико-техніко-економічних показників однотипних зразків озброєння та військової техніки. Дослідження [3], [4], [5], [6] доповнюють принцип створення зразків військової техніки на завершальній концептуальній стадії критерієм «– вартість – ресурс». Об'єднавши ці критерії отримуємо узагальнюючий у вигляді «цільовий ефект – технічна досконалість – вартість-час (витрати) – ресурс». Більш доцільно замість поняття «цільовий ефект» використовувати термін цільова віддача.

Методика оцінювання стану живучості військових потенційно небезпечних об'єктів, у тому числі вибухопожежонебезпечних боєприпасів, вибухових речовин і засобів підірвання надана у роботі [7]. У роботі надано найбільш важливі показники і відповідні критерії, що характеризують рівень живучості та вибухопожежобезпеки при зберіганні боєприпасів та вибухових речовин. Зокрема наступні можливо адаптувати до вимог транспортних засобів, що використовуються для доставки та евакуації вибухонебезпечних об'єктів, а саме: забезпеченість засобами пожежогасіння; оснащеність автоматичними пристроями пожежогасіння; стан тари; наявність систем попереднього виявлення небезпечних ситуацій; забезпеченість блискавкозахистними пристроями; наявність останнього пункту маловірогідна.

Проведені дослідження та отримані результати з протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля з використанням методів числового моделювання. Також виявлені слабкі елементи конструкції до дії сучасного вибухового навантаження [8], [9], [10]. Ці дослідження корисні для оцінки протимінної стійкості і не враховують дію ударних хвиль, що розповсюджуються через елементи конструкції на екіпаж та вибухонебезпечний вантаж. Запропонована математична модель не враховує динамічну поведінку шаруватих елементів конструкції при вибуховому навантаженні, дію ударних хвиль за броньованою преградою і можливість відкольного руйнування металевих елементів конструкції. Дослідження не розглядають динамічну поведінку конструкції при раптовій детонації вибухівки у відсіку для її транспортування.

Спеціальний бронеавтомобіль для розмінувальних команд КОЗАК-5-ПМЛ є кращим аналогом при розробці нового транспортного засобу який здатний перевозити й

вибухові речовини. Автомобіль КОЗАК-5-ПМЛ призначений для транспортування боєприпасів, що не розірвалися, у місця їх утилізації. Спеціальні відсіки та конструкція, розрахована на раптову детонацію бойової частини, що транспортується та захист екіпажу рис 1.



Рисунок 1 – Спеціальні бронеавтомобілі для розмінувальних команд

Джерело: розроблено на підставі [12]

Традиційний процес проектування зразків нової техніки займає багато часу. В умовах воєнного стану домінуючим критерієм розробки є термін різноманітних етапів розробки. Частково значні витрати часу пов'язані з тим, що за для перевірки функціональних характеристик потрібне створення експериментального зразка і його випробування. В теперішній час в наслідок розвитку математичного апарату і комп'юторної техніки експериментальні методи дослідження процесів виготовлення деталей зразка техніки та його експлуатації, балістичної і протимінної стійкості, захищеності екіпажу і вантажу поступаються більш ефективним і менш витратним методам математичного моделювання.

Для визначення допустимих зовнішніх впливів (підриг на мінах, кульове та враження обламків) на вибухові системи потрібно визначити початковий, або ініціюючий, імпульс. Відомо [11], що вибухові перетворення можливо ініціювати нагріванням, механічним навантаженням ударом, тертям, збуджуванням за рахунок вибуху іншої вибухової речовини. Збуджування вибухового перетворення можливо електричним розрядом. В умовах транспортування вибухових речовин враження блискавкою, або при виникненні статичної електрики маловірогідні. Стосовно чутливості вибухових систем к тепловому впливу, то слід відзначити її залежність від температури спалаху вибухових систем, типу і критичної швидкості нагріву. Це довідкові дані і ними можливо користуватися при моделюванні процесів зовнішнього впливу.

Стосовно механічного впливу тертям, слід відзначити, що існують ефективні засоби протидії ковзанню та пересуванню предметів під час транспортування (силіконові килими і покриття).

При оцінці травмування екіпажу та водія в якості критерія доцільно використовувати критичний тиск (Δp_k), значення якого в залежності від імовірності летального випадку приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Критичний тиск травмування людини ударною хвилею

Імовірність летального випадку	0,99	0,75	0,5	0,25	0,1
(Δp_k)	500	370	320	280	250

Джерело: розроблено на підставі [8], [9]

Для транспортування мін та снарядів, що не розірвалися у місцях їх утилізації розроблено спеціальний бронеавтомобіль для розмінувальних команд. При проектуванні бронеавтомобілю, спеціальних відсіків, особливо підсиленої та нахиленої задньої стінки, що відхиляє ударну хвилю і захищає екіпаж у випадку детонації мін та снарядів, необхідно розрахувати балістичну стійкість відсіків.

Дія ударних хвиль та продуктів детонації на металеві конструкції, в тому числі корпус, днище, відсіки броньованої військової техніки досить широко відображено у науково періодичних виданнях [8], [9], [10]. Аналітичні рішення, пов'язані з суттєвим спрощенням рівнянь динамічної поведінки захисних броньованих елементів. Крім того діючий імпульс вважається миттєвим. В цьому випадку дія на броньований елемент обмежена тільки інерційним навантаженням. Це дозволяє отримати аналітичні рішення методом розділу змінних, за допомогою варіаційного принципу Лагранжа, а також з використанням рівнянь Лагранжа 2-го роду [12]. Більша точність та наближеність до фізико-механічних явищ при вибуховому навантаженні досягається при чисельному математичному моделюванні. Заслугує уваги робота [10] у якій розроблена модель дослідження параметрів ударно-хвильового навантаження металевієї пластини з використанням методу скінчених елементів реалізованого в програмному комплексі. Ударно-хвильове навантаження задано у вигляді функції тиску від часу.

В роботі [12] визначено раціональне значення балістичної стійкості бронезахисної пластини методом лінійного програмування. Обмеження охоплюють значення тиску, яке не повинно перевищувати напруження пластичності захисної структури, напружень виникнення тріщин та відколу. Однак лінійна модель не дає можливість визначити заброньову дію на екіпаж. В цій же роботі наведено математичне моделювання динамічної поведінки елементів конструкції бронетранспорту при бойовому враженні. Для перевірки адекватності отриманих результатів були проведені випробування з підриву заряду вибухової речовини масою 6 кг, що розташований на поверхні броньованої пластини. Після підриву виконувались заміри прогинів та поперечних і повздовжніх деформацій. Експериментальні дані на 4...7 % відрізняються від теоретичних але умови експерименту не відповідають умовам навантаження на екіпаж. Пластина вільно розташована на поверхні піщаного ґрунту, вимірювання тиску за перешкодою не виконувалась.

Таким чином існуючі теоретичні та експериментальні дослідження обмежені дослідженнями протимінної та балістичної стійкості. Розрахунки на раптову детонацію вибухівки, та на здатність елементів конструкції спеціалізованих броньованих автомобілів для розмінувальних команд не розглядалась. Слід також відзначити, що міни та снаряди розташовані у відсіку для вибухівки (контейнері). У існуючих дослідженнях захисна дія контейнеру не враховувалась..

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка методу синтезу зразка транспортного засобу, що забезпечує безпечне транспортування боєприпасів та вибухових речовин в умовах вогневої протидії противника, на основі комплексу реалістичних математичних моделей впливу ударно-вибухових навантажень на елементи конструкції, екіпаж і вантаж.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Обґрунтування потреби у необхідності виробництва спеціалізованих транспортних засобів для транспортування боєприпасів та вибухових речовин. Формування фонду накопичених знань у даному напрямку досліджень.

2. Розробка методу розрахунку балістичної протимінної стійкості елементів конструкції спеціалізованого транспортного засобу та екіпажу від вибухової дії вантажу (раптові детонації вибухівки).

3. Теоретична оцінка вибухової стійкості спеціальних відсіків та конструкції при раптовій детонації вибухівки, що транспортується у зону мінування. Важливим завданням є визначення умов безпечного транспортування вибухових систем під час транспортування та вогневої протидії ворога.

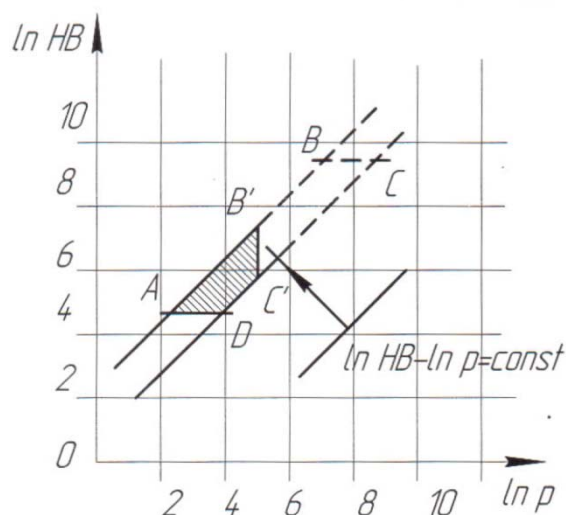
Виклад основного матеріалу. Розрахунок динамічної поведінки та здатність захисної перешкоди захистити екіпаж можливо виконувати з використанням методів

лінійного програмування і чисельного моделювання. У першому випадку необхідно до нерівностей, що обмежують амплітуду ударної хвилі, що діє за захисною преградою [12]. Нерівність має вигляд

$$\frac{\rho_m \cdot v \cdot D(\rho_m \cdot C_m - \rho_p \cdot C_p)}{\rho_m \cdot C_m + \rho_p \cdot C_p} < [p] \quad (1)$$

де ρ_m – щільність матеріалу перешкоди; v – масова швидкість ударної хвилі; D – швидкість ударної хвилі; C_m , C_p , ρ_p , – поздовжня швидкість звуку у металі і повітрі, щільність повітря; $[p]$ – допустиме зростання тиску.

Геометричне представлення задачі лінійного програмування буде мати вигляд



AB' – межа відколеного руйнування; B'C' – критичний тиск травмування людини;
C'D – обмеження на виникнення тріщин; AD – межа руйнування захисної броньованої пластини

Рисунок 2 – Геометричне представлення задачі лінійного програмування

Джерело: розроблено авторами

Моделювання реакції захисної броньованої плити на дію вибуху зарядів різної форми в металевому контейнері виконувалось в середовищі AnSYS AUTODYN, з урахуванням вимог STANAG 4569.

На основі геометричної моделі конструкції спеціалізованого броньованого автомобіля були проведені дослідження і створені кінцево-різницева та скінченно-елементна моделі (рис. 3). Визначено значення прискорення у відсіку екіпажу (рис. 4).

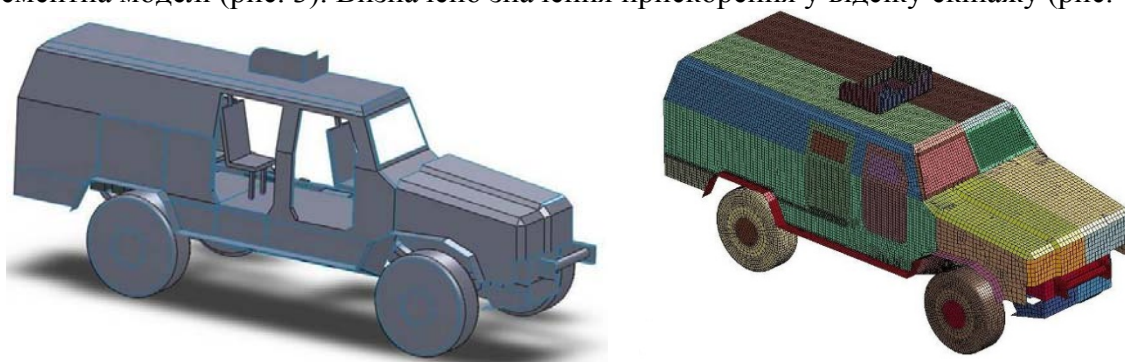


Рисунок 3 – Геометрична модель корпусу СБА Козак-001 та загальний вигляд СЕ-моделі зразка

Джерело: розроблено авторами

Скінченно-елементна модель (далі – СЕ-модель) утворена оболонковими елементами. Для зменшення машинного часу обчислення деталі конструкції, що зазнають значних пружно-пластичних деформацій розбиті на скінченні елементи менших розмірів. Так в нижній площині деталі днища, стінок днища, внутрішніх перегородок та захисної плити розбиті скінченними елементами з характерним розміром 0,01 м. Деталі даху та бортів розбиті на скінченні елементи з характерними розмірами 0,02-0,06 мм.

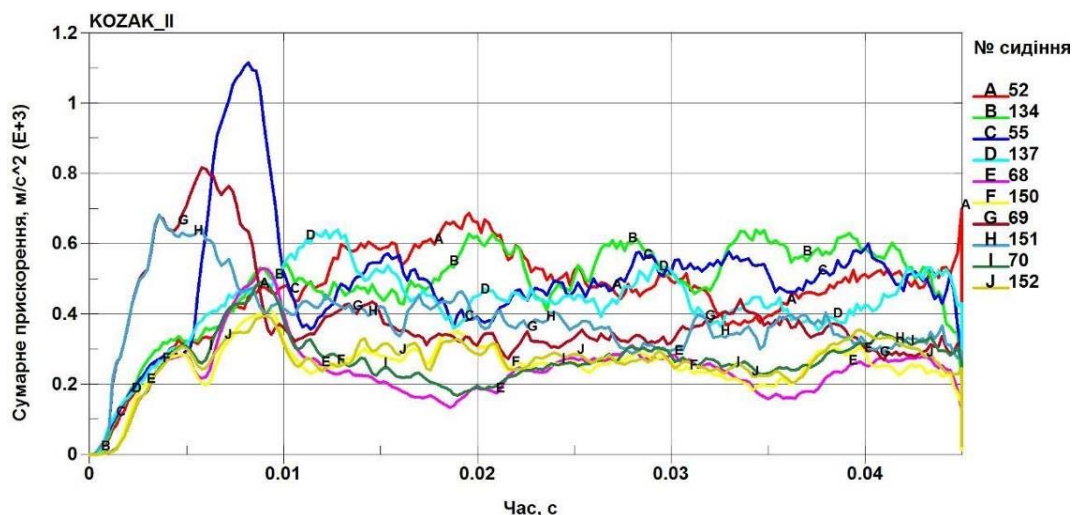


Рисунок 4 – Значення прискорень у відсіку екіпажу

Джерело: розроблено авторами

Схему розміщення вибухової речовини (ВР) в металевому контейнері та локалізацію точок детонації заряду наведено на рисунку 5. Фізико-механічні властивості бронеплити: модуль пружності 210 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,28, межа текучості 950 МПа, межа міцності 1250 МПа, подовження 9 %, щільність 7838 кг/м³.

Для експерименту було обрано заряд ВР масою 15 кг, розміщений на відстані 0,4 та 0,7 м від броньованої плити.

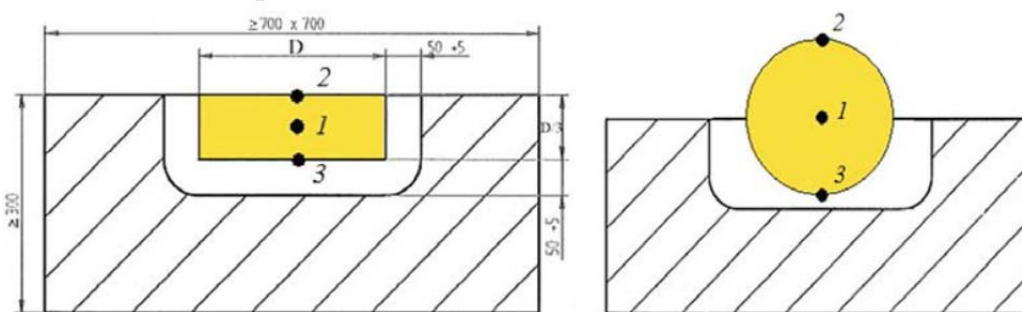


Рисунок 5 – Схема розміщення заряду ВР у металевому контейнері та локалізація осередків детонації

Джерело: розроблено авторами

Застосовані явні методи чисельного інтегрування системи рівнянь механіки суцільних середовищ. Процес детонації чисельно описується загальною системою диференціальних рівнянь. Рівняння складаються із законів збереження маси, імпульсу, енергії, додаткових рівнянь речових моделей вибухової речовини, повітря, матеріалу кузова та контейнера. В цьому дослідженні – продукти детонації і повітря в достатній мірі моделюються за допомогою рівняння стану (equation of state, EOS) яке виражає відношення між тиском p , питомим об'ємом V і питомою енергією e . Додаткові

рівняння необхідні для моделювання твердих тіл (у представленому дослідженні – матеріалу кузова), так як тверді речовини володіють опором зсуву.

Ця чисельна модель, на відміну від існуючих, враховує взаємодію ударної хвилі та металу контейнера, щоб можна було оцінити його вплив на реакцію бронеплити на вибух зарядів ВР різної геометрії.

Чисельна модель включає область повітря, вибухової речовини, броньованої плити та металевго контейнера.

Для опису поведінки броньової плити та металевго контейнера в чисельному моделюванні була застосована Модель Каупера–Саймондса [9].

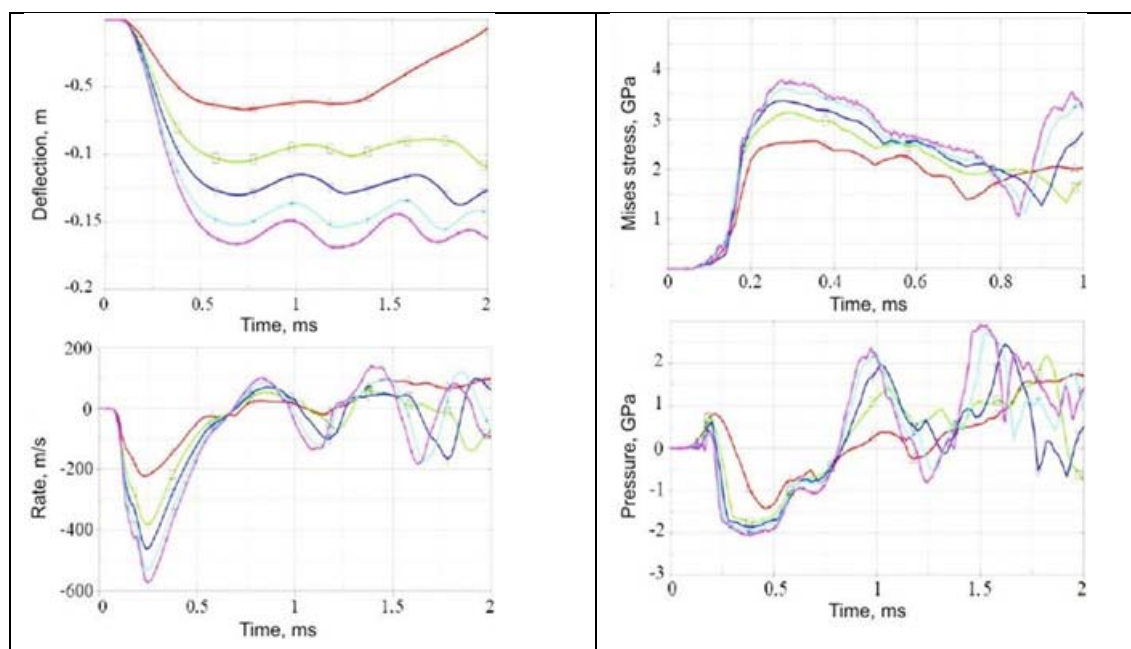
Таблиця 3 – Маса зарядів тротилу та їх геометрія

Вибуховий заряд вага, кг	Діаметр, м	Циліндричний заряд висота, м	Сферичний заряд радіус, м
3	0,100	0,05858	0,07602
6	0,125	0,74990	0,09578
8	0,135	0,08572	0,10542
10	0,145	0,09288	0,11356
11,5	0,150	0,09981	0,11898
15	0,170	0,10136	0,13000

Джерело: розроблено на підставі [9]

Швидкість пластичних деформацій визначали як різницю між швидкостями повної та пружної деформацій.

Застосування рівняння стану продуктів детонації дозволило визначити параметри моделі пластини та заряду ВР (рис. 6) [13].



(Δ) маса вибухової речовини 3 кг, (□) 6 кг, (▼) 8 кг, (+) 10 кг і (×) 11,5 кг

Рисунок 6 – Параметри в центральному елементі скінченно-елементної моделі пластини та циліндричного заряду, розміщеного у металевих контейнерах

Джерело: розроблено авторами

Розташування вузлових точок контролю прогинів досліджуваної пластини задавалося шляхом створення нових систем координат, розташованих послідовно зі зміщенням на 125 мм відносно вихідної системи координат, яка знаходилася у лівому нижньому куті верхньої площини досліджуваної пластини. У отриманих системах координат задавалися п'ятнадцять точок проб (рис. 7), у яких вимірювалися осьові переміщення пластини внаслідок деформації під дією вибухового навантаження. У крайових точках проб А–F переміщення пластини вимірювалися відносно вихідної системи координат, тоді як у груп точок 1–3, 4–6, 7–9 переміщення вимірювалися відносно утворених ліній А–В, С–D та Е–F відповідно.

Загальна картина деформацій системи та деформації досліджуваної пластини у вертикальному напрямку (вісь Y) представлені на рис. 7. Вектори напрямку та інтенсивності деформацій досліджуваної пластини наведені на рис. 8.

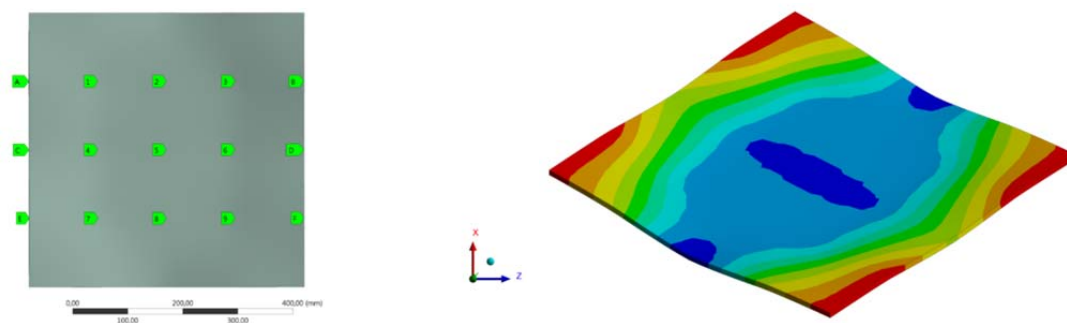


Рисунок 7 – Розташування точок проб на поверхні та епіюра деформацій досліджуваної пластини
Джерело: розроблено авторами

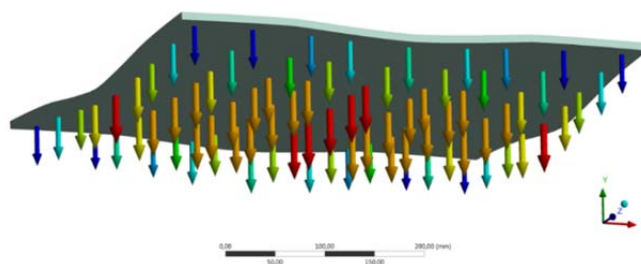


Рисунок 8 – Вектори напрямку й інтенсивності деформацій пластини
Джерело: розроблено авторами

Отримані величини переміщень вузлових та крайових точок, величини переміщень контрольних точок та динаміки їх зміни, отримані шляхом числового моделювання вибухового навантаження пластини наведені на рис. 9

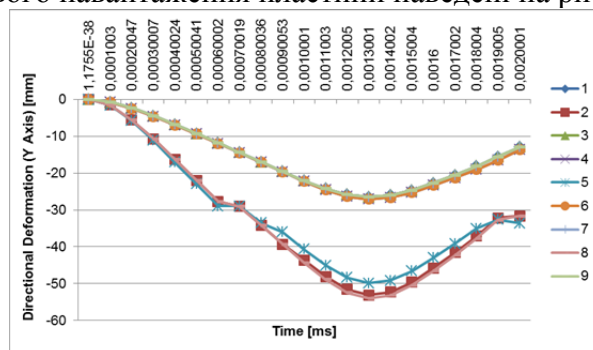
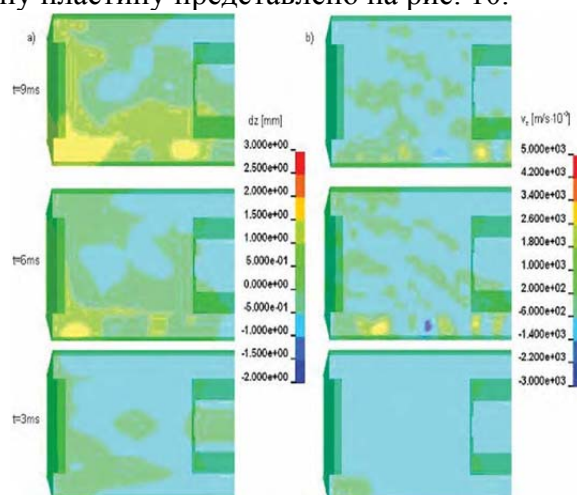


Рисунок 9 – Динаміка зміни величин переміщень вузлових точок досліджуваної пластини, отримана у AUTODYN

Джерело: розроблено авторами

Комп'юторне моделювання складової дії вибухової хвилі від вибуху міни або СВП на захисну броньовану пластину представлено на рис. 10.



(а) – вертикальна складова переміщення; (б) – вертикальна складова швидкості

Рисунок 10 – Складові елементи захисної пластини внаслідок підриву міни вагою 2 кг. Міна була розташована у контейнері для перевезення боєприпасів

Джерело: розроблено авторами

Важливим критерієм, що визначає достовірність результатів, отриманих розрахунковим шляхом, та адекватність складеної математичної моделі реальному процесу, є відповідність отриманих розрахункових результатів даним, отриманим у результаті експериментальних випробувань.

Вимірювальне обладнання надано в табл. 4.

Таблиця 4 – Вимірювальне обладнання та устаткування

№ з/п	Тип обладнання	Найменування
1	Акселерометри	KISTLER 8081K1, 2 шт. (рис. 4.6, 4.7)
2	Підсилювач сигналів акселерометрів	KISTLER 561T, 2 шт.
3	Осцилограф	DATAMAN 570.
4	Осцилограф	BORDO B421
5	Датчик тиску	KISTLER 601H (рис. 4.8)
6	Підсилювач сигналів датчика тиску	KISTLER 5007 (рис. 4.9)
7	Вибухова речовина	Тротил
8	Комплект кабелів (подовжувачів) для підключення апаратури реєстрації	Коаксіальний кабель РК-50, 1 к-т.
9	Ноутбук з програмним забезпеченням для обробки даних з датчиків	Sony VAIO VGN-AR41SR

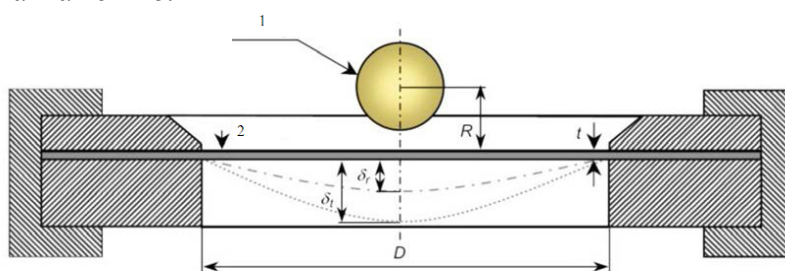
Джерело: розроблено авторами

Для експериментальних досліджень використовувалась сталеві пластина з матеріалу Quardian 500 товщиною 8 мм та розміром 500×500 мм (рис. 11).



Рисунок 11 – Розташування вузлових точок контролю прогинів досліджуваної пластини
Джерело: розроблено авторами

Пластина розташовувалась у дослідному пристрої (рис. 12) і піддавалась вибуховому навантаженню.

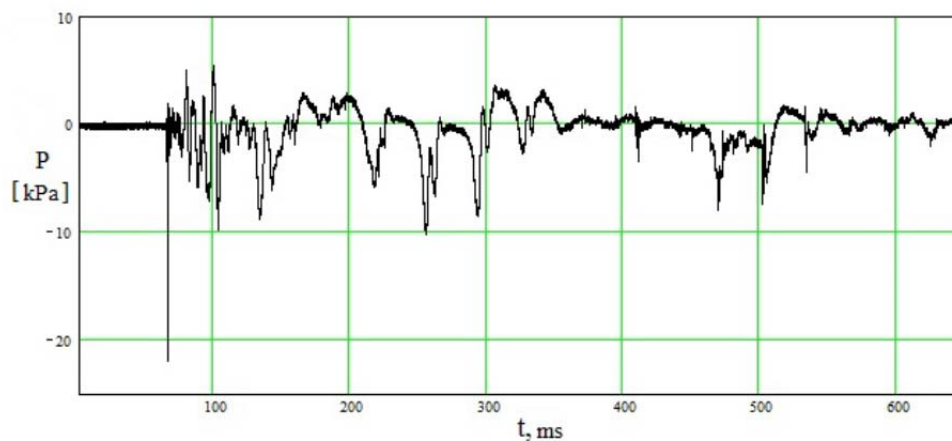


R – відстань до заряду вибухової речовини; t – товщина броньової плити; D – діаметр броньового листа;
 δ – максимальний динамічний прогин; δ_r – залишковий прогин;
 1 – заряд вибухової речовини; 2 – броньована пластина

Рисунок 12 – Схема дослідної установки

Джерело: розроблено авторами

Результати випробувань – результати отриманих даних значення тиску при підриві заряду у відсіку для перевезення боєприпасів рис. 13.



Смуга частот 0 - 47 кГц. Пікові значення тиску 5.5 кПа.

Рисунок 13 – Покази датчика тиску під час вибуху заряду під днищем
Джерело: розроблено авторами

Результати отриманих даних значення прискорення манекену в районі тазу при підриві заряду під днищем зразка надані на рис. 14.

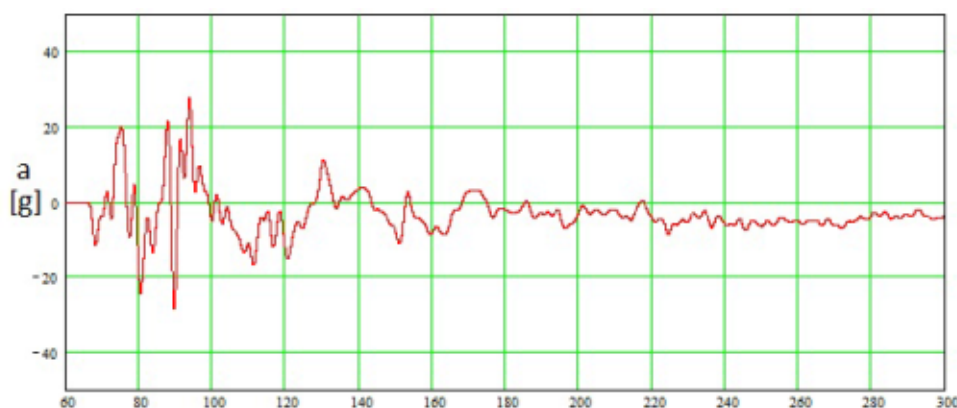


Рисунок 14 – Прискорення манекена в районі тазу (верхня осцилограма) і збільшена в масштабі 60-120 мс (нижня осцилограма) при підриві заряду під днищем. Смуга частот 0 - 330 Гц. З отриманої осцилограми видно, що максимальне прискорення: - 28,5g (час дії 1,8 мс) і 27,5g (час дії 4,5 мс)
Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів показав наступне. Зростання тиску у внутрішньому об'ємі 5,5 кПа при підриві у відсіку для перевезення боєприпасів. Результати випробувань броньованого елементу конструкції та їх аналіз, відповідають вимогам технічного завдання.

Таким чином в результаті проведених досліджень отримані значення прогинів у контрольних точках, швидкості та прискорень. При цьому руйнування бронезахистної пластини зразка відсутнє. Напрямою подальших досліджень зразка є проведення натурних випробувань з оцінки протимінної стійкості окремих елементів його конструкції, моделей корпусу та повномасштабних випробувань зразка.

Таким чином, розроблена математична модель для числового рішення імпульсного вибухового навантаження дозволяє з високою точністю моделювати процес вибухового навантаження дослідної пластини та може застосовуватися для оцінки захищеності екіпажу.

Маса заряду вибухової речовини у моделі задавалася шляхом зміни розмірів і об'єму моделі заряду.

Висновки. Отримало подальший розвиток задача лінійного програмування для розрахунку балістичної стійкості елементів бронезахисту шляхом додавання рівняння, що обмежує пікові значення тиску у відсіку екіпажу.

У поданому дослідженні розглянуто і визначено напрямки розвитку теорії і практики проектування, виробництва та випробування військової броньованої техніки здатної виконувати функціональні задачі з транспортування вибухових речовин та боєприпасів у зони мінування та з зон розмінування.

Чисельний метод розрахунку у системі Ansys Auto Dyn уточнено та розширено завдяки врахуванню ударних хвиль, що розповсюджуються через елементи конструкції на екіпаж та вибухонебезпечний вантаж. Запропонована математична модель не врахувала динамічної поведінки шаруватих елементів конструкції при вибуховому навантаженні, дію ударних хвиль за броньованою преградою і можливість відкольного руйнування металевих елементів конструкції.

Комплекс експериментальних досліджень, що проведені з використанням сучасних вимірювальних засобів та розробленого експериментального обладнання

підтвердив достовірність та високу точність результатів. Межа похибок не перевищує $\pm 7\%$ результатів чисельного моделювання.

Список літератури

1. Єрмаков М.М., Миронюк М.Ю. Роль воєнно-наукових досліджень у формуванні концептуальних проектів перспективних зразків (комплексів, систем) озброєння та військової техніки.
2. Гриб Д.А., Демідов Б.О., Науменко М.В. Системна методологія обґрунтування, формування та реалізації оперативного-тактичних вимог до зразків (комплексів, систем) озброєння та військової техніки. *Наука і оборона*. 2011. №1. С 45-50.
3. Нор П.І., Гребеник О.М., Шарапа В.В., Почергін С.П. Оцінка техніко-економічного рівня спеціалізованих зразків військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2022. № 4, С. 29-34.
4. Нор П.І., Борохвостов І.В., Методика комплексної порівняльної оцінки зразків озброєння та військової техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2016. № 3(11), С. 14-18.
5. Нор П.І., Кручинін С.І., Мельник О.Д., Єфіменко В.А., Методика оцінки технічного рівня зразків озброєння та військової техніки. *Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗСУ*. 2009. Вип. 22. С. 74-82.
6. Єфіменко В.А., Нор П.І., Гупало А.Ю. Основні технічні показники оцінки ефективності парків озброєння та військової техніки збройних сил. *Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗСУ*. 2012. Вип. 22. С. 87-98.
7. Мотковський А.С., Беспалов А.В., Климчук В.І. Обґрунтування рекомендацій щодо підвищення пожежної безпеки в збройних силах як складової частини воєнної безпеки України. *Зб. наук. праць. Національний науково-дослідний центр оборонних технологій і воєнної безпеки України*. 2004. Вип. 3 (26) – С 141-149.
8. Бісик, С. П., Давидовських Л. С., Схабицький В. Р. Безпека життєдіяльності та ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 1. С. 153–159.
9. Бісик С. П. Аналіз пріоритетних напрямків вдосконалення протимінного захисту бойових броньованих машин. *Збірник наук. праць ЦНДІ ОБТ ЗСУ*. Вип. 19(41). К. : ЦНДІ ОБТ, 2011. С. 77–81.
10. Бісик, С. П., Корбач В. Г., Голуб В. А. Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини. *Військово-технічний збірник*. 2011. № 2(5). С. 3–6.
11. Соболев В.В., Чернай А.В., Чебенко В.М., Скобенко О.В. Способи ініціювання зарядів вибухових речовин: навчальний посібник. Д.: ТОВ «ЛізуновПрес», 2013. 88 с.
12. Драгобецький В.В. Створення модельного ряду спеціалізованих броньованих машин. В.В. Драгобецький, І.М. Труніна, О.О. Шаповал, О.А. Гайворонський, Р.О. Кайдалов, О.М. Висоцький, В.І. Кривий, Д.М. Захаревич: монографія. Кременчук.: NOVABOOK. 2024. 168 с.
13. Коновал В.М. Оцінка характеру руйнування твердого середовища зарядами ВР змінної форми поперечного перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху. *Вчені записи НТУ імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки*. 2022, Том 33 (72), № 2. С. 155-170.

References

1. Yermakov M.M., Myroniuk M.Iu. Rol voienno-naukovykh doslidzhen u formuvanni kontseptualnykh proiektiv perspektyvnykh zrazkiv (kompleksiv, system) ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky.
2. Hryb D.A., Demidov B.O., Naumenko M.V. Systemna metodolohiia obhruntuvannia, formuvannia ta realizatsii operativno-taktychnykh vymoh do zrazkiv (kompleksiv, system) ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. *Nauka i oborona*. 2011. №1. S 45-50.
3. Nor P.I., Hrebenyk O.M., Sharapa V.V., Pocherhin S.P. Otsinka tekhniko-ekonomichnoho rivnia spetsializovanykh zrazkiv viiskovoi avtomobilnoi tekhniky. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. 2022. № 4, S. 29-34.
4. Nor P.I., Borokhvostov I.V. Metodyka kompleksnoi porivnialnoi otsinky zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. 2016. № 3(11), S. 14-18.
5. Nor P.I., Kruchinin S.I., Melnyk O.D., Yefimenko V.A. Metodyka otsinky tekhnichnoho rivnia zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. *Zb. nauk. pr. Kyiv: TsNDI OVT ZSU*. 2009. Vyp. 22. S. 74-82.
6. Yefimenko V.A., Nor P.I., Hupalo A.Iu. Osnovni tekhnichni pokaznyky otsinky efektyvnosti parkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky zbroinykh syl. *Zb. nauk. pr. Kyiv: TsNDI OVT ZSU*. 2012. Vyp. 22. S. 87-98.
7. Motkovskiy A.S., Bepalov A.V., Klymchuk V.I. Obhruntuvannia rekomendatsii shcho do pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky v zbroinykh sylakh yak skladovoi chastyny voiennoi bezpeky Ukrainy. *Zb. nauk. prats. Natsionalnyi nauково-doslidnyi tsentr oboronnykh tekhnolohii i voiennoi bezpeky Ukrainy*. 2004. Vyp. 3 (26) – S 141-149.

8. Bisyk S. P., Davydovskiy L. S., Skhabytskyi V. R. Bezpeka zhyttiediialnosti ta likvidatsiia naslidkiv nadzvychnykh sytuatsii. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2015. № 1. S. 153–159.
9. Bisyk S. P. Analiz priorityetnykh napriamkiv vdoskonalennia protymynnoho zakhystu boiovykh broniovanykh mashyn. Zbirnyk nauk. prats TsNDI OVT ZSU. Vyp. 19(41). K. : TsNDI OVT, 2011. S. 77–81.
10. Bisyk S. P., Korbach V. H., Holub V. A. Chyslove vyrishennia zadachi udarno-khvylovoho navantazhennia plastyny. Viiskovo tekhnichnyi zbirnyk. 2011. № 2(5). S. 3–6.
11. Soboliev V.V., Chernai A.V., Chebenko V.M., Skobenko O.V. Sposoby initsiiuvannia zariadiv vybukhovyykh rechovyn: navchalnyi posibnyk. D.: TOV «LizunovPres», 2013. 88 s.
12. Drahobetskyi V.V. Stvorennia modelnoho riadu spetsializovanykh broniovanykh mashyn. V.V. Drahobetskyi, I.M. Trunina, O.O. Shapoval, O.A. Haivoronskyi, R.O. Kaidalov, O.M. Vysotskyi, V.I. Kryvyi, D.M. Zakharevych: monohrafiia. Kremenchuk.: NOVABOOK. 2024. 168 c.
13. Konoval V.M. Otsinka kharakteru ruinovannia tverdoho seredovyscha zariadamy VR zminnoi formy poperechnoho pererizu za riznymi umovamy peredachi enerhii vybukhu. Vcheni zapysky NTU imeni V.I. Vernadskoho. Serii Tekhnichni nauky. 2022, Tom 33 (72), № 2. S. 155-170.

Volodymyr Dragobetskii, Prof., Dr. tech. sci., **Andrii Chernysh**, PhD tech. sci., **Dmytro Moloshtan**, PhD tech. sci.
Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi, Kremenchuk, Ukraine

Increasing the Operational Reliability and Crew Protection of a Special Armored Vehicle For Demining Teams

The purpose of the study is to develop a method for synthesizing a vehicle sample that ensures safe transportation of ammunition and explosives under conditions of enemy fire resistance, based on a set of realistic mathematical models of the impact of shock and explosive loads on structural elements, crew and cargo.

The presented study considers and identifies the directions for the development of the theory and practice of designing, manufacturing and testing military armored vehicles capable of performing functional tasks of transporting explosives and ammunition to and from minefields. The ballistic resistance of armor protection elements is calculated by formulating and solving a linear programming problem taking into account the limitations of peak pressure values in crew compartments, spallation destruction, and the occurrence of cracks. A mathematical model is proposed that takes into account the dynamic behavior of layered elements and the action of shock waves behind the armored barrier. The ballistic resistance of armor protection elements is calculated by formulating and solving a linear programming problem taking into account the limitations of peak pressure values in crew compartments, chipping failure, cracking, and destruction of the protective armored protective plate.

The numerical calculation method in the Ansys Auto DYN system has been refined and expanded by taking into account shock waves propagating through structural elements to the crew and explosive cargo. The proposed mathematical model takes into account the dynamic behavior of layered structural elements under explosive loading, the action of shock waves behind the armored barrier and the possibility of spallation destruction of metal structural elements. A set of experimental studies was conducted using modern measuring instruments of the developed experimental equipment, confirming the reliability and high accuracy. The error limit does not exceed $\pm 7\%$ of the results of numerical modeling.

armored vehicles, transportation of explosives, armor protection, armored barrier

Одержано (Received) 06.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 19.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

Є.Д. Ладиженський¹, П.В. Петленко², В.Г. Байцан², С. Г. Ковальов², канд. пед. наук

¹ Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро, Україна

² Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: ladizenskiy@gmail.com, Tpetlenko@ukr.net

Теоретико-методологічні засади впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу колісних транспортних засобів

У статті здійснено комплексне дослідження теоретико-методологічних засад впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу колісних транспортних засобів в умовах трансформації галузі та зростання ролі транспорту як критичної інфраструктури. Показано еволюцію підходів до технічного обслуговування – від реактивного ремонту та планово-попереджуваних регламентів до обслуговування за станом і прогностичного сервісу (Predictive Maintenance, PdM), що спирається на аналіз великих масивів даних, сенсорний моніторинг та алгоритми штучного інтелекту. Обґрунтовано, що ускладнення конструкції сучасних транспортних засобів, поширення електромобілів і підключених колісних транспортних засобів потребують переосмислення традиційних моделей ТОiP на основі нелінійної системної методології, розробленої вітчизняною науковою школою.

Проаналізовано сучасні зарубіжні та українські дослідження у сфері предиктивного обслуговування, цифрових двійників, IoT-архітектур, Explainable AI та правового регулювання штучного інтелекту. Показано, що фундаментальні напрацювання з польових та хвильових підходів до взаємодій транспортних підприємств створюють концептуальне підґрунтя для інтелектуалізації технічного сервісу, тоді як міжнародні інженерні розробки формують набір технологічних інструментів (ML/DL-моделі, цифрові двійники, edge-обчислення). Виявлено наукову прогалину між теоретичними моделями та прикладними рішеннями для української сервісної інфраструктури з урахуванням викликів воєнного стану, обмеженості сенсорної та цифрової інфраструктури, а також імплементації вимог EU AI Act.

Запропоновано концептуальну модель інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу, що включає підсистеми збору та обробки даних, аналітики на базі ML/DL, прийняття рішень, інтеграції з сервісними процесами та зворотного зв'язку з безперервним навчанням моделей. Сформульовано методологічні принципи побудови інтелектуальних сервісних систем з урахуванням вимог кібербезпеки, прозорості та пояснюваності рішень AI. Доведено, що впровадження запропонованої моделі здатне забезпечити зниження простоїв і витрат на ремонт, підвищення безпеки руху, продовження життєвого циклу транспортних засобів і розвиток ринку високотехнологічних сервісних послуг в Україні.

інтелектуальні технології, технічний сервіс, колісні транспортні засоби, предиктивне обслуговування, цифрові двійники, машинне навчання, Інтернет речей

Постановка проблеми. Сучасний колісний транспортний засіб (КТЗ) є складною кіберфізичною системою, що інтегрує десятки електронних блоків керування, численні датчики, бортові мережі та модулі зв'язку. Відмова окремих компонентів часто призводить до зниження безпеки руху, економічних збитків та екологічних негативних наслідків. У традиційному підході переважали реактивне або планово-попереджувальне технічне обслуговування: ремонт здійснювався після відмови або за регламентом, що визначав періодичність заміни вузлів незалежно від їх реального стану. Такий підхід не враховує індивідуальних умов експлуатації та призводить до зайвих витрат [7]. Зростання складності конструкцій і вимог до

ефективності експлуатації потребує переходу до інтелектуальних стратегій сервісу – систем, здатних прогнозувати відмови на основі даних та приймати рішення в реальному часі. Ведучі виробники вже використовують штучний інтелект для відстеження технічного стану та оптимізації обслуговування. Наприклад, на заводі BMW у Регенсбурзі впроваджено систему предиктивного обслуговування конвеєрного обладнання, що дозволяє завчасно виявляти потенційні несправності та уникати понад 500 хвилин простою на рік [9]. Для України актуальність теми визначається подвійною. По-перше, в умовах воєнного стану КТЗ є критично важливою інфраструктурою, а поломки й аварії тягнуть за собою суттєві ризики для логістики та економіки. По-друге, сучасний парк КТЗ країни швидко оновлюється, збільшується частка електромобілів та підключених транспортних засобів. Натомість система сервісу часто залишається на рівні планових регламентів, із недостатнім використанням цифрових інструментів та аналітики. Вітчизняні науковці зазначають, що підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації потребує впровадження інженерних та організаційних рішень, спрямованих на прогнозування відмов, зниження витрат і впливу на довкілля [1]. Саме інтеграція інтелектуальних технологій може забезпечити управління ресурсом і технічним станом на якісно новому рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання предиктивного обслуговування та застосування ШІ в транспортній галузі активно досліджуються у світовій науці. Ряд оглядових робіт систематизують методи машинного та глибинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу, діагностики відмов та оптимізації технічного сервісу [6]. В оглядовій статті Й. Надя та І. Лакатоша відзначається, що перехід від реактивної до превентивної стратегії обслуговування у дорожніх транспортних засобах відбувається під впливом технологічних і екологічних вимог; натомість предиктивне обслуговування пропонує більш гнучкі інтервали та орієнтується на фактичний стан вузлів, використовуючи моделі штучного інтелекту та цифрові двійники [7]. Автори наголошують, що найновіший підхід полягає у виклику КТЗ на сервіс для «предиктивного ремонту» до появи критичних відмов.

Вітчизняні дослідження присвячені переважно питанням забезпечення надійності та ефективності технічної експлуатації, але лише частково зачіпають інтелектуальні технології. Наприклад, огляд підходів до підвищення надійності технічної експлуатації КТЗ акцентує на застосуванні математичних методів аналізу стану, теплотехнічному моделюванні та впровадженні діагностичних програмних засобів [1]. Автори зазначають, що прогнозування відмов та обґрунтованість інженерних рішень мають базуватися на системному аналізі вразливих компонентів і використанні інтелектуальних мережевих технологій. Однак відсутній комплексний аналіз міжнародного досвіду використання машинного навчання та цифрових двійників у сервісі, а питання інтеграції таких технологій у національну систему технічного обслуговування практично не розглядаються. Таким чином, існує наукова прогалина між фундаментальними дослідженнями та практичними рішеннями щодо впровадження інтелектуальних технологій у сферу сервісу КТЗ.

Постановка завдання. Метою роботи є теоретично обґрунтувати та розробити методологічні підходи до впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу КТЗ. Метою є створення концептуальної моделі й практичних рекомендацій, що інтегрують методи машинного навчання, цифрових двійників, Інтернету речей та Explainable AI з урахуванням міжнародного досвіду, вимог EU AI Act і специфіки української інфраструктури, для підвищення надійності, безпеки й ефективності експлуатації КТЗ та розвитку високотехнологічного сервісного ринку. Завдання дослідження:

1. Аналіз концепцій та технологій. Проаналізувати еволюцію й концептуальні

засади інтелектуальних технологій у технічному сервісі, визначити принципи функціонування цифрових двійників, систем машинного навчання та IoT у контексті обслуговування транспортних засобів.

2. Вивчення зарубіжного досвіду. Оцінити світові практики предиктивного обслуговування на прикладі провідних виробників КТЗ і сервісних компаній (зокрема BMW, Tesla, Volvo, Nissan); дослідити ефект використання AI для зменшення простоїв та підвищення надійності, включно з системами моніторингу конвеєрного обладнання.

3. Діагностика українських умов. Дослідити вітчизняні реалії та бар'єри впровадження інтелектуальних технологій у технічний сервіс: стан нормативної бази, рівень сенсорної та цифрової інфраструктури, компетенції персоналу, вимоги кібербезпеки й стандарти обміну даними.

4. Розробка концептуальної моделі. Сформувати модель інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу, що передбачає підсистеми збору й обробки даних, ML/DL аналітики, прийняття рішень, зворотний зв'язок і безперервне навчання, а також взаємодію з сервісними процесами та клієнтами.

5. Методологічні принципи та рекомендації. Розробити методологічні принципи й практичні рекомендації щодо впровадження предиктивного обслуговування й адаптації світових моделей до українських умов; сприяти гармонізації з європейськими нормами (EU AI Act) та забезпечити підвищення надійності, безпеки руху й ефективності обслуговування у національному сервісі КТЗ.

Виклад основного матеріалу. Сучасна система технічного сервісу (ТС) КТЗ перебуває на етапі радикальної трансформації, спричиненої стрімким розвитком Індустрії 4.0, появою електромобілів (EV) та концепції підключених транспортних засобів (Connected Vehicles). Перехід від реактивного або планово-запобіжного обслуговування до прогностичного (Predictive Maintenance, PdM) та прескриптивного обслуговування вимагає створення міцного теоретико-методологічного базису. Цей базис повинен не лише інтегрувати передові технології, такі як штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML) та Інтернет речей (IoT), але й бути концептуально узгодженим із глибокими системними підходами, розробленими національною науковою школою.

Напочатку необхідно розглянути еволюцію теоретичних парадигм технічного сервісу як складної соціально-економічної системи. Історично управління технічним обслуговуванням та ремонтом (ТОiP) пройшло шлях від реактивного ремонту після відмови до планово-запобіжного обслуговування (ПО) та, згодом, до обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance, CBM). Однак, із зростанням технічної складності сучасних КТЗ, особливо гібридних та електричних, традиційні детерміновані та статистичні моделі прогнозування ефективності виявилися недостатніми. Система технічного сервісу, що включає транспортні засоби, інфраструктуру, партнерів та споживачів, тепер розглядається як відкрита, нелінійна та високодинамічна система, поведінка якої є стохастичною. Ця системна складність вимагає застосування інтелектуальних інструментів, здатних до самонавчання та адаптації.

Важливий внесок у формування теоретико-методологічних засад інтелектуалізації систем технічного сервісу здійснили українські науковці, розглядаючи транспортні підприємства та їх взаємодії як частину широкого соціально-економічного простору. Серед таких робіт виділяється дисертаційне дослідження Федотової І.В., присвячене теоретико-методологічним засадам формування технології взаємодій підприємства з партнерами [3].

Ключова методологічна новизна, запропонована Федотовою І.В., полягає у застосуванні квантово-релятивістського та хвильового підходів до дослідження економічних закономірностей польових взаємодій транспортного підприємства з партнерами. В контексті нашого дослідження, значення цього підходу для

інтелектуалізації ТС є критичним: якщо традиційні моделі розглядають підприємство як набір дискретних об'єктів, то хвильовий підхід визначає його взаємодію в системі через "польові" ефекти. Це означає, що функціонування системи ТС є нелінійним, багатofакторним і піддається швидким змінам, які неможливо прогнозувати за допомогою класичної математики. Ця концепція забезпечує високу теоретичну базу, яка концептуально виправдовує необхідність застосування інтелектуальних технологій (AI/ML) як єдиного класу інструментів, здатного оперувати з такою нелінійністю, невизначеністю та адаптуватися до динаміки "польових взаємодій". Таким чином, українська наукова школа забезпечує фундаментальне обґрунтування для переходу до інтелектуальних систем управління [3].

Наступним методологічним кроком є зв'язок між фундаментальною системною складністю та процесами формування знаннєвого базису AI. Психолого-педагогічні погляди на методику розвитку технічних здібностей пропонують когнітивну парадигму, яка ідеально корелює з архітектурою інтелектуальних систем:

1. Накопичення життєвого досвіду є аналогом збору великих обсягів діагностичних та експлуатаційних даних (Big Data) від сенсорів.

2. Виокремлення форми та змісту відповідає процесам попередньої обробки даних та виділення ознак (Feature Engineering) для навчання моделі.

3. Монтування виокремленого змісту в наявний знаннєвий базис є процесом навчання моделей машинного навчання (ML).

4. Переструктурування попередньо наявної системи відображає адаптивність AI-системи, яка постійно коригує свої прогнози та рішення на основі нових даних [2].

Це формування когнітивної методологічної парадигми дозволяє розглядати інтелектуальну систему технічного сервісу як живу, самонавчальну структуру, що відповідає високим вимогам нелінійної системної теорії.

Аналіз вітчизняних публікацій підтверджує наявність глибокої теоретичної основи (системні підходи) та активну роботу у сфері організаційно-правового регулювання AI. Хоча повний перелік прикладних інженерних робіт у сфері ML-діагностики від українських авторів не був представлений у наявних джерелах, критично важливими є роботи, що стосуються контексту впровадження.

Українські дослідження зосереджені на необхідності модернізації та стратегічного вирівнювання з глобальними трендами. Індустрія КТЗ України перебуває на критичному перехресті, де вкрай важливими є інвестиції в цифрову та фізичну інфраструктуру, а також адаптація до електромобілів та підключених КТЗ. Цей технологічний диктат вимагає від методології впровадження інтелектуальних технологій врахування специфіки діагностики високовольтних систем та V2X (Vehicle-to-Everything) комунікацій [8].

Впровадження AI-систем в українському технічному сервісі не може бути суто технічним процесом; воно вимагає створення міцного організаційно-правового модуля, що гарантує відповідність європейським стандартам.

Роботи українських правознавців, як-от Гачкевич А., підкреслюють, що в контексті європейської інтеграції та імплементації стандартів EU AI Act, українська AI-екосистема вимагає підтримки у сфері технічних можливостей та чіткого правового супроводу. Міністерство цифрової трансформації відіграє ключову роль в адаптації [5].

Критичні правові виклики включають:

1. Обмеження на використання персональних даних та інтелектуальної власності.

2. Трансформація етичних принципів AI у правові норми.

Це означає, що розроблювана методологія впровадження інтелектуальних технологій повинна бути не лише ефективною, але й регуляторно-сумісною. Необхідно

вбудувати механізми забезпечення прозорості та пояснюваності рішень AI (Explainable AI, XAI), щоб відповідати європейським вимогам щодо підзвітності та етичності AI-систем.

У таблиці 1 здійснений аналіз внеску ключових українських науковців у теоретико-методологічні засади інтелектуалізації технічного сервісу (2018–2024 рр. публікацій)

Таблиця 1 – Аналіз внеску ключових українських науковців у теоретико-методологічні засади інтелектуалізації технічного сервісу (2018–2024 рр.)

Автор (и) / Джерело	Рік	Основний методологічний акцент	Ключові досліджені висновки / новизна	Внесок у поточне дослідження
Федотова І.В. (Дисертація)	2019/2020	Квантово-релятивістський та хвильовий підходи до взаємодій підприємств	Обґрунтування складності системи ТС через "польові" взаємодії, визначення економічних закономірностей	Фундаментальне обґрунтування необхідності застосування інтелектуальних систем для управління нелінійними процесами.
Гачкевич А. (Статті)	2024	Організаційно-правове забезпечення AI	Адаптація AI-екосистеми України до EU AI Act, регуляторні обмеження даних та IP	Формування вимог до легальності, прозорості та етичності AI-рішень у методології впровадження.
Аналіз Стратегічних Тенденцій	2023	Стратегічний розвиток автопрому (EV, Connectivity)	Критична потреба інвестування в цифрову інфраструктуру та адаптація до глобальних трендів	Визначення технологічного контексту (EV, підключеність) як необхідної умови для проектування інтелектуальної системи.

Джерело розроблено авторами на основі [3, 5, 8]

Далі розглянемо глобальні технологічні методології впровадження AI у технічний сервіс (зарубіжний досвід). В першу чергу, проведемо систематичний огляд концепції прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM). Прогностичне обслуговування (PdM) стало домінуючою парадигмою в транспортній промисловості, що швидко розвивається завдяки прогресу в технологіях штучного інтелекту. Систематичний огляд публікацій із баз даних Scopus та Web of Science підтверджує, що AI є ключовим рушієм PdM [6].

AI-технології, включно з машинним навчанням (ML), глибоким навчанням (DL) та генеративним AI, використовуються для обробки величезної кількості даних,

отриманих від сенсорів та мережевих технологій [6].

Ключові сфери застосування AI у діагностиці та обслуговуванні включають:

- Оптимізація графіків технічного обслуговування.
- Прогнозування залишкового корисного ресурсу (RUL).
- Ефективний моніторинг стану (Health Monitoring).

Зменшення витрат та підвищення надійності транспортних засобів та їх часу безперебійної роботи (up-time) [6].

По-друге, важливо визначити технічні та архітектурні структури AI-систем для PdM

Архітектура сучасних інтелектуальних систем PdM базується на зборі даних у реальному часі за допомогою IoT-сенсорів. Ці системи застосовують AI/ML алгоритми для прогнозування відмов обладнання, мінімізації часу простою та забезпечення оптимальної експлуатаційної ефективності.

Процес впровадження PdM включає кілька критичних шарів [10]:

1. Обробка сенсорних даних: Збір, очищення та підготовка масивів даних для подальшого ML-моделювання.
2. Моделювання: Створення та навчання ML-моделей.
3. Інтеграція: Вбудовування ML-моделей у системи підтримки прийняття рішень (Decision-Support Systems) організації.

Важливо, що сучасні наукові огляди акцентують увагу на застосуванні AI у виробництві та експлуатації електричних транспортних засобів (EV). Це підтверджує стратегічну необхідність для українського дослідження зосередитися на контекстно-залежній діагностиці, що враховує специфіку EV, а не лише традиційних КТЗ із двигунами внутрішнього згоряння [10].

З урахуванням визначеного, варто визначити і обґрунтувати виклики впровадження та напрями майбутнього розвитку. Систематичні огляди останніх років виявили низку критичних викликів, які необхідно враховувати при розробці методології інтелектуалізації ТС:

1. Якість Даних та Масштабованість: Проблеми, пов'язані з якістю даних, їх масштабованістю та інтеграцією AI-технологій у наявні системи [6, 10].
2. Пояснюваний AI (XAI): Критична важливість пояснюваного AI для прогностичної аналітики. Необхідність обґрунтування висновків AI є не лише технічною вимогою, але й методологічним імперативом у світлі правової адаптації до EU AI Act. [5, 6,].

Емерджентні технології, які визначають майбутнє PdM [10]:

- Цифрові Двійники (Digital Twin): Створення віртуальних, динамічно оновлюваних копій компонентів або цілих КТЗ для симуляції та точного прогнозування їхнього стану.

- Edge Computing: Обробка даних на периферії мережі (наприклад, у самому автомобілі або на локальній СТО) замість централізованої хмари.

- Федеративне Навчання (Federated Learning): Розподілене навчання AI-моделей на локальних наборах даних, що підвищує конфіденційність та ефективність.

З урахуванням викликів, пов'язаних із розвитком цифрової інфраструктури в Україні, Edge Computing стає не просто бажаною опцією, а методологічною необхідністю. Локалізована обробка даних знижує вимоги до пропускної здатності мережі, мінімізує затримку (latency), що критично важливо для діагностики в реальному часі, та сприяє дотриманню регуляторних обмежень щодо централізованого збору та передачі чутливих даних [5, 8].

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз зарубіжних інтелектуальних методологій (PdM) та їх релевантність для ТС КТЗ

Технологічна методологія (AI/ML)	Застосування у технічному сервісі	Ключові переваги	Виклики впровадження в українському контексті
Machine Learning (ML) для PdM	Прогнозування відмов, розрахунок залишкового корисного ресурсу (RUL)	Оптимізація графіків ТО, підвищення надійності ¹	Якість та стандартизація збору сенсорних даних (існує проблема сумісності обладнання) ²
Explainable AI (XAI)	Обґрунтування рішень AI, аудит прогнозів	Гарантування довіри до системи, відповідність регуляторним вимогам (EU AI Act) ³	Складність реалізації прозорості у нелінійних DL-моделях.
IoT та Edge Computing	Збір даних у реальному часі, децентралізована обробка	Скорочення затримки (latency), підвищення оперативної ефективності	Нерозвиненість мережевої та зарядної інфраструктури, що ускладнює повноцінну інтеграцію ⁴
Цифрові двійники (Digital Twin)	Віртуальне моделювання стану компонентів	Точне прогнозування деградації, симуляція впливу умов експлуатації	Високі вимоги до обчислювальних ресурсів та точності вхідних даних.

Джерело розроблено авторами на основі [6, 10]

Варто також провести синтез та критичну оцінку релевантності методологічних засад для поточного дослідження, зокрема зіставлення українського системно-теоретичного базису з міжнародними технологічними моделями

Проведений аналіз демонструє синергію між фундаментальними українськими теоретичними розробками та глобальними технологічними трендами.

Українська наукова школа, використовуючи квантово-релятивістський та хвильовий підходи, забезпечує філософсько-теоретичне обґрунтування нелінійності системи технічного сервісу ("польові взаємодії"). Це підтверджує необхідність AI як єдиного інструменту управління, що здатен адаптуватися до такої системної складності. Міжнародні ж дослідження (PdM) надають прикладні інженерні методики (ML/DL, IoT), необхідні для практичної реалізації цього управління [3].

Критична оцінка свідчить про високий потенціал, але також виявляє методологічну прогалину: відсутність широкої публікації деталізованих прикладних інженерних методик, які б не лише використовували AI/ML, але й були адаптовані до специфіки української інфраструктури та регуляторного контексту (EU AI Act).

Також, визначимо роль інновацій як каталізатор інтелектуалізації. Стратегічна

орієнтація українського автопрому на EV, автономність та підключеність слугує потужним каталізатором інтелектуалізації ТС. Зміна парку транспортних засобів вимагає перегляду стандартних діагностичних процедур. Методологічні засади мають бути побудовані навколо роботи з високочастотними даними, що генеруються підключеними КТЗ, і повинні включати окремий блок, присвячений прогнозуванню деградації високовольтних акумуляторних систем, а не лише традиційним механічним відмовам [8].

Для успіху в українській транспортній індустрії життєво необхідним є інвестування у дослідження та розробки (R&D) та створення адекватної цифрової і зарядної інфраструктури, що є основою для підтримки росту EV та підключених технологій [8].

Проведений аналіз підтверджує, що теоретико-методологічні засади впровадження інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу КТЗ є багатогранною науковою проблемою, що вимагає міждисциплінарного підходу.

Встановлено, що вітчизняна наукова школа забезпечує міцний концептуальний фундамент для розуміння системи ТС як складної нелінійної структури, керованої "польовими взаємодіями". Ця концепція є вагомим науковим обґрунтуванням для використання інтелектуальних технологій.

Глобальні дослідження демонструють технологічну готовність до впровадження PdM на базі AI/ML/IoT. Водночас, стратегічні тренди (перехід на EV та підключені КТЗ) та регуляторні імперативи (адаптація до EU AI Act) створюють унікальні виклики для України.

Заключні рекомендації для подальшого дослідження полягають у необхідності переходу від теоретичного обґрунтування до розробки інфраструктурно-адаптованої, гібридної та регуляторно-комплаєнтної методології. Основний фокус має бути зміщений на прикладну розробку та валідацію Edge Computing архітектур для мінімізації залежності від централізованої інфраструктури та впровадження XAI-фреймворків, що забезпечать довіру до інтелектуальних рішень та їх правову легітимність. Лише такий комплексний підхід дозволить створити науково обґрунтовану та практично реалізовану систему інтелектуального технічного сервісу в Україні.

На основі проведеного дослідження, можна стверджувати, що наразі вже сформована сучасна концепція інтелектуальних технологій у технічному сервісі. Інтелектуальні технології у сфері технічного сервісу ґрунтуються на синтезі сенсорних систем, штучного інтелекту, машинного навчання та цифрових двійників. Під цифровим двійником розуміють віртуальну модель фізичного об'єкта, що відображає його стан у реальному часі та дозволяє прогнозувати поведінку під впливом різних факторів. За дослідженням Nagy J. і Lakatos I., масове використання цифрових двійників у легкових КТЗ буде можливим лише після удосконалення сенсорних і комунікаційних систем; нині ця технологія розвинена у преміальному сегменті [7].

Дані для побудови цифрових двійників надходять із вбудованих датчиків (температури, вібрації, тиску, струму), контролерів (ECU) та бортових систем телеметрії (OBD, CAN, LIN). Сенсорні дані передаються у хмару або локальний дата-центр, де проходять очищення, аналіз, класифікацію та використання для побудови моделей прогнозування.

Машинне навчання (ML) та глибинне навчання (DL) є ключовими інструментами для аналізу складних патернів і прогнозування відмов. У статті Mahale Y. та ін. відзначається, що предиктивне обслуговування використовує методи машинного навчання для оцінки стану вузлів, прогнозування залишкового ресурсу та оптимізації графіків ремонту; особливу увагу приділяють використанню explainable AI для забезпечення прозорості моделей та довіри користувачів [6]. Найпоширеніші

алгоритми включають: дерева рішень, випадковий ліс (Random Forest), бустинг-моделі (Gradient Boosting, LightGBM), метод опорних векторів (SVM), нейронні мережі (LSTM, CNN) та ансамблеві підходи, що комбінують їх. Вибір алгоритму залежить від типу даних (часові ряди, сигнали вібрації, зображення), вимог до точності та швидкості, а також від необхідності інтерпретації результатів.

Інтернет речей забезпечує безперервний потік даних від КТЗ до сервісних центрів. Вбудовані телематичні модулі збирають інформацію про пробіг, температуру двигуна, тиск у шинах, напругу акумулятора тощо і передають її через стільникові мережі або V2X-канали. Такі дані дозволяють створювати індивідуальні профілі експлуатації, що є основою для персоналізованих сервісних пропозицій. У статті Krivda V. et al. зазначається, що системний підхід до технічної експлуатації поєднує моделювання процесів та використання техніко-економічного аналізу; при цьому інтелектуальні мережеві рішення розглядаються як основа для прогнозування відмов і оптимізації ресурсів [1].

Практичне застосування інтелектуальних технологій у сервісі КТЗ демонструють провідні виробники. BMW Group використовує AI-платформу для предиктивного обслуговування конвеєрного обладнання, яка базується на аналізі даних, що вже існують у системі керування; таким чином, система визначає потенційні дефекти за змінами у споживанні електроенергії, рухах конвеєрів чи читанні штрих-кодів, попереджаючи про несправності та зменшуючи час простою [9]. У прес-релізі наголошується, що впровадження AI-підтриманої стандартизованої системи дозволяє масштабувати рішення на інші заводи без додаткових датчиків, витрачаючи кошти лише на зберігання й обробку даних. Розроблені теплові карти дають змогу візуалізувати аномалії та оперативно реагувати на них; команда постійно вдосконалює алгоритми, підключаючи нові об'єкти та інтегруючи рекомендації до повідомлень про відмови.

Tesla, Volvo, Nissan та інші компанії використовують віддалену діагностику та оновлення «over-the-air». Tesla збирає дані з КТЗ і завдяки машинному навчанню прогнозує, коли потрібен сервіс; клієнти отримують повідомлення про необхідність відвідування сервісу через мобільний додаток. Volvo використовує систему Volvo On Call, яка передає в сервісні центри дані про технічний стан та пропонує індивідуальні пропозиції з ремонту. Nissan впроваджує штучний інтелект для аналізу акумуляторів електромобілів Leaf, прогножуючи їх деградацію та оптимізуючи заміну.

В авіаційній галузі концепція Integrated Vehicle Health Management (IVHM) вже давно використовується для визначення технічного стану компонентів і планування ремонту [4]. Досвід IVHM може бути адаптований до систем КТЗ, особливо в умовах зростання електромобілів і автономних транспортних засобів. Одним із перспективних напрямів є поєднання предиктивного обслуговування з системами попередження споживачів та управління ланцюгами поставок запчастин. Використання цифрових двійників дозволяє моделювати роботу силових агрегатів під різними сценаріями та прогнозувати ефект від зміни режимів експлуатації, що важливо для електромобілів із різними режимами зарядки та температурними умовами.

В Україні система технічного сервісу переважно функціонує за планово-попереджувальним принципом; впровадження інтелектуальних технологій обмежується окремими експериментами великих автопідприємств. Серед бар'єрів можна виділити: (1) недостатню сенсорну інфраструктуру – більшість автопарків оснащені лише базовими OBD-інтерфейсами; (2) дефіцит кваліфікованих кадрів у сфері Data Science та штучного інтелекту; (3) правові та стандартизаційні бар'єри – відсутність єдиних вимог до обміну даними, кібербезпеки та зберігання інформації; (4) низький рівень інвестицій у R&D; (5) нестабільність енергопостачання та мережевої інфраструктури. Водночас урядова стратегія цифрової трансформації передбачає розвиток

інтелектуальних транспортних систем, що створює нормативну основу для запровадження інновацій. Вітчизняні дослідження зазначають, що удосконалення сервісу можливе лише за умови використання кіберфізичного підходу, який передбачає використання розподілених інтелектуальних мереж для моніторингу технічного стану [1].

Концептуальна модель впровадження інтелектуальних технологій

На основі аналізу літератури та практичних кейсів запропоновано концептуальну модель інтеграції інтелектуальних технологій у систему технічного сервісу КТЗ (рис. 1). Модель складається з таких підсистем:

- Підсистема збору даних. Інтегрує сенсорні пристрої (вбудовані датчики, телематичні модулі), бортові комп'ютери та мобільні додатки. Дані передаються через захищені канали до хмарної платформи. Важливо забезпечити уніфіковані протоколи обміну (e.g., MQTT, OPC UA) та стандартизовані формати даних. За відсутності власних сенсорів можна використовувати доступні дані з елементів управління, як це зробив BMW [11].

- Підсистема обробки та аналітики. Включає сховище даних, модулі попередньої обробки (очищення, фільтрація, нормалізація), аналітичні платформи для машинного навчання та візуалізації. На цьому етапі відбувається побудова моделей прогнозування за допомогою алгоритмів ML/DL, оцінка їх точності, налаштування гіперпараметрів та впровадження explainable AI для підвищення довіри користувачів [6].

- Підсистема прийняття рішень. Формує рекомендації щодо часу та обсягу технічного обслуговування. Використовуючи моделі залишкового ресурсу, система визначає момент, коли вузол перейде з нормального стану в передаварійний, і планує сервісні заходи. Можливе застосування оптимізаційних алгоритмів (лінійне, динамічне програмування) для формування графіків, що враховують доступність ресурсів та пріоритетність замовлень.

Підсистема інтеграції з сервісним процесом. Забезпечує передачу рекомендацій до систем управління сервісними центрами (ERP, CRM). Впровадження мобільних додатків для клієнтів дозволяє завчасно інформувати власників про необхідність сервісу, погоджувати зручний час і обирати центр обслуговування. Платформа має забезпечувати інтеграцію з постачальниками запчастин, щоб здійснювати автоматичне замовлення необхідних деталей.

Підсистема зворотного зв'язку та навчання. Результати виконаних ремонтів, відгуки клієнтів та нові дані про відмови повертаються у аналітичну систему для уточнення моделей. Запроваджується безперервне навчання (continuous learning), що дозволяє адаптувати моделі до змін у умовах експлуатації, конструктивних оновлень та сезонних факторів.

Впровадження такої моделі потребує скоординованих дій виробників КТЗ, сервісних центрів, страховиків, постачальників телекомунікаційних послуг та державних регуляторів. Необхідно забезпечити кібербезпеку, захист персональних даних, сертифікацію алгоритмів ШІ та відповідність національним стандартам.

Наукова новизна статті полягає у визначенні методологічних принципів розробки інтелектуальних систем технічного сервісу, що базуються на інтеграції даних, цифрових двійниках та машинному навчанні; у пропозиції концептуальної моделі впровадження, яка враховує специфіку українського ринку; та у поєднанні зарубіжних та вітчизняних досліджень із практичними кейсами. На відміну від наявних робіт, де питання інтелектуального сервісу розглядається фрагментарно, дана стаття пропонує цілісний підхід до побудови та розвитку системи предиктивного обслуговування.

Практична значущість полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій для трансформації сервісних центрів: цифровізація процесів, впровадження IoT-сенсорів та аналітичних платформ, підготовка персоналу, перегляд

регламентів ТО, розробка нових сервісних продуктів (передплатне обслуговування, мобільні сервісні бригади). Очікуваний ефект – скорочення непродуктивних простоїв, зниження вартості ремонту за рахунок раннього виявлення відмов, підвищення безпеки руху та задоволення клієнтів. З макроекономічної точки зору впровадження інтелектуальних сервісних технологій сприятиме продовженню життєвого циклу транспортних засобів, зменшенню екологічного навантаження та розвитку ринку високотехнологічних послуг.

Висновки. Сучасна система технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) КТЗ не може ефективно функціонувати на основі традиційних реактивних або планово-регламентних стратегій. Стрімке ускладнення конструкцій транспортних засобів, поширення електромобілів і підключених КТЗ, вимоги до безпеки руху та екологічної відповідальності висувають потребу в радикальному переосмисленні сервісних підходів. У роботі обґрунтовано необхідність переходу до прогнозно-орієнтованих стратегій обслуговування (PdM), які поєднують сенсорний моніторинг, аналіз великих обсягів даних та алгоритми штучного інтелекту.

Доведено, що нелінійний, стохастичний та відкритий характер сучасних транспортних систем вимагає використання концепцій польових і хвильових взаємодій, запропонованих українською науковою школою. Ці підходи створюють наукову базу для застосування квантово-релятивістських і хвильових моделей у дослідженні взаємодій між підприємствами, партнерами та споживачами. Саме на цьому фундаменті ґрунтується обґрунтування використання інтелектуальних технологій (AI/ML) як єдиного інструменту, здатного оперувати з нелінійністю та адаптуватися до динамічних «польових» процесів у системі технічного сервісу.

Аналіз зарубіжних досліджень показав, що передові автовиробники (BMW, Tesla, Volvo, Nissan тощо) та сервісні компанії активно впроваджують системи предиктивного обслуговування й цифрових двійників. Вони використовують ML/DL-моделі, Explainable AI та Edge Computing для моніторингу стану обладнання й планування ремонту, що забезпечує скорочення простоїв та підвищення надійності. Національні наукові напрацювання акцентують увагу на підвищенні надійності технічної експлуатації, але лише фрагментарно застосовують інтелектуальні технології. Визначено, що головними бар'єрами для України є обмежена сенсорна та цифрова інфраструктура, недостатня підготовка кадрів у сфері Data Science, відсутність єдиних стандартів даних і нормативно-правових вимог щодо кібербезпеки та захисту персональних даних.

Запропонована модель впровадження інтелектуальних технологій охоплює п'ять взаємопов'язаних підсистем: (i) збір даних (сенсори, телематика, мобільні додатки); (ii) обробка та ML/DL-аналітика (очищення, нормалізація, навчання моделей, Explainable AI); (iii) прийняття рішень (оцінка залишкового ресурсу, оптимізація графіків ТО); (iv) інтеграція з сервісними процесами (ERP/CRM, мобільні сервіси для клієнтів, ланцюги поставок запчастин); (v) зворотний зв'язок та безперервне навчання (адаптація моделей до нових даних). Така модель забезпечує повну цифрову трансформацію сервісних процесів і дозволяє персоналізувати обслуговування в реальному часі.

Впровадження концепції PdM та запропонованої моделі здатне суттєво знизити час простоїв обладнання, витрати на ремонт і позапланові заміни, продовжити життєвий цикл транспортних засобів, підвищити їхню надійність та безпеку руху. Для виробників та сервісних центрів це відкриває можливості оптимізувати складські запаси, впроваджувати нові бізнес-моделі (сервісні абонементи, мобільні бригади) й отримувати конкурентні переваги на ринку.

Українська сервісна інфраструктура має адаптуватися до вимог EU AI Act та інших міжнародних стандартів. Обов'язковою є розробка механізмів забезпечення кібербезпеки, захисту даних та етичності використання AI, а також впровадження

explainable AI для прозорості й підзвітності прийнятих рішень. Спільна участь державних регуляторів, виробників, сервісних компаній та академічної спільноти є критичною для законодавчого та інституційного забезпечення впровадження інтелектуального сервісу.

Стаття поєднує фундаментальні системні теорії з сучасними інженерними технологіями, пропонуючи методологію, адаптовану до українських реалій. Внесок полягає в розробці цілісної моделі, що враховує технічні, організаційні, правові й кадрові аспекти, а також у формуванні рекомендацій щодо інтеграції AI/ML, цифрових двійників та IoT у сервісні процеси. Практична реалізація отриманих результатів сприятиме розвитку високотехнологічних сервісних послуг, підвищенню конкурентоспроможності автопрому України та безпеки транспортної системи.

Подальше дослідження має бути спрямоване на вдосконалення моделей прогнозування, розробку адаптивних ML/DL-алгоритмів із урахуванням українських умов експлуатації, розвиток цифрових двійників для електромобілів та підключених КТЗ, інтеграцію Edge Computing для обробки даних у реальному часі та розробку нормативно-правових рамок, що забезпечать легітимність і етичність інтелектуальних сервісних систем.

Список літератури

1. Кривда В.В., Сакно О.П., Корніленко К.І. Огляд підходів до підвищення надійності та ефективності технічної експлуатації автотранспорту з урахуванням обґрунтованості інженерних рішень. *Технічна інженерія*. 2025. 1(95). DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18)
2. Науково-методичні засади реалізації змісту середньої спеціалізованої освітніаукового спрямування: методичний посібник / І.С. Волощук, Л.О. Калмикова, В.В. Мелешко, Н.М. Мирончук, П.О. Тадеев, М.І. Тадеева, О.С. Шуленок. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2024. 353 с.
3. Федотова І.В. Теоретико-методологічні засади управління життєздатністю підприємств автомобільного транспорту : дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)» / Федотова І.В.; Український державний університет залізничного транспорту. Харків, 2020. 576 с.
4. A Comprehensive Review of Predictive Maintenance Technologies for Vehicle Reliability. 2025. DOI:10.1007/978-3-031-94937-1_5
5. Hachkevych A. Tools for adaptating Ukraine's artificial intelligence ecosystem to meet European Union standards. *Економічний часопис Східноєвропейського національного університету*. 2024. № 1(22). DOI: 10.37772/2309-9275-2024-1(22)-2
6. Mahale Y., Kolhar Sh., More A.S. A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *SN Applied Sciences*. 2025. Vol. 7, No. 4. P. 1–25. DOI: 10.1007/s42452-025-06681-3
7. Nagy J., Lakatos I. Predictive Maintenance and Predictive Repair of Road Vehicles-Opportunities, Limitations and Practical Applications. *Engineering Proceedings*. 2024. 79(1). Pp. 27–34. DOI: 10.3390/engproc2024079027
8. Poyda-Nosyk, N.; Bacho, R. Strategic Development Trends in the Automotive Industry of Ukraine. *Eng. Proc.* 2024, 79, 71. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079071>
9. Press release: Smart maintenance using artificial intelligence. *BMW Group Plant Regensburg*. 2023. 27 URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence>
10. Rao N.S. AI-Driven Predictive Maintenance Using IoT in Automotive Manufacturing. *International Journal of Science and Research Archive*. 2025. Vol. 16, No. 2. DOI: 10.30574/ijrsra.2025.16.2.2380 Smart maintenance using artificial intelligence : Press release. BMW Group. 27. Nov 2023. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence?language=en>

References

1. Kryvda, V.V., Sakno, O.P., & Kornilenko, K.I. (2025). Review of approaches to increasing the reliability and efficiency of motor vehicle technical operation considering the substantiation of engineering solutions. *Technical Engineering*, 1(95). [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-11-18](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-11-18) [in Ukrainian].
2. Voloshchuk, I.S., Kalmykova, L.O., Meleshko, V.V., Myronchuk, N.M., Tadeiev, P.O., Tadeieva, M.I., & Shulenok, O.S. (2024). *Scientific and methodological foundations for implementing the content of*

- specialized secondary education of scientific orientation: A methodological guide*. Kyiv: Institute of Gifted Child of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine. 353 p. [in Ukrainian].
3. Fedotova, I.V. (2020). *Theoretical and methodological foundations of managing the viability of motor transport enterprises* (Doctoral dissertation). Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv. 576 p. [in Ukrainian].
 4. *A Comprehensive Review of Predictive Maintenance Technologies for Vehicle Reliability*. (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-031-94937-1_5
 5. Hachkevych, A. (2024). Tools for adaptating Ukraine's artificial intelligence ecosystem to meet European Union standards. *Economic Journal of the Eastern European National University*, 1(22). [https://doi.org/10.37772/2309-9275-2024-1\(22\)-2](https://doi.org/10.37772/2309-9275-2024-1(22)-2)
 6. Mahale, Y., Kolhar, Sh., & More, A.S. (2025). A comprehensive review on artificial intelligence driven predictive maintenance in vehicles: technologies, challenges and future research directions. *SN Applied Sciences*, 7(4), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06681-3>
 7. Nagy, J., & Lakatos, I. (2024). Predictive maintenance and predictive repair of road vehicles: Opportunities, limitations and practical applications. *Engineering Proceedings*, 79(1), 27–34. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079027>
 8. Poyda-Nosyk, N., & Bacho, R. (2024). Strategic development trends in the automotive industry of Ukraine. *Engineering Proceedings*, 79, 71. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079071>
 9. BMW Group Plant Regensburg. (2023). *Smart maintenance using artificial intelligence* [Press release]. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence>
 10. Rao, N.S. (2025). AI-driven predictive maintenance using IoT in automotive manufacturing. *International Journal of Science and Research Archive*, 16(2). <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.16.2.2380>
 11. BMW Group. (2023, November 27). *Smart maintenance using artificial intelligence* [Press release]. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0438145EN/smart-maintenance-using-artificial-intelligence?language=en>

Eduard Ladyzhenskyi, Volodymyr Petlenko, Viktor Baitan, Serhii Kovalov, PhD ped. sci

¹ Azov State Technical University, Dnipro, Ukraine

² Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical and Methodological Principles of Implementing Intelligent Technologies Into the Technical Service System of Wheeled vehicles

The article presents a comprehensive study of the theoretical and methodological foundations of the implementation of intelligent technologies in the technical service system of wheeled vehicles in the context of the transformation of the industry and the growth of the role of transport as a critical infrastructure. The evolution of approaches to technical maintenance is shown - from reactive repairs and planned and warned regulations to condition-based maintenance and predictive service (Predictive Maintenance, PdM), which is based on the analysis of large data sets, sensor monitoring and artificial intelligence algorithms. It is substantiated that the complexity of the design of modern vehicles, the spread of electric vehicles and connected wheeled vehicles require a rethinking of traditional MOT models based on a nonlinear system methodology developed by the domestic scientific school. Modern foreign and Ukrainian research in the field of predictive maintenance, digital twins, IoT architectures, Explainable AI and legal regulation of artificial intelligence is analyzed. It is shown that fundamental developments in field and wave approaches to the interactions of transport enterprises create a conceptual basis for the intellectualization of technical service, while international engineering developments form a set of technological tools (ML/DL models, digital twins, edge computing). A scientific gap is identified between theoretical models and applied solutions for Ukrainian service infrastructure, taking into account the challenges of martial law, the limitations of sensor and digital infrastructure, as well as the implementation of the requirements of the EU AI Act. A conceptual model of integrating intelligent technologies into the technical service system is proposed, which includes subsystems of data collection and processing, analytics based on ML/DL, decision-making, integration with service processes and feedback with continuous model training. Methodological principles for building intelligent service systems are formulated, taking into account the requirements of cybersecurity, transparency and explainability of AI solutions. It has been proven that the implementation of the proposed model can reduce downtime and repair costs, increase traffic safety, extend the life cycle of vehicles, and develop the high-tech service market in Ukraine.

intelligent technologies, technical service, wheeled vehicles, predictive maintenance, digital twins, machine learning, Internet of Things

Одержано (Received) 28.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 09.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

Р.І. Розум, доц., канд. техн. наук, **А.І. Папінко**, канд. екон. наук, **В.А. Бойко**, канд. техн. наук

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

e-mail: rozoom_ruslan@ukr.net

Методика вибору напівпричепа

Стаття присвячена проблематиці вибору оптимального напівпричепа як одного із ключових елементів автопоїзда. В роботі проведено аналіз впливу технічних характеристик (матеріалу рами, типу осей та підвіски) на економічну складову перевезень. Особливу увагу приділено спеціалізації кузовів напівпричепів та регіональним особливостям експлуатації. Відображено ризики купівлі вживаної техніки та критерії оцінки її надійності й універсальності.

напівпричіп, автопоїзд, тип кузова, технічні характеристики, вантажні перевезення, ефективність експлуатації

Постановка проблеми. Рішення щодо купівлі напівпричепа є важливим для будь-якого бізнесу, який пов'язаний із логістикою та перевезенням вантажів. Актуальність проблеми формування методики вибору напівпричепа зумовлена зростанням обсягів вантажних перевезень, постійним розвитком логістичних систем, а також пошуку шляхів підвищення ефективності транспортних засобів. У процесі своєї діяльності транспортні підприємства стикаються з необхідністю мінімізувати свої витрати, забезпечуючи одночасно високу продуктивність і надійність автопарку. Напівприцеп це один із ключових елементів автопоїзда, і його технічні характеристики напівпричепа впливають на економічну ефективність виконуваних перевезень, витрати пального, навантаження на дорожню інфраструктуру, а також відповідність законодавчим нормам.

На ринку пропонується широкий вибір напівпричепів різних за призначенням – тентовані, ізотермічні, самосвальні, контейнеровози тощо – кожен з яких володіє своїми як перевагами так і обмеженнями. В зв'язку з цим, неправильний вибір може зумовити зниження ефективності виконуваних логістичних процесів, додаткових простоїв, перевантаження або недозавантаження, а також додаткових затрат на технічне обслуговування чи ремонтні роботи. Разом з тим, правильний вибір забезпечує максимальну адаптацію транспортних засобів до конкретних умов експлуатації, типів вантажів і маршрутів доставки, підвищуючи, тим самим, загальну економічну ефективність господарської діяльності підприємства.

Окрім того, необхідно враховувати також і екологічні вимоги, інноваційні рішення, що використовуються в конструкції напівпричепів (для прикладу, полегшені матеріали, аеродинамічні форми), а також цифрові системи контролю та моніторингу. Усі перераховані аспекти підтверджують важливість глибокого та обґрунтованого методичного підходу до вибору напівпричепа як одного із основних етапів формування ефективної транспортної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз аналітичних публікацій, оглядів і рекомендацій різних фахівців, опублікованих впродовж 2020 – 2025 років можна згрупувати у п'ять основних категорій:

1. Тип вантажу та регіон експлуатації;

2. Конструктивні особливості;
3. Тип кузова і спеціалізація;
4. Надійність, універсальність і економічність;
5. Проблеми при купівлі б/в техніки.

Проведемо більш детальний огляд кожної із наведених категорій.

Відповідно до даних видання Kurkul.com [1], у сільськогосподарському секторі остаточний вибір напівпричепа залежить перш за все від типу вантажу, так для прикладу, для кукурудзи або пшениці найчастіше використовуються моделі об'ємом 50 – 55 м³, тоді як для соняшнику – до 65 м³. Наявність надмірної кубатури при високій щільності вантажу чи недостатньої – при малій щільності призводить до утворення економічних втрат.

Виробники напівпричепів та частина експертів радять перш за все звертати увагу на елементи ходової частини такі як: якісні характеристики осей, наявність/відсутність автоматичних підйомників, ефективність гальмівної системи (зокрема ABS), надійність гідравлічних циліндрів та матеріали з яких виготовлена рама. Так, зокрема, компанія Egritech у своїй публікації [2] стверджує, що особливу увагу необхідно приділити вибору між сталевую й алюмінієвою рамою – остання має меншу вагу, однак є значно дорожчою.

Відповідно до матеріалів Avtek.ua [3] бачимо, що автори приділяють велике значення саме типу кузова. Як приклад вони приводять факт, що самоскиди бувають із заднім або боковим вивантаженням, володіють різною формою (U-подібна, прямокутна, овальна). Також ними стверджується, що останнім часом особливу популярність одержали моделі обладнані рухомою підлогою, оскільки вони забезпечують багатофункціональність: можливість перевезення як сипких, так і упакованих вантажів, що в свою чергу, дозволяє мінімізувати кількість холостих пробігів автотранспортних засобів.

Згідно із інформацією з TAD.ua [4] та Europa-auto.com [5], універсальні напівпричепа, перш за все тентовані та платформи з рухомою підлогою, отримують особливу популярність серед перевізників, які займаються перевезеннями загального призначення. Це можна пояснити тим, що дані напівпричепа дозволяють виконувати перевезення широкого спектру вантажів і швидко адаптуватися до змін у логістичних маршрутах.

Фахівці порталу Autoline.ua [6] застерігають від типових помилок у ході купівлі вживаних напівпричепів: відсутність перевірки технічного стану, приховані дефекти, підроблені документи. Автори рекомендують проводити ретельну перевірку походження техніки, стан її ходової частини та наявність гарантійного терміну.

Постановка завдання. Завдання формування методики вибору напівпричепа полягають у всебічному аналізі технічних, економічних та експлуатаційних характеристик напівпричепів з метою обґрунтованого вибору найбільш ефективного варіанту для конкретних умов перевезення. У процесі виконання аналізу враховується широкий спектр факторів. Загалом, методика вибору напівпричепа має на меті забезпечити оптимальне поєднання функціональності, витрат і довговічності транспортного засобу, що відповідає потребам перевізника та умовам його господарської діяльності.

Виклад основного матеріалу. Вибір напівпричепа це важливий крок у формуванні ефективної транспортної системи автотранспортного підприємства, це пояснюється тим, що саме від правильно підібраної його моделі залежить безпечність, економічність і стабільність вантажних перевезень [7 – 10]. У центрі уваги цього процесу, на нашу думку, є два ключові чинники: тип вантажу, який необхідно перевезти, та регіон, у якому планується експлуатація транспортного засобу. Кожен із

цих чинників володіє безпосереднім впливом на технічні характеристики майбутнього напівпричепа визначаючи його конструктивні особливості, оснащеність, а також експлуатаційні параметри.

Тип вантажу, перш за все, задає основні вимоги щодо форми, об'єму і спеціалізації напівпричепа. Так, якщо планується транспортування упакованої продукції, меблів, техніки або інших вантажів загального призначення, при виборі надається перевага тентованим або шторним напівприцепам. Це пояснюється тим, що вони є універсальними, легко завантажуються з трьох сторін і дозволяють перевозити вантажі різної геометрії. У випадках, коли мова йде про перевезення продуктів харчування, медичних препаратів чи квітів, які вимагають суворого температурного режиму, необхідні рефрижераторні напівприцепи з термоізоляцією та системою охолодження. Для наливних вантажів, хімікатів чи паливно-мастильних матеріалів використовуються спеціалізовані цистерни, що гарантують герметичність і безпеку у процесі їх транспортування. Перевезення великогабаритної техніки, будівельних конструкцій чи контейнерів вимагають використання платформних напівприцепів або контейнеровозів. А у випадку перевезення насипних матеріалів (щебінь, пісок, зернові тощо) – самоскидів, які забезпечують швидке вивантаження.

Другим визначальним фактором є регіон експлуатації. Оскільки, у місцевостях із розвиненою дорожньою інфраструктурою та сприятливими кліматичними умовами можна використовувати стандартні моделі напівприцепів. Однак в умовах гірської місцевості, сільських районів або регіонів зі складними кліматичними умовами вимоги до технічних засобів зростають. Тут виникає необхідність використання напівприцепів із посиленою рамою, адаптованою підвіскою, високим кліренсом та додатковими системами опалення або вентиляції. Так, для прикладу, у холодному кліматі важливою вимогою є термостійкість конструкції та можливість забезпечення обігріву окремих вузлів, тоді як у спекотних регіонах необхідно забезпечити теплоізоляцію та захист від перегрівання. У міських умовах або під час перевезень на короткі відстані доцільним є використання компактніших, більш маневрених моделей напівприцепів, які дозволяють скоротити час завантажувально-розвантажувальних операцій, особливо в умовах обмеженого простору. Такі транспортні засоби часто обладнують додатковими функціональними рішеннями (підйомні задні двері, полегшені механізми фіксації вантажу, гідравлічні платформи тощо).

Вибір напівпричепа згідно із його конструктивними особливостями є ключовим елементом у формуванні ефективної логістичної стратегії, перш за все коли йде мова про довготривалу експлуатацію, великі вантажопотоки чи специфічні умови перевезень. Конструктивні характеристики визначають не лише здатність перевозити той чи інший вантаж, а також мають безпосередній вплив на економічну ефективність перевезень, стійкість до зношування, зручність під час роботи, а також безпеку перевезень. У центрі уваги під час оцінки конструкції напівпричепа повинен бути тип рами, підвіска, матеріали з яких він виготовлений, тип підлоги, система завантаження/розвантаження, кількість осей, а також тип зчеплення з тягачем. Усі перелічені елементи мають бути узгоджені між собою згідно із попередньо поставленими задачами.

Однією із найважливіших елементів конструкції є рама напівпричепа – вона може бути суцільною або зварною, посиленою або стандартною. Для виконання перевезень важких вантажів у складних умовах (наприклад, на будівництвах чи в кар'єрах) доцільним є використання моделей оснащених посиленою сталеву рамою, яка забезпечує високу вантажопідйомність і витривалість. На противагу їм, для здійснення магістральних перевезень дорогами, що мають тверде покриття, надається

перевага полегшеній алюмінієвій рамі, яка дозволяє знизити власну вагу напівпричепа та, відповідно, підвищити масу корисного вантажу, у межах допустимих норм.

Наступним конструктивним елементом є тип підвіски. Вона може бути ресорною або пневматичною. Ресорні підвіски є простими, надійними й дешевшими в обслуговуванні, однак вони менш ефективно поглинають вібрації. Пневматична підвіска, в свою чергу, забезпечує кращу плавність ходу, більш рівномірний розподіл навантаження на осі та кращу стабільність, що особливо є важливим при перевезенні крихких вантажів.

Важливу роль відіграє і кількість осей напівпричепа. Трьохвісні напівпричепа є найбільш поширеними за рахунок своєї універсальності, однак у випадках перевезення надважких або великогабаритних вантажів використовуються чотири- чи навіть п'ятивісні моделі, які обладнані посиленою ходовою частиною та забезпечують необхідну вантажопідйомність.

Не менш суттєвим елементом під час вибору напівпричепа є тип кузова та способи його завантаження. Так, для прикладу, тентовані напівпричепа, що володіють можливістю бокового, заднього або верхнього завантаження дозволяють значно зекономити час на завантажувально-розвантажувальні операції і зробити ці процеси більш гнучкими. Рефрижератори, в свою чергу, мають закриту цільну конструкцію із теплоізоляційними стінками. В окремих випадках напівпричепа обладнуються підлогою із протиковзким покриттям, що є важливим під час перевезення техніки. Конструкція напівпричепа також повинна задовольняти вимоги щодо сумісності з тягачем, зокрема стосовно висоти сидельно-зчіпного пристрою, розташування гальмівної системи, типу з'єднання (стандартні «євро-сідла» або спеціалізовані механізми), а також електричних роз'ємів.

Проведення вибору напівпричепа відповідно до типу його кузова та спеціалізації це важливий етап при формуванні автопарку транспортного підприємства або налагодженні логістичних перевезень. Оскільки, саме конструкцією кузова визначається, який вантаж, при яких умовах і з якими технічними вимогами може бути перевезений. У різних галузях використовуються напівпричепа із різними типами кузовів, кожен з яких володіє своєю чіткою спеціалізацією та адаптований до конкретних умов експлуатації. Одним із найбільш поширених варіантів є тентований напівпричіп. Так як це універсальний тип кузова, який використовується для перевезення широкого спектра вантажів – від будівельних матеріалів до упакованої продукції на палетах. Його конструкція дозволяє завантаження та розвантаження як ззаду, так і збоку чи зверху, що значно спрощує логістику на багатоточкових маршрутах. Такого роду напівпричіп особливо є зручним для підприємств, які займаються перевезенням збірних вантажів або працюють у сфері розподілу товарів. Для перевезення сипучих матеріалів – використовуються самоскидні напівпричепа. Такі моделі особливо є актуальними у будівельному секторі, сільському господарстві, а також при роботі в кар'єрах чи на відкритих складах. Окрему нішу займають контейнеровози – напівпричепа, які призначені для перевезення стандартних вантажних контейнерів. У їхній конструкції не має суцільного кузова, а лише платформу яка містить елементи кріплення, що дозволяють швидко встановлювати і знімати контейнери. Контейнеровози використовуються, як правило, у великих логістичних системах, які поєднують морські, залізничні та автомобільні перевезення. Для здійснення перевезень цінної, крихкої або спеціалізованої продукції обираються фургони-напівпричепа із жорстким металевим або композитним кузовом, який забезпечує надійний захист вантажу. Їх також зручно використовувати у міських умовах, особливо в роздрібній торгівлі, де виконуються часті завантаження та розвантаження невеликих об'ємів вантажу. Також, є окрема категорія спеціалізованих

напівпричепів до яких відносяться низькорамні платформи, телескопічні моделі, автовози, трали тощо. Вони призначені для виконання перевезень великогабаритної техніки, будівельних конструкцій, транспортних засобів або нестандартних вантажів. У їхній конструкції враховано потребу у низькій посадці, можливості подовження кузова чи використання необхідного спеціального кріплення. Отже, як бачимо, тип кузова напівпричепа безпосередньо визначає сферу його використання. Щоб забезпечити ефективне, безпечне та економічно вигідне перевезення, необхідно провести аналіз характеру вантажу, частоти завантажень, маршруту перевезень і вимог до умов зберігання продукції. Лише при чіткому розумінні даних факторів можна робити обґрунтований вибір на користь того чи іншого типу кузова, а отже досягти високої продуктивності транспортної роботи.

У процесі вибору напівпричепа виникає необхідність врахування таких критеріїв, як надійність, універсальність та економічність. Оскільки, саме ці характеристики утворюють загальну ефективність подальшої експлуатації транспортного засобу в довгостроковій перспективі та впливають на стабільність і рентабельність вантажних перевезень. В умовах постійних змін ринку логістичних послуг і зростаючої конкуренції, важливим є вибір такої техніки, яка не лише забезпечує виконання своїх функцій, а також забезпечує адаптацію до нових умов роботи без додаткових витрат. Одним із основоположних критеріїв надійність напівпричепа. Тут мова йде не тільки про здатність його конструкції витримувати навантаження, а також про загальну витривалість під час тривалої експлуатації. Надійний напівпричіп повинен бути стійким до фізичного зношування, володіти високою корозійною стійкістю, мати якісні та надійні кріпильні елементи, міцну підлогу та сертифіковані гальмівні системи. Найбільш надійними вважаються моделі від перевірених відомих виробників, які мають значний досвід виробництва, гарантійне обслуговування та сервісну підтримку. Такі напівпричепа не потребують частого ремонту, знижують ризики простоїв і забезпечують безперебійну роботу навіть при складних умовах (довгі маршрути, погані дороги тощо). Разом із тим, універсальність є теж важливою характеристикою. Універсальний напівпричіп – це такий напівпричіп, який можна використати для виконання перевезень різних типів вантажів. Найбільш типовим прикладом є тентований напівпричіп, який дає змогу легкого завантаження чи розвантаження з різних сторін, а також адаптації до різних логістичних сценаріїв. Універсальні напівпричепа дозволяють спростити організацію роботи автопарку, так як можуть залучатися до більш широкої номенклатури завдань, незалежно від галузі чи сезону. Окрему увагу необхідно приділяти економічності – як у контексті початкових витрат, так і в процесі довготривалого подальшого використання. Економічно ефективний напівпричіп повинен поєднувати оптимальну вартість придбання, помірні витрати під час технічного обслуговування та ремонту, а також мінімальне споживання пального тягачем у зв'язці із ним. Велике значення при цьому має власна вага напівпричепа – чим легша конструкція, тим більшу кількість корисного вантажу можна перевозити не перевищуючи нормативні допустимі навантаження на осі. Це, в свою чергу, дозволяє підвищити рентабельність перевезення кожної тонни вантажу. До економічних моделей, як правило, належать конструкції із алюмінію чи полегшеної сталі, які, попри меншу вагу, забезпечують достатню міцність. Також важливим є те, щоб напівпричіп володів простою конструкцією без складних, дорогих в процесі обслуговування систем, при умові, що в цьому немає гострої необхідності. Загалом, вибір напівпричепа із врахуванням надійності, універсальності та економічності потребує зваженого підходу й аналізу не лише технічних характеристик, а й реальних умов, при яких планується його використання. Напівпричіп, який поєднує в собі ці три якості, буде ефективним інструментом для щоденної роботи – стабільним, адаптивним до

нових викликів, а також економічно виправданим з точки зору витрат. Такий підхід дозволяє автотранспортному підприємству знизити ризики, скоротити експлуатаційні витрати та одночасно залишатися конкурентоспроможним у сфері вантажних перевезень.

Вартість напівпричепа коливається в залежності від його основних характеристик і технічного стану. Так, нові транспортні засоби, як правило, є дорожчими, однак вони володіють більш тривалим терміном експлуатації та більш сучасними технічними характеристиками. Бувші у використанні моделі мають більш доступну ціну, однак вимагають ретельного огляду перед придбанням, оскільки разом із потенційною вигодою таке рішення супроводжується низкою поширених проблем, які можуть суттєво вплинути на подальшу їх експлуатацію, безпеку перевезень та загальну рентабельність. Однією з найтипівіших проблем під час купівлі б/в напівпричепа є фізично зношений технічний стан. Навіть при наявності візуально задовільного зовнішнього вигляду внутрішні вузли можуть перебувати в критичному стані. Найбільш часто це відноситься до гальмівної системи, ресор, амортизаторів, осей, елементів підвіски, гідравліки (у випадку самоскидів) або холодильного обладнання (у рефрижераторів). Проблеми можуть показатися не одразу, а вже в процесі інтенсивної експлуатації, що зумовлює виникнення вимушених простоїв, незапланованих витрат на ремонтні роботи і ризику зриву доставки. Іншою серйозною проблемою є наявність прихованих дефектів, які можуть бути навмисно замасковані продавцем. До таких дефектів належать сліди корозії рами, тріщини у зварних швах, пошкодження підлоги, деформації кузова, порушення геометрії конструкції в процесі ДТП або неправильного ремонту. Такого роду дефекти не завжди виявляються під час візуального огляду без використання спеціального обладнання, особливо якщо покупець не володіє достатнім досвідом в оцінці технічного стану. Окрему категорію ризиків становлять проблеми із документацією та історією експлуатації напівпричепа. Напівпричіп може мати сумнівне походження, знаходитися під арештом, мати обтяження (лізинг, кредит), або використовувався в умовах, що пришвидшили його зношення (кар'єрні роботи, перевезення з перевантаженням тощо). Часто зустрічаються випадки, коли покупцеві не надають повну сервісну історію або дані щодо технічного обслуговування є неповними чи недостовірними. Значну роль відіграє також відсутність гарантії та сервісної підтримки. На відміну від нової техніки, яка надходить з офіційною гарантією, б/в напівпричепа, як правило, продаються «як є», іншими словами з усіма потенційними несправностями і без будь-якої відповідальності продавця. Це означає, що всі витрати на проведення ремонту, заміни комплектуючих чи модернізацію одразу лягають на покупця. Окрім того, під час купівлі б/в напівпричепа необхідно враховувати можливі проблеми із відповідністю сучасним технічним та екологічним нормам, оскільки старі моделі можуть не відповідати чинним вимогам до безпеки руху, масогабаритним обмеженням, стандартам ADR (для небезпечних вантажів), або бути обладнаними застарілою гальмівною системою, несумісною з тягачами нових поколінь. Ще одним практичним аспектом є складність у підборі запчастин та комплектуючих. Для деяких старих моделей може бути утруднений або дорогий процес ремонту пов'язаний із відсутністю необхідних деталей на ринку або потребою замовлення їх за кордоном, що зумовлює подовження термінів ремонту і підвищення вартості технічного обслуговування. Таким чином, купівля б/в напівпричепа завжди має у собі ризики, які не завжди є помітними на перший погляд. З метою мінімізації проблем необхідно проводити повну технічну діагностику перед ухваленням рішення щодо придбання, залучати до діагностики незалежних експертів, ретельно проводити перевірку документів та походження техніки, а також за можливості – проводити купівлю вживаної техніки в офіційних дилерів, які надають базову гарантію чи сервісну підтримку. Лише обережний і зважений підхід до купівлі

дозволяє знизити ризики непередбачуваних витрат і забезпечити безпечну й ефективну експлуатацію напівпричепа в подальшому.

Висновки. Перед ухваленням рішення щодо купівлі напівпричепа, необхідно зрозуміти, що його вибір до вже наявного тягача потребує індивідуального підходу. Це пояснюється великою номенклатурою моделей як самих напівпричепів так і тягачів, єдиного «ідеального» рішення не має. «Розумний» вибір є можливим лише у випадку врахування типу вантажу (фізичні властивості, вимоги до збереження тощо) та умов регіону експлуатації (дорожнє покриття, клімат, географія). Правильний вибір конструкції дозволить звести до мінімуму витрати на обслуговування, збільшити експлуатаційний ресурс і забезпечити безпеку транспортування вантажу. Конструктивні особливості напівпричепа мають прямий вплив на його функціональність, довговічність та ефективність використання. Тому під час вибору важливо брати до уваги не лише поточні потреби, а також перспективи розвитку транспортних задач, тип тягача, особливості маршрутів та загальні експлуатаційні умови. Така методика дозволяє провести підбір напівпричепа, який максимально відповідатиме специфіці роботи конкретного перевізника. Кожен тип кузова відповідає конкретній логістичній задачі та володіє як перевагами так і недоліками в залежності від умов перевезення. Вибір напівпричепа відповідно до типу кузова та спеціалізації повинен ґрунтуватися на оцінці вантажопотоків підприємства, вимог щодо збереженості вантажу, частоти завантажень, маршруту руху, кліматичних умов і ринкової специфіки. Рациональний підхід до вибору забезпечить не лише безпечність перевезень, а також мінімізацію експлуатаційних витрат та оптимізацію логістичних процесів. Системність у методиці підходу до вибору напівпричепа, яка враховує надійність, універсальність та економічність останнього, забезпечує безперебійність роботи транспортної компанії та підвищує ефективність використання інвестицій. «Ідеальним» варіантом є вибір такої моделі напівпричепа, яка буде одночасно витривалою в процесі його експлуатації, здатною швидко адаптуватися до зміни завдань і не створює надмірних фінансових навантажень під час обслуговування. Такий напівпричіп може використовуватися впродовж багатьох років, разом з тим зберігаючи свою функціональність та ринкову вартість, що є важливо за умов постійної зміни економічної ситуації та зростання вартості ресурсів.

Список літератури

1. Названо основні фактори, які потрібно враховувати при виборі напівпричепа-зерновоза. *Kurkul*: веб-сайт. URL: <https://kurkul.com/news/33805-nazvano-osnovni-faktori-yaki-potribno-vrahovuvati-pri-vibori-napivprichepa-zernovoza> (дата звернення: 12.02.2026).
2. Як вибрати напівпричіп-самоскид для перевезення зернових? *Egritech*: веб-сайт. URL: <https://egritech.org/uk/novini/yak-obrati-napivprichip/> (дата звернення: 12.02.2026).
3. Як обрати напівпричіп-самоскид? Найкращі варіанти напівпричепів-самоскидів. *АВТЕК*: веб-сайт. URL: <https://avtek.ua/ua/n604-kak-vybrat-polupricep-samosval-lucsie-varianty-polupricepov-samosvalov> (дата звернення: 12.02.2026).
4. Якісні і надійні напівпричепа для вашого підприємства. *TAD*: веб-сайт. URL: <https://www.tad.ua/uk> (дата звернення: 12.02.2026).
5. Напівпричепа для бізнесу. *Європа Авто*: веб-сайт. URL: <https://europa-auto.com/blog/riznovidi-napivprichepiv> (дата звернення: 12.02.2026).
6. 10 типових помилок при купівлі б/в напівпричепів. *Autoline*: веб-сайт. URL: <https://autoline.ua/blog/10-typovykh-pomylok-pri-kupivli-b-v-napivprycheviv/> (дата звернення: 12.02.2026).
7. Автомобіль вантажний. Сучасні конструкції : підручник для здобувачів ступеня вищої освіти ЗВО; авт. колектив: А. Т. Лебедев, В. Д. Мигаль, І. О. Шевченко, М. Л. Шуляк; за ред. проф. А. Т. Лебедева; ХНТУСГ. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 369 с.
8. Розум Р.І., Буряк М.В., Захарчук О.П. Використання автомобільного транспорту в сільськогосподарському виробництві. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. Том 2 № 17. С. 146–150. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i17.644> (дата звернення: 12.02.2026).
9. Буряк, М.В., Розум, Р.І., Фалович, Н.М., Прогній, П.Б., Попович, П.В., Шевчук, О.С. і Антонюк,

- О.П. 2022. Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. 15, 1. С. 17–22. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-17-22> (дата звернення: 12.02.2026).
10. Розум Р.І., Буряк М.В., Прогній П.Б., Фалович Н.М., Шевчук О.С., Попович П. В., Захарчук О.П. Експлуатаційна надійність і роботоздатність вантажного автомобільного рухомого складу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(2). С. 201–205. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.201-205](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.201-205) (дата звернення: 12.02.2026).

References

1. *Nazvano osnovni faktory, yaki potribno vrakhovuvaty pry vybori napivprychepa-zernovoza*. Kurkul. <https://kurkul.com/news/33805-nazvano-osnovni-faktori-yaki-potribno-vrahovuvati-pri-vibori-napivprichepa-zernovoza>
2. *Yak vybraty napivprychip-samoskyd dlia perevezennia zernovykh?* Egritech. <https://egritech.org/uk/novini/yak-obrati-napivprichip/>
3. *Yak obraty napivprychip-samoskyd? Naikrashchi varianty napivprychepiv-samoskydiv*. AVTEK. <https://avtek.ua/ua/n604-kak-vybrat-polupricep-samosval-lucsie-varianty-polupricepov-samosvalov>
4. *Yakisni i nadiini napivprychepy dlia vashoho pidpriemstva*. TAD. <https://www.tad.ua/uk>
5. *Napivprychepy dlia biznesu*. Yevropa Avto. <https://europa-auto.com/blog/riznovidi-napivprichepiv>
6. *10 typovykh pomyluk pry kupivli b/v napivprychepiv*. Autoline. <https://autoline.ua/blog/10-typovykh-pomylok-pry-kupivli-b-v-napivprychepiv/>
7. Lebedev, A. T., Mygal, V. D., Shevchenko, I. O., & Shulyak, M. L. (2021). *Truck. Modern designs: textbook*. KhNTUSG. Kharkiv: LLC "Planeta-Print" [in Ukrainian].
8. Rozum R.I., Buriak M.V., Zakharchuk O.P. (2021) *Vykorystannia avtomobilnoho transportu v silskohospodarskomu vyrobnytstvi. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*. Tom 2, 17. 146-150 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i17.644>
9. Buriak, M.V., Rozum, R.I., Falovych, N.M., Prohnii, P.B., Popovych, P.V., Shevchuk, O.S. i Antoniuk, O.P. (2022). *Otsinka mitsnosti ta nadiinosti avtotransportnykh zasobiv. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 15, 1. 17–22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-17-22>
10. Rozum R.I., Buriak M.V., Prohnii P.B., Falovych N.M., Shevchuk O.S., Popovych P. V., Zakharchuk O.P. (2022). *Ekspluatatsiina nadiinist i robotozdatnist vantazhnoho avtomobilnoho rukhomoho skladu. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 5(2). 201–205 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.201-205](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.201-205)

Ruslan Rozum, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Papinko**, PhD econ. sci., **Volodymyr Boyko**, PhD tech. sci.
Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Semi-trailer Selection Method

The purpose of the study is to form a comprehensive methodology for selecting a semi-trailer as one of the main elements of the fleet, which will ensure the minimization of logistics costs, increase the productivity of the enterprise and safety of transportation, through a systematic analysis of the technical, economic and operational parameters of vehicles in accordance with the specifics of cargo flows and conditions of the region of operation.

The article analyzes the semi-trailer market and scientific publications for the period 2020-2025. Factors influencing the choice of a semi-trailer are grouped into the following categories: cargo specifics, design parameters, body specialization, economic feasibility and secondary market risks. A detailed study of the influence of the physical properties of cargo on the choice of body volume was conducted. The technical components of the chassis were analyzed, in particular the advantages of air suspension over spring suspension and the choice between steel and aluminum frames. Particular attention was paid to the functional capabilities of various types of bodies: from universal tented models and moving floor systems to specialized container trucks. The adaptation of equipment to the difficult climatic and geographical conditions of the region in which operation is planned is considered, including requirements for heat resistance and cross-country ability. A separate block highlights the issues of purchasing used equipment, where critical risks are identified: hidden defects in frame geometry, wear of brake systems, and legal aspects of documentary support.

It has been proven that effective selection of a semi-trailer is possible only with an individual approach that takes into account compatibility with the tractor and specific logistical tasks, and a rationally selected design allows you to significantly reduce operating costs, increase payload and extend the service life.

semi-trailer, road train, body type, technical specifications, freight transportation. operating efficiency

Одержано (Received) 27.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 04.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

К. В. Доля, доц., д-р техн. наук

*Національний аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут»,
м. Харків, Україна*

e-mail: k.v.dolia@gmail.com

Моделювання та прогнозування потоків пасажирів у мультимодальних маршрутних системах з урахуванням пересадок і надійності розкладів

У статті розглянуто підхід до прогнозування пасажиропотоків у мережах із поєднанням різних видів транспорту, де якість пересадок визначається варіативністю виконання розкладів. Запропоновано опис узагальнених витрат маршруту з урахуванням ризику пропуску стикування та наведено схему розрахунку, що поєднує оцінювання надійності, прогноз попиту й розподіл потоків у графівій моделі мережі. Показано, як параметри надійності впливають на вибір маршруту та перерозподіл потоків.

пасажиропотоки, мультимодальні перевезення, пересадки, надійність розкладів, прогнозування, вибір маршруту, графова модель

Постановка проблеми. Мультимодальні маршрутні системи (поєднання міського транспорту, приміських перевезень, залізниці, авіаційного та мікромобільного компонентів) формують складні потоки пасажирів, у яких ключову роль відіграють пересадки. Для пасажирів саме пересадка є «вузьким місцем» маршруту: вона додає час очікування, ризик запізнення на наступний рейс і, відповідно, змінює сприйнятну вартість подорожі та вибір маршруту. У міських агломераціях з інтенсивним рухом навіть незначні зсуви фактичних часів прибуття/відправлення від розкладу приводять до накопичення затримок у ланцюжках пересадок, перерозподілу пасажиропотоків між альтернативними маршрутами та перевантаження окремих ділянок мережі. Відомо, що якість пересадок та очікування є одними з найчутливіших компонентів узагальнених витрат поїздки, а також визначають сприйнятну надійність поїздки [1, 2].

З огляду на це, актуальною є задача моделювання і прогнозування потоків пасажирів у мультимодальних мережах з явним урахуванням: (1) структури пересадок (час підходу, очікування, мінімальні стикувальні інтервали), (2) надійності розкладів (варіативності часу руху та дотримання інтервалів), (3) поведінки пасажирів щодо ризику пропуску стикування [3, 2]. Розв'язання цієї задачі важливе для планування розкладів і тактових графіків, визначення резервів часу на пересадку, налаштування координації між видами транспорту, оптимізації пропускнуої спроможності вузлів та підвищення стійкості транспортної системи в умовах збурень [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження пасажиропотоків у транспортних мережах традиційно базуються на задачах розподілу попиту (traffic assignment) та моделей вибору маршруту, де узагальненою вартістю виступають час у дорозі, вартість проїзду та штрафи за пересадки. У межах цього підходу широко застосовують стохастичні моделі користувацької рівноваги (SUE) та моделі дискретного вибору, які дозволяють відобразити неоднорідність поведінки пасажирів і випадковість сприйняття витрат [5, 6].

Окремий напрям пов'язаний із представленням громадського транспорту як мережі «розкладового типу» (schedule-based) або «частотного типу» (frequency-based). Частотні моделі є придатними для високочастотних ліній, де очікування апроксимується половиною інтервалу, однак вони слабше відображають ефекти синхронізації пересадок, асиметрію очікувань та часову залежність [7, 1]. Розкладові підходи, навпаки, дозволяють безпосередньо враховувати конкретні рейси, обмеження на стикування, мінімальні часи пересадки та часову залежність попиту, що є критичним для мультимодальних ланцюжків [8, 9].

У мультимодальних системах додаткової важливості набуває надійність: варіація часу руху, нерівномірність інтервалів, затримки на зупинках і у вузлах пересадки. У літературі розглядають поняття надійності як складову узагальненої вартості (reliability based assignment), вводять штрафи за запізнення, ризик пропуску пересадки, а також моделюють буферні часи, які пасажирів закладають для зменшення ризику [10, 11, 12]. Для громадського транспорту та пересадок актуальними є моделі «запізнення стикування» (missed connection), де ймовірність стикування оцінюється через розподіли запізнень і мінімальні інтервали пересадки [13, 14].

Помітного розвитку набули методи прогнозування пасажиропотоків на основі даних автоматизованих систем оплати проїзду (AFC), GPS/AVL та мобільних даних. Використовують класичні часові ряди, регресійні моделі, градієнтні ансамблі та нейронні мережі для прогнозу попиту на зупинках і лініях, а також графові нейронні мережі (GNN) для врахування просторово-мережових залежностей [15, 16, 17]. Разом з тим, прогностичні моделі попиту часто не інтегрують явним чином механізм пересадок та ризик невиконання розкладу, що ускладнює інтерпретацію результатів у термінах керування розкладом і координації мультимодальних стикувань. Узагальнення підходів до моделювання попиту на громадський транспорт, включно з чинниками сервісу та пересадок, наведено у оглядових роботах [18].

Для оцінювання стійкості мережі та відновлення після збурень застосовують підходи на основі теорії надійності, мережевої стійкості та аналізу вразливості вузлів; при цьому пересадочні вузли часто ідентифікуються як критичні елементи, що визначають системний ефект затримок [3, 19]. У практичних задачах планування зростає інтерес до тактових розкладів і координації пересадок (time table synchronization) як інструментів підвищення якості сервісу, проте їхня ефективність залежить від реальної надійності виконання рейсів [4, 2].

Отже, попри значний прогрес у методах розподілу попиту, прогнозування та аналізу надійності, залишається невирішеною частина загальної проблеми, що стосується узгодженого (інтегрованого) прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах із явним урахуванням пересадок і надійності розкладів на рівні конкретних стикувань. Саме ця невирішена складова визначає практичну потребу в моделях, які поєднують (1) розкладове представлення мережі, (2) стохастичні характеристики запізнень/інтервалів, (3) поведінкові реакції пасажирів на ризик та (4) прогнозування попиту з використанням сучасних даних.

Мета роботи. Метою статті є розроблення підходу до моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах з урахуванням пересадок і надійності розкладів для підвищення обґрунтованості рішень щодо планування та координації перевезень.

Об'єкт дослідження — процес формування та перерозподілу потоків пасажирів у мультимодальній маршрутній мережі з пересадками за умов стохастичних відхилень фактичних параметрів руху від розкладу [3, 2]. Предмет дослідження — методи та моделі прогнозування пасажиропотоків, що інтегрують розкладове представлення мультимодальної мережі, параметри пересадок (мінімальні стикувальні інтервали, час

очікування) та показники надійності виконання розкладів (розподіли запізень/інтервалів) для оцінювання ймовірності успішного стикування та впливу цього чинника на вибір маршруту [8, 3].

Цілі й задачі дослідження. Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- сформувати модель мультимодальної маршрутної мережі з явним описом пересадочних вузлів і стикувальних обмежень та визначити показники надійності виконання розкладів, що впливають на пасажирські рішення;
- розробити підхід до прогнозування пасажиропотоків на рівні ліній/ділянок і пересадок із урахуванням імовірності пропуску стикування та поведінкових штрафів за ризик;
- виконати обчислювальне оцінювання впливу надійності розкладів і параметрів пересадок на перерозподіл пасажиропотоків і сформувати практичні рекомендації щодо координації розкладів у мультимодальних системах.

Основний матеріал дослідження. У цьому розділі наведено узагальнений методичний підхід до моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах із урахуванням пересадок і надійності розкладів. Для забезпечення відтворюваності підхід подано у вигляді структурної схеми (рис. 1), математичних залежностей (формули (1)–(8)) та аналізу застосовних методів розв’язання задачі (з посиланнями на сучасні джерела).

Технологічна схема розрахунку. Загальна логіка розрахунку включає збір даних про мережу та розклади, оцінювання параметрів надійності, прогноз попиту та розподіл потоків у мережі з урахуванням пересадок (рис. 1). Для мультимодальних систем доцільно використовувати розкладове (schedule-based) представлення, оскільки воно дозволяє явно моделювати стикування рейсів і мінімальні інтервали пересадки.

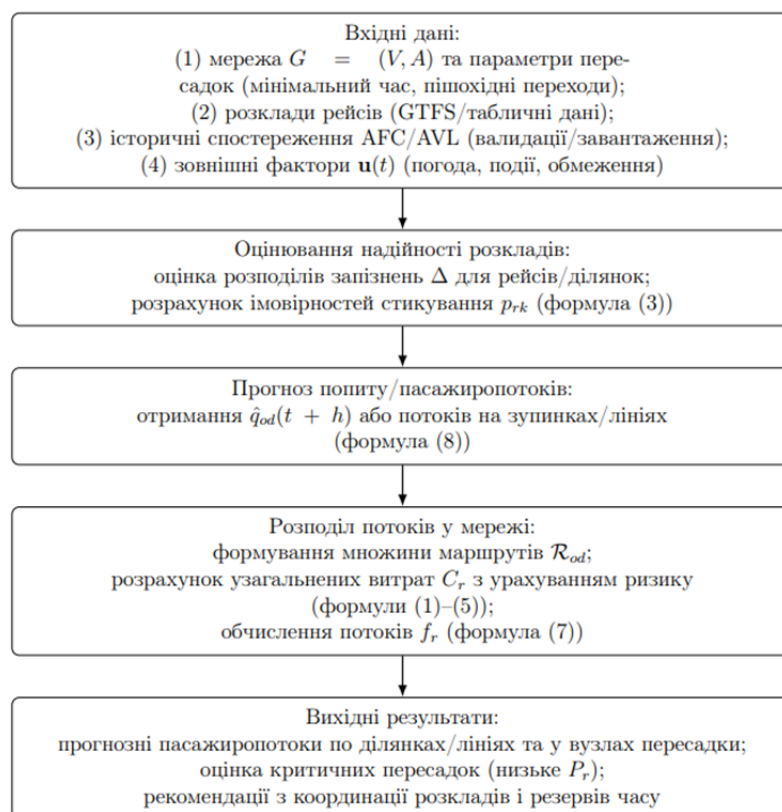


Рисунок 1 – Технологічна схема моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальній маршрутній системі з урахуванням пересадок і надійності розкладів
Джерело: розроблено автором

Рисунок 1 узагальнює послідовність етапів дослідження: від формування вхідних даних (мережа, розклади, спостереження) до оцінювання параметрів надійності, прогнозування попиту та подальшого розподілу потоків у мережі. Смысл схеми полягає в тому, що надійність розкладів і параметри пересадок враховуються не «після» розрахунку, а безпосередньо впливають на узагальнені витрати маршрутів і, як наслідок, на прогнозні пасажиропотоки.

На рис. 2 наведено приклад графового подання мультимодальної мережі з пересадочним вузлом, що використовується для формалізації задачі призначення пасажирів (див. формули (1)–(7)).

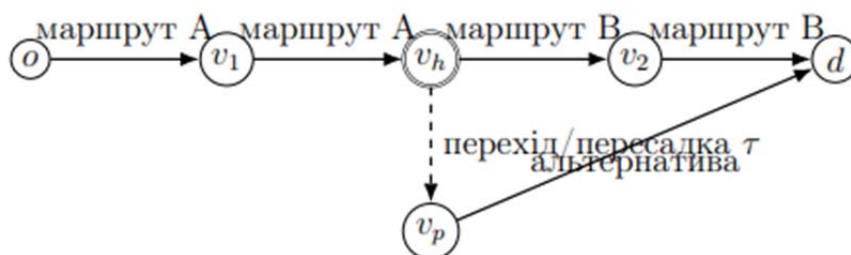


Рисунок 2 - Графова модель мультимодальної мережі з пересадками:
вузли V та дуги A різних типів (поїздка, пересадка/перехід)

Джерело: розроблено автором

Рисунок 2 ілюструє, як мультимодальна система подається у вигляді графа: вершини відповідають зупинкам/станціям і пересадочним вузлам, а дуги – переміщенням різних типів (поїздка на лінії, пішохідний перехід, пересадка). Таке подання потрібне для формалізації множини допустимих маршрутів R_{od} та обчислення узагальнених витрат C_r і потоків f_r .

Розглянемо математичну модель витрат поїздки з урахуванням пересадок і надійності. Припустимо, що мультимодальна мережа описується орієнтованим графом $G = (V, A)$, де V – множина транспортних вузлів (зупинок, станцій, пересадочних терміналів), A – множина дуг (переміщень між вузлами), що відповідають поїздкам на маршрутах/лініях, пішим переходам і пересадкам. Для кожного пасажира розглядається множина допустимих маршрутів $r \in R_{od}$ між парою походження–призначення (o, d) .

Узагальнену вартість (generalized cost) маршруту r з урахуванням надійності доцільно задавати як (1) суму детермінованих складових часу та штрафу за ризик пропуску пересадки:

$$C_r = \beta_{iv} T_r^{iv} + \beta_w T_r^w + \beta_{tr} N_r^{tr} + \beta_{rel} \Phi_r, \quad (1)$$

де C_r – узагальнена вартість маршруту r ; T_r^{iv} – час у русі (in-vehicle time) на всіх ділянках маршруту; T_r^w – сумарний час очікування, включно з очікуванням на пересадках; N_r^{tr} – кількість пересадок; Φ_r – показник ненадійності маршруту (ризик); $\beta_{iv}, \beta_w, \beta_{tr}, \beta_{rel}$ – вагові коефіцієнти (параметри оцінки часу/ризик), які можуть бути отримані з моделей дискретного вибору або калібровані на даних.

Для конкретної пересадки k у маршруті r визначимо запланований (розкладовий) стикувальний інтервал:

$$s_{rk} = t_{rk}^{dep} - t_{rk}^{arr} - \tau_{rk}, \quad (2)$$

де t_{rk}^{arr} – розкладовий час прибуття на пересадочний вузол (на попередньому рейсі); t_{rk}^{dep} – розкладовий час відправлення наступного рейсу; τ_{rk} – мінімальний технологічний час пересадки (перехід, контроль, посадка).

Нехай випадкове запізнення попереднього рейсу на пересадці k має розподіл Δ_{rk} з функцією розподілу $F_{\Delta}(\cdot)$. Тоді ймовірність успішного стикування (непропуску пересадки) оцінюється як:

$$p_{rk} = P\{\Delta_{rk} \leq s_{rk}\} = F_{\Delta}(s_{rk}), \quad (3)$$

де $p_{rk} \in [0, 1]$ – ймовірність встигнути на пересадку k у маршруті r .

Для маршруту з кількома пересадками сумарну надійність можна агрегувати, наприклад, як ймовірність успіху всіх стикувань:

$$P_r = \prod_{k \in K_r} p_{rk}, \quad (4)$$

де K_r – множина пересадок у маршруті r ; P_r – ймовірність виконання всіх пересадок.

Як показник ризику Φ_r у формулі (1) можна використати штраф за ненадійність у логарифмічній формі:

$$\Phi_r = -\ln(P_r), \quad (5)$$

де Φ_r зростає при зменшенні P_r , тобто при погіршенні надійності стикувань.

Графічна інтерпретація залежності ймовірності стикування від запасу часу на пересадку (формула (3)) наведена на рис. 3.

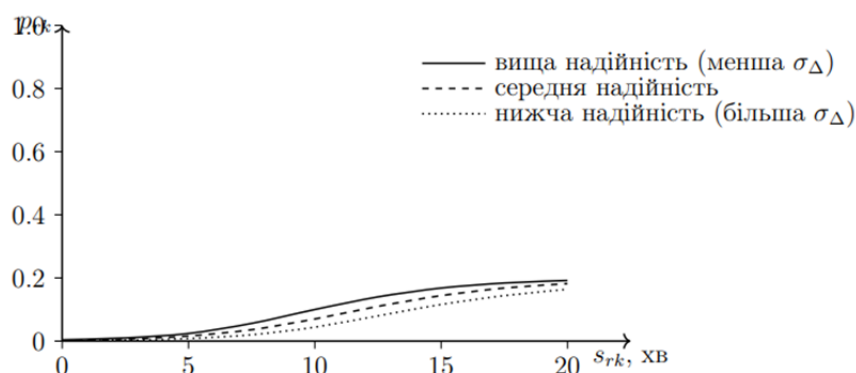


Рисунок 3 – Вплив запасу часу на пересадку s_{rk} на ймовірність стикування $p_{rk} = F_{\Delta}(s_{rk})$
Джерело: розроблено автором

Рисунок 3 пояснює зміст формули (3): зі збільшенням запасу часу на пересадку s_{rk} зростає ймовірність успішного стикування p_{rk} . Три криві відображають різні рівні надійності (різну варіативність запізнень σ_{Δ}): за меншої дисперсії запізнень заданий запас часу забезпечує більшу ймовірність стикування, що безпосередньо впливає на ризикову складову Φ_r та вибір маршруту.

Для ілюстрації зв'язку між технологічною надійністю та поведінковим вибором маршруту на рис. 4 показано типову залежність ймовірності вибору маршруту від різниці узагальнених витрат $\Delta C = C_2 - C_1$ у логіт-моделі (формула (6)).

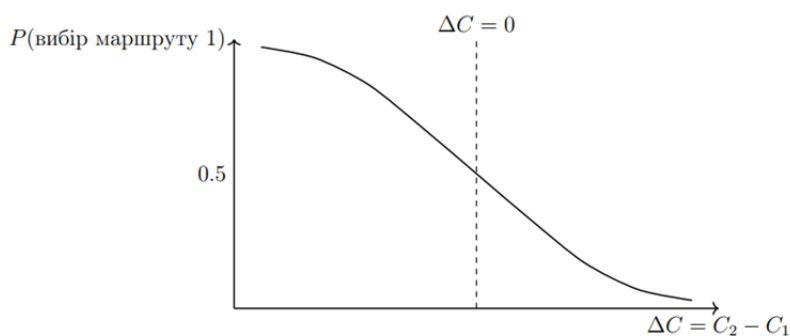


Рисунок 4 – Залежність імовірності вибору маршруту від різниці узагальнених витрат ΔC у логіт-моделі

Джерело: розроблено автором

На етапі розподілу попиту використовується модель вибору маршруту, наприклад, мультиноміальна логіт-модель. Імовірність вибору маршруту r для пари (o, d) :

$$P(r | o, d) = \frac{\exp(-\theta C_r)}{\sum_{j \in R_{od}} \exp(-\theta C_j)}, \quad (6)$$

де $\theta > 0$ – параметр чутливості до узагальнених витрат; C_r – визначається формулою (1).

Тоді очікуваний потік по маршруту r :

$$f_r = q_{od} P(r | o, d), \quad (7)$$

де q_{od} – попит між o та d (кількість пасажирів за період).

Для практичної інтерпретації результатів корисно відображати «профіль навантаження» уздовж мультимодального ланцюжка, який демонструє зміну інтенсивності потоку на ділянках маршруту та перерозподіл у зонах пересадок. Такий профіль зручний для виявлення критичних вузлів, де пересадка найбільше впливає на загальну якість поїздки та формує потребу в координації розкладів.

Для короткострокового прогнозування q_{od} (або потоків на зупинках/лініях) доцільно поєднувати: (1) часові ряди/регресійні моделі, (2) просторово-мережеві моделі на графі мережі, зокрема GNN. Узагальнено прогноз можна подати як:

$$\widehat{q_{od}}(t + h) = \mathcal{F}(x(t), G, u(t)), \quad (8)$$

де $\widehat{q_{od}}(t+h)$ – прогноз попиту на горизонті h ; $x(t)$ – історичні спостереження (AFC/AVL, лічильники); G – структура мережі; $u(t)$ – зовнішні фактори (погода, події, обмеження руху); $\mathcal{F}(\cdot)$ – оператор прогнозування (ARIMA/регресія/ансамблі/нейромережі).

З урахуванням зазначеного, раціональним є комбінований підхід: прогноз $\widehat{q_{od}}$ за формулою (8) використовується як вхід для розкладового (або наближеного частотного) призначення, а ризик стикувань ураховується через P_r у формулах (4)–(5), що впливає на C_r у формулі (1) і, як наслідок, на потоки f_r за формулою (7).

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті дослідження обґрунтовано доцільність інтегрованого підходу до моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах, у якому пересадки розглядаються як ключові елементи, що формують узагальнені витрати поїздки та впливають на вибір маршруту. Запропоновано формалізацію надійності розкладів через імовірність успішного стикування та показано, що включення ризикової складової в узагальнену вартість дозволяє відобразити вплив запізнень на перерозподіл потоків. Сформовано технологічну схему розрахунку, яка поєднує оцінювання параметрів

надійності, прогноз попиту та мережевий розподіл пасажирів на основі моделей вибору маршруту.

Перспективи подальших досліджень пов'язуються з (1) поглибленням статистичного моделювання запізень із урахуванням кореляцій між ділянками та видами транспорту, (2) розробленням методів калібрування параметрів поведінкових моделей на основі AFC/AVL та мобільних даних, (3) інтеграцією оптимізації розкладів і синхронізації пересадок із прогнозними моделями попиту та показниками надійності для підвищення стійкості мультимодальних перевезень.

Список літератури

1. Wardman M. Public transport values of time. *Transport Policy*. 2004. Vol. 11, No. 4. P. 363–377. DOI: 10.1016/j.tranpol.2004.05.001.
2. Van Oort N. Incorporating the impacts of travel time reliability in public transport planning: a review. *Public Transport*. 2015. Vol. 7, No. 2. P. 241–260. DOI: 10.1007/s12469-014-0095-8.
3. Cats O. The value of reliability in public transport: A review and research agenda. *Transport Reviews*. 2016. Vol. 36, No. 1. P. 1–25. DOI: 10.1080/01441647.2015.1052524.
4. Canca D., Zarzo A. Railway timetable robustness: a literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 126. P. 238–262. DOI: 10.1016/j.trb.2019.06.004.
5. Ben-Akiva M., Lerman S. R. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. Cambridge, MA : MIT Press, 1985. 390 p.
6. Prato C. G. Route choice modeling: past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*. 2009. Vol. 2, No. 1. P. 65–100. DOI: 10.1016/S1755-5345(13)70005-8.
7. Spiess H., Florian M. Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1989. Vol. 23, No. 2. P. 83–102. DOI: 10.1016/0191-2615(89)90034-9.
8. Nuzzolo A., Crisalli U., Rosati L. Schedule-based assignment models for public transport networks: a review. *Transportation*. 2001. Vol. 28, No. 1. P. 13–33. DOI: 10.1023/A:1005232115160.
9. Teunter R. H. et al. Robust optimization for railway timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2006. Vol. 40, No. 9. P. 766–785. DOI: 10.1016/j.trb.2005.10.003.
10. Small K. A. The scheduling of consumer activities: work trips. *The American Economic Review*. 1982. Vol. 72, No. 3. P. 467–479.
11. Lam W. H. K. et al. A note on the reliability of travel time. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1999. Vol. 33, No. 2. P. 145–155. DOI: 10.1016/S0191-2615(98)00028-2.
12. Li Z. et al. Reliability-based transit assignment: formulation and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010. Vol. 44, No. 6. P. 757–782. DOI: 10.1016/j.trb.2009.12.011.
13. Gkiotsalitis K., Cats O. Public transport planning adaption under the covid-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*. 2021. Vol. 41, No. 3. P. 374–392. DOI: 10.1080/01441647.2020.1857886.
14. Pelletier M.-P., Trépanier M., Morency C. Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2011. Vol. 19, No. 4. P. 557–568. DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.003.
15. Vlahogianni E. I., Karlaftis M. G., Golias J. C. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2014. Vol. 43. P. 3–19. DOI: 10.1016/j.trc.2014.01.005.
16. Zheng Y. et al. Urban computing: concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2014. Vol. 5, No. 3. Art. 38. P. 1–55. DOI: 10.1145/2629592.
17. Wu Z. et al. A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021. Vol. 32, No. 1. P. 4–24. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2978386.
18. Tsekeris T., Voß S. Public transport demand modelling: A review. *Transport Reviews*. 2011. Vol. 31, No. 1. P. 23–44. DOI: 10.1080/01441641003716611.
19. Derrible S. Network centrality of metro systems. *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7, No. 7. Art. e40575. DOI: 10.1371/journal.pone.0040575.

References

1. Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transport Policy*, 11(4), 363–377. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.05.001>
2. van Oort, N. (2015). Incorporating the impacts of travel time reliability in public transport planning: A review. *Public Transport*, 7(2), 241–260. <https://doi.org/10.1007/s12469-014-0095-8>

3. Cats, O. (2016). The value of reliability in public transport: A review and research agenda. *Transport Reviews*, 36(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1052524>
4. Canca, D., & Zarzo, A. (2019). Railway timetable robustness: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 238–262. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.06.004>
5. Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand*. MIT Press.
6. Prato, C. G. (2009). Route choice modeling: Past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*, 2(1), 65–100. [https://doi.org/10.1016/S1755-5345\(13\)70005-8](https://doi.org/10.1016/S1755-5345(13)70005-8)
7. Spiess, H., & Florian, M. (1989). Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(2), 83–102. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90034-9)
8. Nuzzolo, A., Crisalli, U., & Rosati, L. (2001). Schedule-based assignment models for public transport networks: A review. *Transportation*, 28(1), 13–33. <https://doi.org/10.1023/A:1005232115160>
9. Kroon, L. G., Romeijn, H. E., & Zwaneveld, P. J. (2006). Robust optimization for railway timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(9), 766–785. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.10.003> (Примітка: уточнено авторів та том/випуск).
10. Small, K. A. (1982). The scheduling of consumer activities: Work trips. *The American Economic Review*, 72(3), 467–479. [suspicious link removed]
11. Lam, W. H. K., Gao, J. P., Chan, K. S., & Tam, M. L. (1999). A note on the reliability of travel time. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(2), 145–155. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(98\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00028-2)
12. Li, Z., Szeto, W. Y., & Wong, S. C. (2010). Reliability-based transit assignment: Formulation and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(6), 757–782. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.12.011>
13. Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). Public transport planning adaptation under the COVID-19 pandemic crisis: Literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*, 41(3), 374–392. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1857886>
14. Pelletier, M.-P., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.12.003>
15. Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.005>
16. Zheng, Y., Capra, L., Wolfson, O., & Yang, H. (2014). Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 5(3), 1–55. <https://doi.org/10.1145/2629592>
17. Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., & Yu, P. S. (2021). A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(1), 4–24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>
18. Tsekeris, T., & Voß, S. (2011). Public transport demand modelling: A review. *Transport Reviews*, 31(1), 23–44. <https://doi.org/10.1080/01441641003716611>
19. Derrible, S. (2012). Network centrality of metro systems. *PLOS ONE*, 7(7), Article e40575. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040575>

Kostiantyn Dolia, Assoc. Prof., Dr. tech. sci.

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

Modeling and Forecasting Passenger Flows in Multimodal Route Systems Taking Into Account Transfers and Schedule Reliability

The article considers an approach to forecasting passenger flows in networks with a combination of different modes of transport, where the quality of transfers is determined by the variability of schedule execution. A description of generalized route costs is proposed, taking into account the risk of missing a connection, and a calculation scheme is presented that combines reliability assessment, demand forecasting, and flow distribution in a graph network model. It is shown how reliability parameters affect route selection and flow redistribution.

passenger flows, multimodal transportation, transfers, schedule reliability, forecasting, route selection, graph model

Одержано (Received) 23.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

В. Г. Загорянський, доц., д-р техн. наук, **К. О. Гриценко**

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна*

e-mail: : zagor_vlad@ukr.net

Моделювання параметрів складського комплексу переробного підприємства (на прикладі технічного переоснащення ПрАТ «Данон Кременз»)

Стаття присвячена актуальній задачі моделювання параметрів складського комплексу молокопереробного підприємства на прикладі технічного переоснащення складу підприємства «Данон Кременз», м. Кременчук. На основі аналізу показників діяльності підприємства проведено моделювання для визначення оптимальної площі для зберігання готової продукції, що забезпечують ефективне використання складських приміщень і підтримання безперервності виробничого процесу.

молокозавод, готова продукція, камери зберігання, визначення площ, моделювання

Постановка проблеми. Спілка молочних підприємств України, плануючи розвиток галузі у післявоєнний період, здійснила ґрунтовний аналіз низки європейських регуляторних документів і врахувала практичний досвід будівництва Білоцерківського молочного комбінату, спроектованого та введеного в експлуатацію відповідно до сучасних європейських вимог [1]. У поточному році Спілка готує до випуску посібник «Проектування та технічне забезпечення підприємств молочної галузі відповідно до гігієнічних вимог», який стане практичним інструментом для оновлення виробничих потужностей і впровадження європейських стандартів у галузі.

Цей проект є внеском у підготовку до відродження та подальшого розвитку української молочної промисловості, яка має стати сучасною, технологічно розвиненою та конкурентоспроможною на світовому ринку.

Частка компанії «Danone» на українському ринку молочної продукції станом на 2024 рік становить 14,2% [2]. Сукупний обсяг виробництва на підприємствах компанії («Данон-Дніпро» у Херсоні та «Данон Кременз» у Кременчуці) перевищує 150 тис. тонн на рік.

Завод «Данон Кременз» (ПрАТ «Данон Кременз») має максимальну потужність 112 тис. т продукції на рік та здатний переробляти до 500 т молока на добу. На заводі в м. Кременчук виробляється продукція таких брендів «Данон»: «Простоквашино», «Danone», «Активіа», «Растішка», «Даніссімо», «Живинка», «Щенячий Патруль» та молочні продукти для бренду «Milupa».

Основні товарні позиції підприємства «Данон Кременз» за класифікатором Kompass (класифікатор Kompass – міжнародна система класифікації товарів та послуг, яка використовується для каталогізації бізнесу по всьому світу), такі [3]:

Молоко, молочні і кисломолочні продукти:

- молоко свіже;
- молоко пастеризоване;
- молоко кисле;
- молоко сухе незбиране;
- молоко сухе збиране (знежирене).

Сметана, вершки:

– вершки свіжі;

– сметана.

Морозиво і шербет:

– морозиво молочне, вершкове і пломбір;

Додаткові види діяльності по Класифікатору Kompass:

Масло вершкове свіже.

Сир:

– сир і сирні вироби (сирки глазуровані, маси сиркові), кисломолочний сир.

У 2024 р. завод «Данон Кремез» виробив 31 тис. т молока, 4,9 тис. т йогурту, 21 тис. т сметани та сиру, близько 18 тис. т кефіру та ряжанки та 5,5 тис. т іншої продукції (масло, морозиво (40%), сухе знежирене молоко (60%)) – всього майже 80 тис. тонн продукції, тобто 220 т на добу [2]. У цьому році показники за три квартали року в цілому відповідають минулорічним.

Завдання моделювання полягає в наступному.

На наступний рік планується збільшити річний випуск продукції на 10%, тобто до 240 тонн на добу. Подальше розширення кількості та асортименту готової продукції приведе до критичного завантаження камер зберігання готової продукції. З урахуванням цього постало завдання розрахувати при їх технічному переоснащенні необхідну площу камер для зберігання готової продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Молочна промисловість працює на швидкопсувній сировині. З метою збереження якості молока для подальшого вироблення доброякісних продуктів молоко необхідно якнайшвидше доставляти на виробництво. Тому транспорт, яким доставляється молоко на переробне підприємство, є невід'ємною частиною технологічного процесу виробництва.

Найбільш поширеним видом транспорту є автомобільний [4]. Від господарств-виробників доставка молока на завод здійснюється автотранспортом підприємств молочної промисловості (так званий «центровивіз»). Для цього підприємства мають спеціалізований автотранспорт, місткість якого відповідає середньому добовому обсягу виробництва товарного молока у господарствах. Господарства оснащені комплектом обладнання для охолодження молока і зберігання його протягом доби.

Зазначається, що добудова камер для зберігання молочних продуктів належить до заходів технічного переоснащення діючих підприємств молочної промисловості [4].

На управління якістю продукції на молокопереробному підприємстві впливає сукупність різних чинників та умов, від організаційної структури, наявних ресурсів до сукупності компонентів та внутрішніх зв'язків, які забезпечують ефективне функціонування цієї системи [5-7]. Систему управління якістю продукції необхідно розглядати як цільову підсистему системи управління підприємством.

Аналіз діяльності підприємства «Данон Кремез» за комбінаційним методом групування молокопереробних підприємств [8] (кількісними ознаками за ним вважаються об'єм переробки молока за рік, закупівельна ціна однієї тонни молока, відстань доставлення молока на підприємство, транспортні витрати на доставлення однієї тонни молока, собівартість молочної продукції, фінансові результати) за результатами 2024 року показав, що воно належить до категорії (групи) високоефективних підприємств.

Постановка завдання. Метою роботи є моделювання, на основі аналізу поточних показників виробництва підприємства «Данон Кремез», необхідної площі обладнання для зберігання готової продукції при його технічному переоснащенні за умови збільшення обсягів виробництва продукції.

Виклад основного матеріалу. Підприємство, що розглядається, має складський комплекс, обладнаний 3-4-рівневими стелажми. Загальна площа складу складає близько 4 тис. м², з них – камери для зберігання готової продукції – 2,3 тис. м². Асортимент продукції, що зберігається на складі, налічує понад 350 найменувань, зберігання яких відбувається з урахуванням термінів придатності. Основний тип зберігання – стелажне на піддонах. Поточний добовий оборот становить 850-900 піддонів. Щодобово склад обробляє близько 250-300 замовлень, із сумарною кількістю позицій до 12 тисяч.

Залежно від вимог до оптимального температурно-вологісного режиму групу молочних товарів можна поділити на такі підгрупи: охолоджені продукти, заморожені продукти та продукти, що зберігаються при широкому діапазоні температур [9].

Охолоджені молочні продукти зберігають за температури 0-6 °С і відносній вологості повітря (ВВП) 80-85%. До них відносяться молоко, вершки пастеризовані, рідкі кисломолочні продукти, сметана, сир, сирні вироби, паста білкова, сири. Виняток становлять сири, які можна зберігати не лише за температури 0-4 °С, але і -3-0 °С і ОБВП 85-90%, при цьому терміни їх зберігання збільшуються в 2-4 рази.

Диференціацію температурного режиму зберігання застосовують як для сиру, так і для масла коров'ячого, сиру. Так, масло коров'яче і сир зберігають і в охолоджену, і в заморожену вигляді. Масло Селянське і Любительське можна зберігати при температурі не нижче -15 °С, а бутербродне – не нижче -6 °С. При нижчій температурі масло набуває крихливої консистенції.

Сир і сирні вироби в охолоджену вигляді зберігають при температурі 4-8 °С, сир заморожений – при температурі не вище -18 °С.

Таким чином, молочні продукти зниженої вологості можна зберігати в охолоджену та переохолоджену стані.

Лише сир за мінусових температур замерзає. Масло та сири при мінусових температурах, близьких до 0 °С, знаходяться в переохолоджену стані.

Охолодження молока та молочних продуктів [9]. При виробництві, транспортуванні, зберіганні та реалізації молока та молочних продуктів потрібна обов'язкова присутність холоду. Для збереження початкових властивостей і продовження бактерицидної фази молоко фільтрують і охолоджують відразу ж після доїння до 10-20 °С. У спеціальних охолоджувачах для охолодження молока безконтактним способом застосовують холодну воду, розсіл тощо. У цьому випадку охолодження здійснюється швидко протягом кількох хвилин. Якщо молоко з ферм після кожного доїння одразу відправляють на завод, недоцільно проводити низькотемпературне охолодження. У таких випадках температуру охолодження вибирають в залежності від проміжку часу, що проходить з кінця охолодження молока на фермі до моменту доставки його на завод. Якщо цей проміжок не перевищує 6 год., то охолоджують до 10 °С, 12 год. – до 8 °С, 24 год. – до 5 °С. На молочному заводі упаковані продукти охолоджують у повітряному середовищі при температурі 0 °С та швидкості руху повітря до 1 м/с.

Замороження молочних продуктів [9]. Вершкове масло перед відправкою його на холодильники або в торговельну мережу нетривалий час зберігають в камерах сховища молокозаводу при температурі +5...-5 °С протягом 3-10 діб в залежності від виду масла та способу його виробництва. Цей період завершується формування структури вершкового масла.

У холодильниках вершкове масло зберігають при температурі -12...-24 °С та відносній вологості повітря не більше 85%. Не допускаються коливання температури в камерах зберігання вершкового масла, оскільки це призводить до конденсації вологи на монолітах вершкового масла, а потім до зростання та розвитку плісняв.

Тривалість та режим зберігання залежить від ступеня диспергування вологи в маслі. Вершкове масло з недостатньо диспергованою вологою не рекомендується зберігати за низьких негативних температур ($-20 \dots -24$ °C), оскільки при замерзанні вологи моноліт вершкового масла може розтріскатися. Тонко диспергована волога не замерзає навіть за -20 °C.

У вершкового масла з підвищеним вмістом вологи, а також солоного термін зберігання менший.

Вершкове масло в споживчій тарі має зберігатися при температурі не вище -3 °C та відносній вологості повітря не більше 80 %.

М'який сир зберігають при температурі 4 ± 2 °C не більше 36 годин, при температурі 0 ± 1 °C – не більше 10 діб.

Для більш тривалого зберігання та вирівнювання сезонності виробництва м'який сир заморожують при температурі від -25 до -30 °C блоками масою 7-10 кг або брикетами масою 0,25 - 0,5 кг.

Зберігають м'який сир у замороженому стані при -18 °C протягом 4-6 місяців.

Моделювання площ камер зберігання готової продукції виконаємо на основі залежностей, що відповідають вимогам діючих в Україні норм проектування підприємств молочної промисловості [10-12].

Треба відмітити, що підприємства молочної промисловості працюють упродовж року нерівномірно. Якщо в місяць максимального надходження молока переробляється C , % від річної його кількості, то річна потужність підприємства з урахуванням сезонності становитиме:

$$M_{річн} = \frac{12 \cdot M_{зм} \cdot n \cdot P_m}{C}, \quad (1)$$

де C – коефіцієнт сезонності. Коефіцієнт сезонності надходження молока на завод – відношення обсягів молока, що надходить влітку, до обсягів, що надходять узимку, і він відображає ступінь різниці між цими періодами. Для умов, що розглядаються, коефіцієнт сезонності $1,2 \dots 1,5$ [10].

Потужність міського молочного заводу визначається потребою у молочних продуктах. Якщо норма споживання молочних продуктів на душу населення на рік становить F , кг (у переведенні на молоко), а контингент населення, що обслуговується, – N , людей, тоді річна кількість продуктів (у переведенні на молоко), необхідна для постачання цього населення, складе $N \times F$.

За прийнятої річної нормативної змінності роботи підприємства N номінальна змінна потужність його складе:

$$M_{річн} = \frac{F \cdot N}{100 \cdot N}, \quad (2)$$

За нормативну змінність роботи міськмолзаводу прийнято $N = 600$ змін на рік.

При проектуванні молочних заводів площу підсобних приміщень визначають, виходячи з розмірів машин і апаратів, встановлених в них, а камер зберігання готового продукту – за кількістю продукції, що підлягає зберіганню, терміну зберігання та нормі навантаження продукту на 1 м^2 площі.

Площі, необхідні для дозрівання кисломолочної продукції, сиру та охолоджувальні для олії, при розрахунку камер готової продукції не враховуються.

Площа камер зберігання готової продукції визначають методом розрахунку як за кількістю готового продукту, тривалості зберігання, масою укладки продукту на 1 м^2 площі і коефіцієнтом запасу площі, так і з урахуванням норми навантаження на 1 м^2 площі.

У першому випадку площу F_k камер зберігання розраховують, виходячи з кількості готового продукту, термінів зберігання та нормативного завантаження на 1 м^2 , за формулою [11]:

$$F_k = \frac{P \cdot C}{Y_k \cdot K}, \quad (3)$$

де P – маса продукту, що виробляється на добу, кг, тобто кількість (маса) продукції, що підлягає зберіганню, кг; C – термін зберігання, діб; Y_k – норма укладальної маси, кг/м^2 ; K – коефіцієнт використання площі. Коефіцієнт використання площі K враховує проходи, проїзди, площі, зайняті напольними повітроохолоджувачами та пристінними батареями. При роботі з застосуванням електронавантажувачів $K = 0,5$, при роботі вручну $K = 0,7$.

Термін зберігання готової продукції в умовах молочного заводу може бути різним [10-12]: молока питного, дієтичних продуктів – 0,75 діб; сметани, сиру м'якого – 1 доба, масла – з розрахунку зберігання продукції на секцію з 5 вагонів, але не менше 1 вагона, залежно від потужності підприємства та конкретних умов прив'язки проекту; сухого незбираного, знежиреного молока, замінника незбираного молока – 15–20 діб (на комбінатах потужністю до 5–6 т за зміну) та 10 діб (на комбінатах понад 6 т за зміну); сухих дитячих молочних продуктів – не більше 15 діб. Норми укладальної маси та коефіцієнт використовуваної площі також залежать від виду продукту [12].

Таблиця 1 – Нормативи для розрахунку площі камер зберігання

Продукти	Y_k , кг/м^2	K
Молоко (у пакетах) та дієтичні продукти	570	0,70
Простокваша в баночках	160	0,70
Сир у флягах та бочках	428	0,70 (0,70)
Сирки та сир, фасовані в ящики	590	0,70
Сухе молоко:		
у барабанах	400	0,70
у крафт-мішках	1530	0,60
Замінник незбираного молока	1320	0,60
Згущені молочні консерви	1400	0,75
Масло в ящиках, коробках	2250	0,60
Сир:		
натуральний	990-1500	0,5
плавлений	800	0,75
Сметана:		
у флягах	500	0,70
бочках та коробках	720	0,65
Цукровий пісок (склад)	2000	0,75
Морозиво:		
у контейнерах	120	0,65
у гільзах	190	0,60

Джерело: на підставі [10-12]

У другому випадку площу камер зберігання визначають за залежністю [10]

$$F_k = \frac{P \cdot C}{q}, \quad (4)$$

де q – питоме навантаження продукту на 1 м^2 камери зберігання, кг.

При цьому коефіцієнт запасу площі на проходи та проїзди приймають рівним 1, оскільки показник питомого навантаження їх враховує.

Розрахунок будемо проводити першим методом, тому що він дає більшу точність.

Будівельна площа, m^2 , визначається з урахуванням умов завантажувально-розвантажувальних, транспортних і складських робіт:

$$F_{\text{буд}} = \frac{F_{\text{ван}}}{K}, \quad (5)$$

де $F_{\text{ван}}$ – вантажна площа, m^2 , що дорівнює різниці між будівельною площею $F_{\text{буд}}$ і площею, зайнятою напольними повітроохолоджувачами, пристінними відступами і батареями; q – навантаження на $1 m^2$ підлоги камери, kg/m^2 .

Результати розрахунків площ камер зводимо до таблиць 2 і 3.

Таблиця 2 – Результати розрахунку площ камер зберігання готової продукції (до технічного переоснащення)

Найменування продукту	Кількість продукту, кг	Термін зберігання, діб	Навантаження нетто на $1 m^2$ площі, kg/m^2	Коефіцієнт використання площі	Площа камер зберігання, m^2
молоко (свіже, пастеризоване, кисле)	84900	0,75	356	0,5	357,9
кефір, ряжанка	49300	0,75	356	0,5	56,6
йогурт	13400	0,75	356	0,5	481,6
сметана і сир (м'який)	57500	1,5	256	0,7	207,8
масло, морозиво	5500	270	2250	0,6	1095,9
сухе знежирене молоко	8200	15	1530	0,6	134,3
разом	218900				2334,0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Розрахунок площ камер зберігання готової продукції (після технічного переоснащення)

Найменування продукту	Кількість продукту, кг	Термін зберігання, діб	Навантаження нетто на $1 m^2$ площі, kg/m^2	Коефіцієнт використання площі	Площа камер зберігання, m^2
молоко (свіже, пастеризоване, кисле)	93400	0,75	356	0,5	393,6
кефір, ряжанка	54200	0,75	356	0,5	62,2
йогурт	14800	0,75	356	0,5	529,8
сметана і сир (м'який)	63300	1,5	256	0,7	228,6
масло, морозиво	6000	270	2250	0,6	1205,5
сухе знежирене молоко	9000	15	1530	0,6	147,7
разом	240800				2567,4

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, потрібно збільшити площу камер зберігання на $233,4 m^2$, або на 10%, або на 6 будівельних квадратів.

На рис. 1 наведений побудований за даними табл. 3 план складу готової продукції.

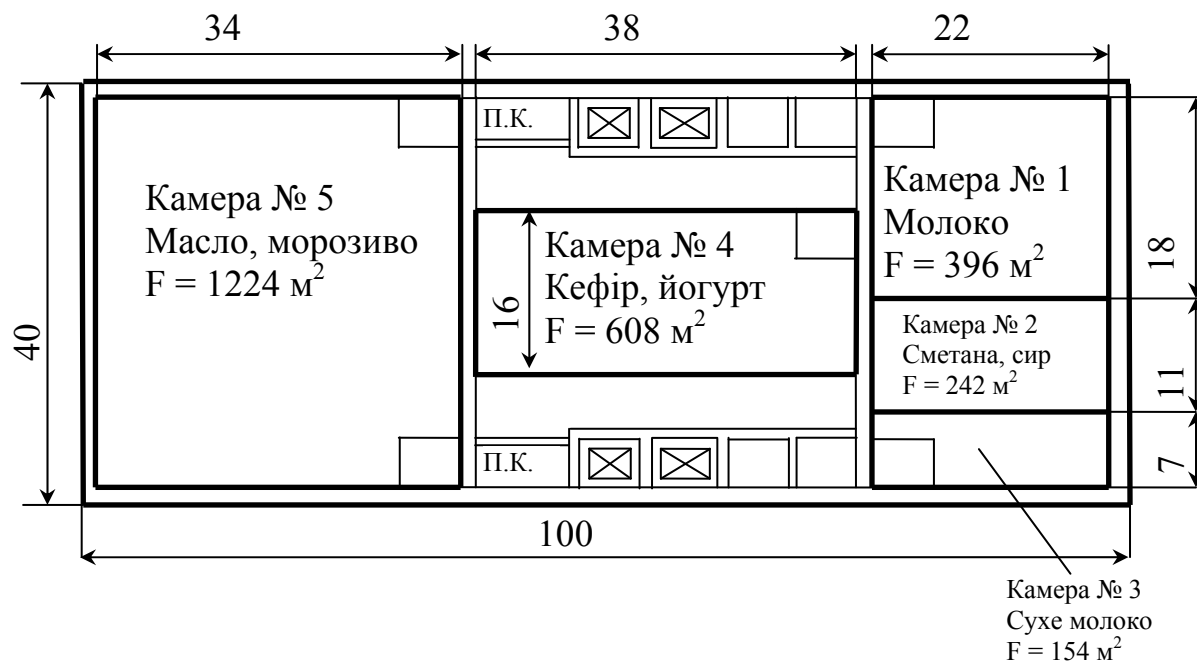


Рисунок 1 – План складу готової продукції (після технічного переоснащення)

Кефір, ряжанка і йогурт, оскільки мають однаковий термін зберігання і навантаження нетто на 1 м² площі, можуть зберігатися в одній камері.

Оптимізаційна модель площі під обладнання для зберігання готової продукції складається з цільової функції – витрат складської площі на освоєння заданого вантажообороту:

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де P_{ij} – змінна моделі – кількість i -го виду продукту, що зберігається в j -ій камері; c_{ij} – питома складомісткість i -го виду продукту в j -ій камері, що характеризує комплексний обсяг робіт камери у квадратних метрах на добу, що припадає на 1 т вантажу.

Питома складомісткість i -го виду продукту в j -ій камері:

$$c_{ij} = \frac{[t_{збер}]_i}{q_{ij}}, \quad (7)$$

де $[t_{збер}]_i$ – термін зберігання i -го виду продукту, діб; q_{ij} – питома навантаження i -го продукту на 1 м² j -ої камери зберігання, кг/м².

Обмеження моделі:

– за вантажооборотом:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = G_i, \quad (8)$$

де G_i – добовий вантажооборот i -го продукту, т;

– за місткістю камери зберігання:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot c_{ij} \leq F_j, \quad (9)$$

де F_j – корисна площа j -ої камери, m^2 ;
– умова невід’ємності змінних:

$$P_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (10)$$

Висновки.

1. Розглянуті аспекти, які впливають на методологію технічного переоснащення молокозаводу, в тому числі її понятійний апарат, комбінаційний метод групування молокопереробних підприємств,

2. Визначені характеристики складського комплексу для зберігання готової продукції підприємства «Данон Кремез», що розглядається (обсяги і тип зберігання, оборот тощо). Розглянути вимоги до оптимального температурно-вологісного режиму зберігання на складі молочних товарів за групами, та його особливості.

3. Виконано структурно-параметричне моделювання площ камер зберігання готової продукції для умов підприємства на основі залежностей, що відповідають вимогам діючих в Україні норм проектування підприємств молочної промисловості. За результатами моделювання розраховані оптимальні площі для зберігання готової молочної продукції, що забезпечують ефективне використання складських приміщень і підтримання безперервності виробничого процесу.

4. Отримані результати можуть бути використані при подальшому проектуванні та модернізації складських зон молокопереробних підприємств, сприяючи підвищенню ефективності їх роботи та конкурентоспроможності у післяреконструкційний період.

Список літератури

1. Вадим Чагаровський: Готуємося до післявоєнного відродження молочної галузі. URL: <https://uadairy.com/vadym-chagarovskiy-gotuyemosya-do-pislyavoyennogo-vidrozhennya-molochnoyi-galuzi/> (дата звернення: 12.10.2025).
2. Офіційна сторінка Danone Україна. URL: <https://danone.ua/#danone> (дата звернення: 12.10.2025).
3. Кременчуцький міськмолокозавод (Данон-Кремез), ПАТ. URL: <https://ua.kompass.com/c/кременчуцький-міськмолокозавод-данон-кремез-пат/ua171209/> (дата звернення: 12.10.2025).
4. Інноваційні технології харчових виробництв: монографія / І. М. Берник та ін. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 300 с.
5. Іщук С. О., Ляховська О. В. Розвиток молокопереробних виробництв у регіонах України: сировинний аспект. *Регіональна економіка*. 2020. № 1. С. 42–51.
6. Шпичак О. М. Організаційно-економічні проблеми виробництва молока в Україні та їх вирішення. *Економіка АПК*. 2021. № 4. С. 24–40.
7. Могильна Л.М. Управління якістю продукції на молокопереробному підприємстві під час виходу на зовнішні ринки. *Приазовський економічний вісник*. 2020. Вип. 1(18). С. 109–113.
8. Мороз О. В., Безсмертна О. В., Шварц І. В. Ефективність витрат в логістичній системі молокопереробних підприємств. *Інтелект XXI*. 2018. № 1. С. 96–100.
9. Савченко О. А., Грек О. В., Красуля О. О. Сучасні технології молочних продуктів. Київ: ЦП «Компринт», 2018. 218 с.
10. Лозовський А. П., Іванов О. М., Самойленко Т. В. Основи технологічного проектування промислових підприємств переробних галузей. Київ: Університетська книга, 2016. 320 с.
11. Крупа О. М. Проектування підприємств молочної промисловості: курс лекцій. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 130 с.
12. Федорів В. М., Стечишин М. С., Мартинюк А. В., Медведчук Н. К. Проектування підприємств харчової промисловості. Київ: Центр учбової літератури, 2025. 394 с.

References

1. Vadym Chaharovs'kyi: Hotuyemosya do pislyavoyennoho vidrozhennya molochnoyi haluzi [We are preparing for the post-war revival of the dairy industry]. URL: <https://uadairy.com/vadym-chagarovskiy-gotuyemosya-do-pislyavoyennogo-vidrozhennya-molochnoyi-galuzi/> (date of application: 12.10.2025).
2. Oficijna storinka Danone Ukraine [Official website of Danone Ukraine]. URL: <https://danone.ua/#danone> (date of application: 12.10.2025).

3. Kremenchuts'kyi mis'kmolokozavod (Danon-Kremez), PAT [Kremenchug City Milk Factory (Danon-Kremez), PrJSC]. URL: <https://ua.kompass.com/c/кременчуцький-міськмолкозавод-данон-кремез-пат/ua171209/> (date of application: 12.10.2025).
4. Bernyk I. M., et al. (2022). Innovatsiyni tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv: monohrafiya [Innovative technologies of food production: monograph]. Vinnytsya: Vydavets' FOP Kushnir Yu.V. [in Ukraine].
5. Ishchuk S. O. & Lyakhovs'ka O. V. (2020). Rozvytok molokopererobnykh vyrobnytstv u rehionakh Ukrainy: syrovynnyy aspekt [Development of dairy processing industries in the regions of Ukraine: raw material aspect]. *Rehional'na ekonomika*. 1, 42–51 [in Ukraine].
6. Shpychak O. M. (2021). Orhanizatsiyno-ekonomichni problemy vyrobnytstva moloka v Ukraini ta yikh vyrishennya [Organizational and economic problems of milk production in Ukraine and their solutions]. *Ekonomika APK*. 4, 24–40 [in Ukraine].
7. Mohyl'na L. M. (2020). Upravlinnya yakystyu produktsiyi na molokopererobnomu pidpryyemstvi pid chas vykhodu na zovnishni rynky [Product quality management at a dairy processing enterprise when entering foreign markets]. *Pryazovs'kyi ekonomichnyy visnyk*. 1(18), 109–113 [in Ukraine].
8. Moroz O. V., Bezsmertna O. V., Shvarts I. V. (2018). Efektyvnist' vytrat v lohistychniy systemi molokopererobnykh pidpryyemstv [Cost efficiency in the logistics system of dairy processing enterprises]. *Intelekt XXI*. 1, 96–100 [in Ukraine].
9. Savchenko O. A., Hrek O. V. & Krasulya O. O. (2018). Suchasni tekhnolohiyi molochnykh produktiv [Modern technologies of dairy products]. Kyiv: TSP «Komprynt» [in Ukraine].
10. Lozovs'kyi A. P., Ivanov O. M. & Samoilenko T. V. (2016). Osnovy tekhnolohichnoho proektuvannya promyslovykh pidpryyemstv pererobnykh haluzey [Fundamentals of technological design of industrial enterprises of processing industries]. Kyiv: Universytet-s'ka knyha [in Ukraine].
11. Krupa O.M. (2019). Proektuvannya pidpryyemstv molochnoyi promyslovosti: kurs lektsiy [Design of dairy industry enterprises: a course of lectures]. Ternopil': TNTU [in Ukraine].
12. Fedoriv V. M., Stechyshyn M. S., Martynyuk A. V. & Medvedchuk N. K. (2025). Proektuvannya pidpryyemstv kharchovoyi promyslovosti [Design of food industry enterprises]. Kyiv: Tsentr uchbovoyi literatury [in Ukraine].

Volodymyr Zahorianskyi, Ass. Prof., PhD tech. sci., **Karina Grytsenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Modeling the Parameters of a Warehouse Complex of a Processing Enterprise (Using the Example of Technical Re-Equipment of PrJSC "Danone Kremez")

The article is devoted to the actual problem of modeling the parameters of the warehouse complex of a dairy processing enterprise using the example of technical re-equipment of the warehouse of the enterprise "Danon Kremez", Kremenchuk.

The purpose of the paper is to increase the efficiency of the transport and warehouse system of an industrial enterprise by modeling the parameters of its warehouse system.

It is necessary to reconstruct the operating enterprises of the dairy industry taking into account progressive technological processes, as well as the best experience of operating enterprises. The design is based on technological solutions, which in turn are closely intertwined with the volume-planning and constructive solutions of the entire complex of buildings, structures and installed equipment.

An analysis of the warehouse operations of the enterprise "Danon Kremez" has been performed. Based on data on the output of various groups of dairy products last year and indicators for the three quarters of this year, which generally correspond to last year's, the enterprise plans to increase annual output by ten percent next year. The task was to calculate the required areas of storage rooms for finished products during the technical re-equipment of the enterprise, as well as to specify the areas for storing raw materials. Based on the calculations, the optimal areas for storing raw materials and finished products were determined, ensuring the effective use of warehouse space and maintaining the continuity of the production process. The calculated parameters make it possible to increase the rationality of the placement of material flows, reduce the time for loading and unloading operations and minimize the costs of maintaining the warehouse. The results obtained can be used in the further design and modernization of the enterprise's warehouse areas, contributing to increasing its competitiveness and efficiency in the post-reconstruction period.

dairy, finished products, storage rooms, area determination, modeling

Одержано (Received) 27.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 11.11.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2025

А. В. Йовченко, канд. техн. наук

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

e-mail: a.yovchenko@chdту.edu.ua

Lean & Green підходи в удосконаленні логістики транспортних підприємств

Розглянуто можливості підвищення ефективності роботи транспортних підприємств шляхом впровадження ощадливого виробництва (Lean) та зеленої логістики (Green). Наведено інструменти Lean-логістики: 5S, Sustainable Transportation Value Stream Map (STVSM), Kanban, Just-in-Time та Kaizen, за рахунок яких на транспортних підприємствах може відбуватись скорочення порожніх пробігів, оптимізація маршрутів, зменшення надлишкових запасів, втрат часу та ін. Поеднання Lean та Green логістики, використання енергоефективних видів транспорту, цифрових систем управління логістичними потоками та вимог законодавства до екологічних норм зовнішнього довкілля призводить до зниження витрат та вуглецевого сліду логістичних операцій. Розроблено аналітичну модель логістичного вузла для оцінки його роботи при відмові та ремонті рамп, що дозволяє кількісно оцінити пропускну здатність системи. Наведено шляхи вирішення проблеми.

транспортна логістика, Lean-логістика, Green-логістика, система масового обслуговування

Постановка проблеми. Однією з ключових причин глобального потепління та забруднення довкілля є викиди, що виникають внаслідок логістичних перевезень вантажними транспортними засобами (ТЗ). Зростання обсягів вантажних перевезень, посилення екологічного регулювання та підвищення вартості енергоресурсів актуалізують завдання оптимізації транспортно-логістичних систем. Витрати транспортних підприємств формуються внаслідок неефективної взаємодії транспортних та складських операцій, надлишкових переміщень матеріальних потоків, простоїв рухомого складу та ін.

Зелена логістика спрямована на зменшення екологічного навантаження, яке виникає внаслідок роботи транспортно-складської інфраструктури. Застосування Lean-підходів забезпечує більш раціональне використання ресурсів та усунення повторюваних операцій. Впровадження Lean та Green підходів формує комплексний ефект, який сприяє підвищенню операційної ефективності систем та скороченню негативного впливу на довкілля.

Lean-інструменти нерідко застосовуються без належного рівня використання логістичних ресурсів та кількісного аналізу пропускну здатності, що ускладнює прийняття управлінських рішень та знижує очікуваний ефект від їх реалізації.

В умовах зростання вимог до зменшення екологічного навантаження, підвищення економічної ефективності та стабільності логістичного сервісу традиційні підходи до управління матеріальними потоками стають недостатньо результативними. Ефективним напрямом є впровадження системи масового обслуговування (СМО), яка надасть математично обґрунтоване моделювання пропускну здатності, черг та завантаження ресурсів разом із принципами Lean-логістики, спрямованими на усунення витрат, мінімізацію варіативності процесів та оптимізацію потоків. Це дозволить одночасно оцінювати динаміку логістичних систем в кількісних показниках та впроваджувати організаційні зміни для підвищення швидкості та стійкості матеріальних потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування принципів Lean в транспортній логістиці розглядається в наукових дослідженнях як ефективний інструмент підвищення результативності логістичних процесів. Зокрема, впровадження ощадливих підходів дозволяє скоротити простой ТЗ, оптимізувати маршрути перевезень, зменшити витрати палива, а також підвищити ефективність складських операцій і документообігу. В результаті підприємства отримують конкурентні переваги, а транспортні системи набувають ознак сталого розвитку [1–7].

Складські процеси відіграють ключову роль в транспортній логістиці, оскільки саме на цьому етапі формуються основні часові та ресурсні витрати. Нераціональна організація складських зон, зайві операції та складні маршрути переміщення вантажів часто призводять до затримок і перевитрат, що створює так званий ефект «петлі» — хаотичні та надмірні траєкторії руху персоналу та техніки, що виникають через відсутність узгодженого планування та ефективного управління потоками. Оптимізація цих процесів є важливою складовою підвищення ефективності логістичних систем в межах Lean-підходу [6].

В роботах [8-11] розглянуто можливості адаптації Lean-підходів до діяльності транспортних підприємств з урахуванням економічних викликів та нестабільності транспортної інфраструктури. Доведено, що впровадження ощадливих принципів у логістику сприяє скороченню часових втрат, підвищенню ефективності перевезень та підвищенню рівня обслуговування клієнтів.

До основних видів втрат, характерних для транспортної логістики, належать [7]: часові втрати, пов'язані з простоями ТЗ та очікуванням навантаження або розвантаження; надлишкові перевезення, зумовлені неоптимальними маршрутами та зворотними рейсами без вантажу; зайві переміщення вантажів і персоналу на складах; дефекти документації, зокрема помилки в товарно-транспортних накладних; нерівномірність використання ресурсів, що проявляється у перевантаженні окремих ТЗ за одночасного простою інших та ін.

Застосування Lean-підходів у транспортній логістиці забезпечить зниження непродуктивних витрат, підвищення ефективності логістичних потоків та оптимізацію витрат підприємств. Водночас, підвищення результативності внаслідок впровадження ощадливих принципів потребує попереднього аналізу складських потоків транспортного підприємства та розроблення заходів з їх оптимізації з урахуванням концепції Lean-підходів [8-11].

Lean-підхід зазвичай реалізується через систему Kanban, тоді як Green оцінюється за показниками споживання матеріалів, енергії та води. Впровадження Lean сприяє зменшенню матеріальних та енергетичних витрат за рахунок скорочення перевиробництва, що узгоджується з концепцією екологічної ефективності виробництва.

Водночас дослідження вказують на можливі компроміси між Lean і Green, зумовлені специфікою технологічних процесів. Використання DES-моделювання розглядається як ефективний інструмент для аналізу Lean&Green, оптимізації параметрів Kanban і вибору збалансованих рішень з урахуванням виробничих та екологічних показників [12].

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування доцільності впровадження Green-логістики, розроблення Lean-підходів та методів СМО для зменшення витрат і підвищення ефективності транспортно-логістичних процесів.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення таких задач:

1. Проаналізувати основні джерела витрат в транспортних та складських логістичних процесах.

2. Дослідити можливості застосування Green-логістики, Lean-інструментів (STVSM, Kanban, Kaizen, SMED) в логістиці.

3. Обґрунтувати використання моделей СМО для аналізу завантаження логістичних ресурсів.

4. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення ефективності транспортно-складських процесів на основі поєднання підходів Green, Lean і СМО.

Виклад основного матеріалу. Автомобільний транспорт є одним із найбільших джерел викидів CO₂, займаючи до 25% у глобальному балансі. Основними факторами є інтенсивність використання автомобільного транспорту, низький рівень завантаженості рейсів, застарілі двигуни, недостатня інтеграція екологічних стандартів у логістичні операції та ін.

Методи ощадливого виробництва (Lean), запропоновані компанією Toyota, сьогодні активно інтегруються у сферу логістики. Lean-логістика дозволяє зменшувати порожні пробіги ТЗ; оптимізувати маршрути перевезень та завантаження складів; застосовувати Kanban та Just-in-Time для зниження надлишкових запасів, та ін. [6-7].

Lean-методологія пропонує низку інструментів, що можуть бути адаптовані для транспортної логістики [6-11]:

- Sustainable Transportation Value Stream Mapping (STVSM) для виявлення витрат у транспортних процесах, включає оцінку індексу загальної ефективності транспортних засобів;

- Just-in-Time для оптимізації графіків доставки;

- 5S для підвищення організованості вантажно-розвантажувальних та складських операцій;

- Kaizen як механізм постійного вдосконалення маршрутів і процесів.

Індекс загальної ефективності ТЗ складається з адміністративної або стратегічної доступності, операційної доступності, продуктивності та якості.

До Green-логістики відносяться такі екологічні впровадження в сферу діяльності підприємства як: використання ТЗ із низьким рівнем викидів; використання цифрових платформ керування ТЗ для оптимізації та зменшення неефективних рейсів, енергоефективних технологій у складській інфраструктурі та ін. [12].

Green-логістика також включає розвиток екологічних видів пакування, повторне використання ресурсів і застосування концепції зворотної логістики: перехід на багаторазові упаковки, впровадження біорозкладних та енергоефективних пакувальних рішень. Зворотна логістика надає можливість організовувати ефективні потоки повернення тари, товару з вадами, деталей для ремонту та утилізації, тобто зменшення екологічного сліду логістичної системи в цілому. У комплексі вони сприяють збільшенню екологічної стійкості транспортних та матеріальних потоків.

Поєднання Lean та Green підходів дозволяє досягти подвійного ефекту: зниження витрат підприємства та мінімізації впливу на довкілля. Наприклад, оптимізація маршрутів на основі GPS-аналітики за Lean-підходами може одночасно скоротити витрати палива на 10–15% та зменшити викиди CO₂.

Lean-підходи дозволяють ефективно синхронізувати графіки роботи різних видів ТЗ, а зелена логістика забезпечує екологічність таких перевезень. Таким чином формується концепція Green Lean Logistics, яка може стати основою для нових бізнес-моделей і державних стратегій сталого розвитку.

Існує декілька алгоритмів формування системи ощадливого виробництва, які відрізняються послідовністю дій та акцентами на окремих інструментах Lean. Підхід Дж. Вумека залежить від залучення персоналу та постійного удосконалення логістичних процесів. Необхідно створити команду впровадження, навчити її Lean-

підходам, ідентифікувати критичні проблеми підприємства та поступово їх усунути та перейти до більш складних завдань. Одним із головних питань підприємств є скорочення часу реакції та собівартості продукції. Важливе місце приділяється побудові карти потоку, яка дозволяє виявити вузькі місця та джерела витрат, а також оперативна реалізація заходів із формуванням бажаного майбутнього стану виробничої системи. Окремо наголошується на орієнтації на короткострокові результати та активному залученні працівників до процесів безперервного вдосконалення на засадах Kaizen.

Інший поширений підхід до впровадження ощадливого виробництва запропонований М. Вейдером, що ґрунтується на принципі циклічного вдосконалення виробничих процесів. Здійснюється оцінка стану підприємства, що дозволяє ідентифікувати основні види витрат. На цьому етапі важливу роль відіграють інформаційні технології, які забезпечують прозорість та стійкість транспортно-логістичних процесів. Вони дозволяють здійснювати планування маршрутів вантажних перевезень, моніторинг логістичних операцій, що дозволяє зменшити простой ТЗ та призводить до зменшення витрат.

При впровадженні системи 5S (раціональне розміщення, сортування, стандартизація, прибирання, удосконалення та дисципліна) виявляються зайві операції. Подальше застосування картування потоку дозволяє ідентифікувати приховані витрати та обґрунтувати використання таких інструментів, як швидке переналагодження, захист від помилок і візуальний контроль [13].

Аналіз різних систем свідчить про відсутність універсального підходу до впровадження ощадливого виробництва, що зумовлено специфікою галузей, масштабами підприємств та рівнем організаційної зрілості. Водночас більшість методик мають спільні концептуальні засади, серед яких ключове значення має орієнтація на людину. Принцип поваги до персоналу розглядається як фундамент Lean-філософії та передбачає перехід від контролюючої до підтримуючої ролі керівництва, розвиток компетенцій працівників і формування умов для їх активної участі в удосконаленні процесів. Такий підхід узгоджується з результатами класичних досліджень у сфері управління виробництвом, які підтверджують визначальну роль людського фактору у досягненні стійких результатів підвищення ефективності.

Для впровадження ощадливого виробництва необхідно сформувати міжфункціональну проектну групу з представників логістичного, виробничого, складського та транспортного підрозділів, провести їх навчання методам логістичної діагностики та інструментам Lean. Дана група зможе ідентифікувати критичні складські процеси, що порушують ритмічність і безперервність матеріальних потоків, виділити «петлі», а також сформувати перелік первинних Kaizen-пропозицій, спрямованих на усунення виявлених витрат.

Подальший аналіз логістичних процесів дозволить виявити основні причини неефективності транспортно-складської діяльності. Встановити закономірності варіативності товарних і транспортних потоків, визначити рівень ритмічності роботи складу, а також здійснити класифікацію товарних позицій за методами ABC–XYZ. На основі отриманих результатів розробити систему Kaizen-заходів з оптимізації логістичних процесів, провести оцінку інвестиційних витрат і обґрунтувати вибір пріоритетних альтернатив із визначенням цільових параметрів їх реалізації [13].

Реалізація обраних рішень забезпечить комплексні зміни в організації транспортно-складського комплексу, включаючи оптимізацію руху ТЗ, удосконалення системи управління запасами, впровадження RFID-технологій, інструментів 5S, а також раціоналізацію чисельності персоналу. Внаслідок чого буде досягнуто підвищення

швидкості та ритмічності складських операцій, усунення логістичних витрат та скорочення витрат на утримання складу.

Як результат, необхідно провести моніторинг ефективності логістичних операцій та роботи транспортно-складського комплексу шляхом порівняння ключових показників до та після впровадження змін. Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити вплив удосконалень на продуктивність системи, визначити рівень досягнення поставлених цілей, а також виявити проблемні ділянки, що продовжують обмежувати загальну ефективність. Крім того, систематичний аналіз динаміки показників забезпечує можливість своєчасного коригування управлінських рішень та дає змогу встановити закономірності у поведінці логістичних потоків.

У закордонній логістичній компанії на початковому етапі було застосовано картографування автомобільних перевезень (STVSM) з використанням Lean- та Green-підходів для підвищення операційної та екологічної ефективності. Компанія надає широкий спектр транспортно-логістичних послуг і щоденно обслуговує близько 4000 клієнтів за 28–32 маршрутами. Найкращою стратегією для підвищення ефективності продуктивності було визначено зменшення втрат через заповнення на 60,5 %, оскільки обсяг упаковок, що перевозився кожною вантажівкою, був меншим за її місткість.

Запропонована стратегія передбачала актуалізацію клієнтської бази, оптимізацію розподілу клієнтів між маршрутами; скорочення надлишкової протяжності маршрутів за рахунок раціоналізації послідовності обслуговування клієнтів; раціоналізацію послідовності завантаження та перерозподіл складських операцій. Паралельно було сформовано короткострокову і довгострокову екологічні стратегії, з яких у межах дослідження основну увагу зосереджено на оптимізації маршрутизації. Реалізація заходів дозволила усунути понаднормові витрати на оплату праці, зумовлені перевищенням середньої тривалості рейсів.

Далі компанія відібрала екологічні відходи, пов'язані з якістю повітря, парниковими газами, упаковкою. У цьому напрямку було проаналізовано та використано як основу екологічні програми, розроблені та впроваджені у своїх операціях такими компаніями, як DHL, Fedex та UPS. Їх стратегії підвищення екологічної ефективності базувалися на оптимізації маршрутів, використанні гібридних ТЗ, альтернативних видів палива та впровадженні інноваційних технологій. У зв'язку з цим, компанією були визначені короткострокова та довгострокова екологічні стратегії, з яких короткострокова була орієнтована на підвищення ефективності маршрутизації, а довгострокова передбачала впровадження капіталомістких екологічних ініціатив.

Впровадження заходів розпочалося з перерозподілу операцій в складському приміщенні, що забезпечило зосередження водія та його помічника виключно на виконанні функцій з обслуговування клієнтів. Такий підхід дозволив усунути додаткові витрати на оплату праці, зумовлені перевищенням середньої тривалості рейсу (10,8 год) над нормативною тривалістю робочої зміни (8 год).

Оптимізація маршрутизації включала актуалізацію клієнтської бази, кластеризацію клієнтів за зонами та формування маршрутів із використанням програмного забезпечення *My Route Online*. У результаті пілотного впровадження ефективність продуктивності зросла з 26,6 % до 35,2 %, надлишкову відстань скорочено на 57 %, а середній час у дорозі зменшено до нормативних 8 год. Це забезпечило зниження понаднормових витрат на оплату праці (35 %) та скорочення споживання палива на 13,5 %.

Дорожні затори, що виникають унаслідок перевантаженості транспортної інфраструктури, суттєво знижують ефективність транспортних операцій і погіршують екологічні показники. Для зменшення негативного впливу заторів доцільним є

впровадження нічних маршрутів, що дозволяє підвищити продуктивність маршрутів, ефективніше використовувати ТЗ та скоротити викиди забруднюючих речовин на 25–70 % за рахунок руху з оптимальними швидкостями. Додатковими заходами підвищення ефективності та сталості є використання ТЗ меншої вантажопідйомності, навчання водіїв екологічному стилю керування.

У зв'язку з необхідністю більш глибокого розуміння роботи логістичного вузла та факторів, що обумовлюють його пропускну здатність, було застосовано стохастичний підхід до моделювання процесів обслуговування ТЗ. Зокрема, для оцінювання ефективності функціонування логістичного вузла з декількома рампами розглянуто модель, у якій надходження вантажних автомобілів описується пуассонівським потоком із інтенсивністю λ , а процес обслуговування на кожній рампі характеризується експоненціальним розподілом із параметром μ . На відміну від класичних моделей СМО. Запропонована постановка була розширена шляхом врахування можливих відмов та ремонтів рамп. Це дозволяє моделювати реальні умови експлуатації, коли доступність окремих точок обслуговування може тимчасово знижуватися, що безпосередньо впливає на фактичну пропускну здатність системи та рівень завантаженості черг.

Доступність однієї рампи визначається співвідношенням:

$$p = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$$

де α – інтенсивність відмов, β – інтенсивність ремонтного відновлення. Отже, ефективна швидкість обслуговування однієї рампи становитиме $\mu_{\text{eff}} = \mu \cdot p$, а загальна пропускну здатність логістичної точки дорівнюватиме $c\mu_{\text{eff}}$. Подальший аналіз здійснюється через обчислення навантаження системи $a = \lambda / \mu_{\text{eff}}$ та рівня завантаження однієї рампи $\rho = a / c$. Сталість функціонування визначається умовою $\rho < 1$.

Для розрахунку основних показників роботи логістичної системи використано класичні формули Erlang C, що дозволяють визначити ймовірність очікування, середню довжину черги та середній час перебування вантажівки в системі.

Ймовірність того, що рампа є вільною:

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^{c-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^c}{c!(1-\rho)} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Ймовірність того, що всі рампи зайняті:

$$C(a, c) = \frac{a^c}{c!(1-\rho)} P_0. \quad (2)$$

Середня кількість у черзі:

$$L_q = \frac{C(a, c)\rho}{1-\rho}. \quad (3)$$

Середній час очікування у черзі:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}. \quad (4)$$

Середній час у системі (очікування + обслуговування):

$$W = W_q + \frac{1}{\mu_{eff}}. \quad (5)$$

Розглянемо приклад: $\lambda=8$ трак/год, $c=3$ рампи, $\mu=3$ обл./год, $\alpha=0.1$ відмов/год, $\beta=2$ ремонти/год. Розрахунки показали, що доступність рампи становить 0.952, а ефективна швидкість обслуговування — 2.857 обл./год. При цьому рівень завантаження рамп сягає $\rho \approx 0.93$, що є гранично високим. Застосування формул Erlang C показало, що ймовірність утворення черги становить 88%, середня довжина черги ≈ 12.27 вантажівок, а середній час очікування до початку обслуговування ≈ 1.53 год. Загальний час перебування вантажівки в системі $W \approx 1.88$ год, що свідчить про значне перевантаження логістичного вузла.

Проведений аналіз показує, що для покращення функціонування логістичного вузла можуть застосовуватися різні стратегії. Найбільш ефективним є збільшення кількості рамп: при розширенні до $c=4$ рівень завантаження зменшується до $\rho \approx 0.70$, а середній час очікування скорочується майже у 12 разів (до ≈ 0.125 год). В інших випадках можливе зменшення α або збільшення β , керування інтенсивністю прибуття вантажівок через оптимізацію графіків перевезень, зростання продуктивності μ завдяки застосуванню Lean-інструментів (VSM, Kanban, 5S, Just-in-Time, Kaizen та ін.).

Таким чином, запропонована модель дозволяє кількісно оцінити вплив відмов та ремонтів рамп на загальний час обслуговування вантажного потоку та може бути використана для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності логістичних систем.

Висновки. Впровадження Lean-підходів дозволяє оптимізувати маршрути, зменшити витрати та підвищити ефективність транспортно-складських операцій, що знижує витрати палива та рівень викидів. Використання екологічних ТЗ та цифрових платформ в транспортно-складському комплексі посилюють цей ефект.

Вибір Lean та Green-підходів має здійснюватися індивідуально для кожного підприємства з урахуванням специфіки його операційних процесів, структури логістичних потоків та ринкових умов. Універсальні рішення є малоефективними, оскільки оптимальне поєднання Lean та Green-підходів визначається особливостями діяльності конкретного транспортного підприємства.

Green Lean Logistics забезпечує одночасне досягнення екологічної та економічної ефективності. Аналіз алгоритмів впровадження Lean показав, що основними параметрами в даній концепції є залучення персоналу, картування потоків, впровадження системи Kaizen, у тому числі з використанням цифрових технологій для моніторингу логістичних процесів в реальному часі.

Математичне моделювання логістичного вузла з врахуванням відмов рамп показало навантаження системи та значні затримки в обслуговуванні. Збільшення кількості рамп та використання Lean-підходів дозволить підвищити пропускну здатність та скоротити час очікування. Отже, інтеграція Lean, Green, СМО та цифрових рішень формує основу для створення ефективних і екологічно стійких транспортно-логістичних систем.

Список літератури

1. Кучмеев О. О. Особливості управління матеріальними потоками в логістичних системах торговельних підприємств. *Економіка та управління підприємствами*. 2018. Вип. 30(1). С. 99-103.
2. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія / В. В. Аулін та ін., – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.

3. Боровик Ю. Т., Василенко Х. О. Транспортна логістика та сучасні складські технології. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2019. Вип. 66. С. 69-76.
4. Марінов Є. А. Інноваційні технології у транспортній логістиці: економічний потенціал і виклики впровадження. *Академічні візії*. 2024. Вип. 30. С. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13846667>.
5. Ачкасова Л. М. Впровадження інструментів ощадливого виробництва в роботу підприємства. *Економіка транспортного комплексу*. 2025. Вип. 46. С. 44-65. DOI: 10.30977/ETK.2225-2304.2025.46.44.
6. Йовченко А. В., Шльончак І. А. Використання системи ощадливого виробництва в транспортно-складському комплексі підприємства. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: зб. матеріалів наукових робіт з VI міжнародної наук.-практ. конф., 22-24 лист. 2023. Кропивницький: ЦНТУ, 2023 р. С. 123-124.
7. Йовченко А.В. Використання принципів ощадливого виробництва в транспортній логістиці. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: зб. матеріалів наукових робіт з XVIII міжнародної наук.-практ. інтернет-конф., 20-22 жовтня. 2025 р. Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 191-194.
8. Шкуренко В. О. Концепція «Lean production» в системі стратегічного менеджменту транспортних підприємств. *Актуальні проблеми економіки*. 2023. Вип. 7 (265). С. 57-64.
9. Сорокун Ю. С. Механізм управління діяльністю транспортних підприємств на засадах концепції ощадливого виробництва. *Проблеми економіки*. 2023. Вип. 2 (56). С. 182-189.
10. Каличева Н. Є., Мельник О. А., Подоляничук А. М. Забезпечення ефективного функціонування вітчизняних підприємств за рахунок впровадження ощадливого виробництва. *Причорноморські економічні студії*. 2018. Вип. 33. С. 79-82.
11. Терлецька Ю. О., Лозовський Л. А. Концепція ощадливого виробництва: цільові орієнтири та практичний досвід імплементації. *Science of XXI century: development, main theories and achievements: Collection of scientific papers «SCIENTIA»*, 26 January. 2024. Helsinki, Republic of Finland. С. 97-100.
12. Baumer-Cardoso M. I., Campos L. M.S., Pfeifer Portela P. S., Frazzon E. M. Simulation-based analysis of catalyzers and trade-offs in Lean & Green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 242. 118411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118411>.
13. Пізняк Т. І., Пізняк Д. Ю. Використання концепції кайдзен в управлінні персоналом підприємств в умовах воєнного стану. *Економіка. Фінанси. Право*. 2022. Вип. 4. С. 5-8. DOI: <https://doi.org/10.37634/efp.2022.4.1>.
14. Прокудін Г. С., Хоботня Т. Г., Прокудіна І. І., Назарова А. П. Система аналізу мережі СМО логістичних ланцюгів доставки вантажів. *Розумний транспорт та інтегровані транспортні технології*: зб. матеріалів наукових робіт з міжнародної наук.-практ. конф., 21-22 лист. 2023. Харків: ХНАДУ, 2023. С. 100-102.

References

1. Kuchmeev, O. O. (2018). Features of material flow management in logistics systems of commercial enterprises. *Economics and enterprise management*, 30(1), 99-103 [in Ukrainian].
2. Aulin, V. V., Grinkiv, A. V., Lysenko, S. V., Holovaty, A. O., Holub, D. V. (2021). Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems: monograph. Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V.F. [in Ukrainian].
3. Borovyk, Yu. T., Vasylenko, Kh. O. (2019). Transport logistics and modern warehouse technologies. *Bulletin of the economy of transport and industry*. 66. 69-76 [in Ukrainian].
4. Marinov, E. A. (2024). Innovative technologies in transport logistics: economic potential and challenges of implementation. *Academic visions*, 30 (2024), 1-14. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13846667>
5. Achkasova, L. M. (2025). Implementation of lean production tools in the work of the enterprise. *Economics of the transport complex*. 46 (2025). 44-65. [in Ukrainian]. DOI: 10.30977/ETK.2225-2304.2025.46.44
6. Yovchenko A. V., Shlyonchak I. A. (2023). Using the lean production system in the transport and warehouse complex of the enterprise. *Innovative technologies for the development and efficiency of the functioning of road transport: materialy VI mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 123-124). Kropyvnytskyi: TsNTU. [in Ukrainian].
7. Yovchenko, A.V. (2025). Using the principles of lean production in transport logistics. *Modern technologies and prospects for the development of road transport: materialy XVIII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 191-194). Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].
8. Shkurenko, V. O. (2023). The concept of "Lean production" in the system of strategic management of transport enterprises. *Current problems of economics*, 7 (265). 57-64 [in Ukrainian].

9. Sorokun, Yu. S. (2023). The mechanism of management of the activities of transport enterprises based on the concept of lean production. *Problems of economics*, 2 (56), 182-189 [in Ukrainian].
10. Kalycheva, N. E., Melnyk, O. A., Podolyanchuk, A. M. (2018). Ensuring the effective functioning of domestic enterprises through the introduction of lean production. *Black Sea Economic Studies*, 33, 79-82 [in Ukrainian].
11. Terletska, Yu. O., Lozovsky, L. A. (2024). The concept of lean production: target guidelines and practical experience of implementation. *Science of XXI century: development, main theories and achievements: Collection of scientific papers «SCIENTIA»* (pp. 97-100). Helsinki, Republic of Finland [in Ukrainian].
12. Baumer-Cardoso, M. I., Campos, L. M.S., Pfeifer, Portela P. S., Frazzon, E. M. (2020). Simulation-based analysis of catalysts and trade-offs in Lean & Green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 242 (2020), 118411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118411>.
13. Piznyak, T. I., Piznyak, D. Yu. (2022). Using the kaizen concept in personnel management of enterprises under martial law. *Economics. Finance. Law*. 4 (2022), 5-8. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37634/efp.2022.4.1>.
14. Prokudin, G. S., Khobotnya, T. G., Prokudina, I. I., Nazarova, A. P. (2023). System of analysis of the network of SMO logistic chains of cargo delivery. *Intelligent transport and integrated transport technologies: materialy XVIII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 100-102). Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].

Alla Yovchenko, PhD tech. sci.

Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Lean & Green Approaches to Improving Logistics in traNsport Companies

In this article examines modern approaches to improving the efficiency of transport logistics through the integration of Lean and Green principles. It is shown that traditional logistics systems face a number of challenges, including excessive downtime, inefficient transport routes, increased CO₂ emissions, and high material intensity of operations. Through the application of Lean methods in particular 5S, Value stream mapping (VSM), Kanban, Kaizen the waste in a transport and warehouse operation can be decreased and the resources can be better utilised.

Green logistics is the extension of these principles with the aim of minimizing negative environmental effects by employing energy-saving vehicles, sustainable packaging, material recycling, and reverse logistics. It demonstrates that the Lean and Green solution approach is a win-win solution for simultaneously enhancing the productivity of operations and the environmental performance of logistics systems.

The throughput of a logistics node with multiple loading docks is evaluated by a stochastic queuing model considering random interruptions due to malfunctions and repairs. The model can be used to calculate system throughput, ramp utilization, waiting times, and other important key performance indicators (KPIs) for managerial decisions. The results demonstrate that Lean-based process optimization, increased ramp availability, and the rationalization of transport flows significantly reduce idle time, queue length, and fuel consumption.

Integrating Lean and Green technologies into transport logistics creates the foundation for highly efficient balanced systems capable of enhancing organizational resilience and providing competitive advantages under transport companies.

transport logistics, Lean logistics, Green logistics, mass service system

Одержано (Received) 19.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 29.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

С. В. Козак, доц., канд. екон. наук

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
Україна*

e-mail: s.v.kozak@nuwm.edu.ua

Дослідження операцій в транспортних системах міського пасажирського транспорту

У статті розглянуто застосування методів дослідження операцій у транспортних системах міського пасажирського транспорту. Проаналізовано особливості функціонування міських транспортних систем як складних соціально-технічних систем, визначено основні задачі оптимізації, що виникають у процесі їх планування та управління. Окрему увагу приділено математичним моделям, методам оптимізації, імітаційному моделюванню та використанню сучасних інформаційних технологій для підвищення ефективності перевезень пасажирів. Також комплексно розглянуто теоретичні та прикладні аспекти застосування методів дослідження операцій у транспортних системах міського пасажирського транспорту. Обґрунтовано доцільність використання оптимізаційних та імітаційних моделей для планування маршрутної мережі, розкладів руху та розподілу рухомого складу. Наведено приклади математичних моделей і критеріїв оптимальності, а також проаналізовано роль сучасних інформаційних технологій у підвищенні ефективності міських пасажирських перевезень.

дослідження операцій, міський пасажирський транспорт, транспортні системи, оптимізація, моделювання, управління перевезеннями

Постановка проблеми. Сучасні міста характеризуються високою інтенсивністю переміщення населення, що створює значне навантаження на систему міського пасажирського транспорту. Ефективність функціонування цієї системи безпосередньо впливає на економічний розвиток міста, рівень мобільності населення, екологічний стан та якість життя громадян. Однією з основних проблем є невідповідність між існуючими параметрами функціонування транспортної системи та реальними потребами пасажирів. Це проявляється у перевантаженості транспортних засобів у години пік, нерівномірності пасажиропотоків, тривалому часі очікування транспорту, нераціональному розподілі рухомого складу по маршрутах, а також у підвищених експлуатаційних витратах транспортних підприємств. Існуюча організація роботи міського пасажирського транспорту часто базується на застарілих підходах або емпіричних рішеннях, що не враховують повною мірою складність і динамічність транспортних процесів. В умовах обмеженості ресурсів, зростання вартості енергоносіїв та збільшення попиту на перевезення виникає необхідність у застосуванні науково обґрунтованих методів управління транспортними системами. Особливої актуальності набуває застосування методів дослідження операцій, які дозволяють формалізувати транспортні процеси у вигляді математичних моделей, врахувати наявні обмеження та визначити оптимальні параметри функціонування системи. Це дає можливість оптимізувати маршрути руху, інтервали руху транспортних засобів, розподіл рухомого складу та зменшити загальні витрати часу і ресурсів. Таким чином, проблема полягає у необхідності розробки та застосування математичних моделей і методів дослідження операцій для оптимізації функціонування системи міського пасажирського транспорту з метою підвищення ефективності перевезень, зменшення витрат та покращення якості обслуговування пасажирів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Публікації з цієї тематики висвітлюють як фундаментальні аспекти дослідження операцій в транспортних системах, так і інноваційні підходи, спрямовані на мінімізацію ризиків транспортної діяльності. Зважаючи на потребу інтеграції в європейське та світове співтовариство, Україна приділяє значну увагу питанням безпеки міського автомобільного транспорту [1, 2]. У роботах багатьох дослідників акцентується увага на важливості технічного стану транспорту [3-5]. Ряд публікацій присвячено вивченню методів підвищення ефективності безпечної організації дорожнього руху та безпечності перевезень [6-8]. Неодноразово підкреслюється важливість людського чинника у забезпеченні безпеки [9-10]. Аналіз досліджень демонструє, що ефективне забезпечення безпечності транспортної діяльності вимагає комплексного підходу. Подальші дослідження мають бути зосереджені на узагальненні стратегій розвитку максимально безпечного транспортного середовища.

Постановка завдання. До найбільш поширених задач, що формалізуються в рамках дослідження операцій, належать: оптимізація маршрутної мережі з урахуванням попиту на перевезення; формування та оптимізація розкладів руху; розподіл рухомого складу між маршрутами; мінімізація експлуатаційних витрат транспортних підприємств; зменшення часу очікування та поїздки пасажирів; підвищення надійності та регулярності руху. У більшості випадків ці задачі мають суперечливі критерії оптимальності, що потребує застосування багатокритеріальних методів оптимізації.

Забезпечення безпечної транспортної діяльності є однією з пріоритетних задач сучасного транспортного сектору. Розвиток безпечного автомобільного транспорту, підвищення інтенсивності перевезень і насиченості транспортних потоків вимагають системного підходу до аналізу та управління безпекою. Постановка завдання у цій сфері передбачає визначення ключових проблем, цілей і шляхів їхнього вирішення. Це дозволить досягти балансу між ефективністю перевезень і мінімізацією ризиків у транспортній сфері.

Виклад основного матеріалу. Міський пасажирський транспорт є складною соціально-економічною та технічною системою, функціонування якої визначає рівень мобільності населення, ефективність економічної діяльності та якість життя в місті. Сучасні умови урбанізації, зростання щільності населення та інтенсивності транспортних потоків зумовлюють необхідність застосування науково обґрунтованих підходів до управління транспортними системами. Одним із найбільш ефективних інструментів вирішення задач планування та управління міським пасажирським транспортом є методи дослідження операцій, що дозволяють формалізувати процеси функціонування транспортної системи, аналізувати різні варіанти її розвитку та визначати найбільш ефективні управлінські рішення.

Транспортна система міського пасажирського транспорту характеризується складною структурою, яка включає маршрутну мережу, рухомий склад, зупиночні пункти, транспортну інфраструктуру та систему управління перевезеннями. Усі ці елементи взаємодіють між собою та формують єдиний транспортний процес, ефективність якого залежить від узгодженості їх функціонування.

Особливістю транспортної системи є також наявність значної кількості випадкових факторів, таких як нерівномірність пасажиропотоків, вплив дорожньої ситуації, погодні умови та технічний стан транспортних засобів. Це обумовлює необхідність застосування методів, що дозволяють враховувати невизначеність та варіативність параметрів системи. Однією з ключових задач дослідження операцій у транспортних системах є оптимізація маршрутної мережі. Рациональна організація маршрутів дозволяє забезпечити максимальне охоплення території міста транспортним

обслуговуванням при мінімальних витратах ресурсів. При цьому враховуються такі фактори, як розташування житлових районів, місць прикладання праці, навчальних закладів, об'єктів соціальної інфраструктури, а також інтенсивність пасажиропотоків між різними районами міста.

Оптимізація маршрутної мережі сприяє скороченню часу поїздки пасажирів, зменшенню кількості пересадок та підвищенню загальної ефективності транспортної системи. Важливим напрямом застосування дослідження операцій є оптимізація розкладів руху транспортних засобів. Раціонально складений розклад дозволяє забезпечити рівномірний інтервал руху транспортних засобів, зменшити час очікування пасажирів та підвищити надійність транспортного обслуговування. При цьому враховуються нерівномірність пасажиропотоків у різні періоди доби, пропускна здатність транспортної мережі та технічні характеристики рухомого складу.

Оптимізація розкладу руху дозволяє підвищити ефективність використання транспортних засобів та зменшити експлуатаційні витрати. Ще однією важливою задачею є оптимізація використання рухомого складу. Вона полягає у визначенні необхідної кількості транспортних засобів для забезпечення заданого рівня транспортного обслуговування при мінімальних витратах. Недостатня кількість транспортних засобів призводить до перевантаження транспорту та зниження якості обслуговування, тоді як надлишкова кількість спричиняє неефективне використання ресурсів. Застосування методів дослідження операцій дозволяє визначити оптимальний баланс між якістю обслуговування та економічною ефективністю.

Особливе значення має дослідження пасажиропотоків, які є одним з основних факторів, що визначають параметри функціонування транспортної системи. Аналіз пасажиропотоків дозволяє визначити найбільш завантажені ділянки транспортної мережі, оцінити рівень використання транспортних засобів та виявити проблемні зони. На основі отриманих даних можуть прийматися рішення щодо зміни маршрутів, коригування розкладів руху або перерозподілу транспортних засобів.

Для вирішення зазначених задач застосовуються різноманітні методи дослідження операцій, зокрема методи оптимізації, моделювання та аналізу систем. Важливе місце займає моделювання транспортних процесів, яке дозволяє досліджувати поведінку транспортної системи в різних умовах без втручання у її реальне функціонування. Це дає можливість оцінити ефективність різних управлінських рішень, прогнозувати наслідки змін у транспортній системі та обирати найбільш ефективні варіанти її розвитку.

Сучасний розвиток інформаційних технологій значно розширив можливості застосування методів дослідження операцій у транспортних системах. Використання автоматизованих систем збору даних, систем супутникової навігації та інформаційних систем управління транспортом дозволяє отримувати детальну інформацію про функціонування транспортної системи в режимі реального часу. Це створює умови для оперативного управління транспортними процесами, підвищення ефективності використання ресурсів та покращення якості транспортного обслуговування.

Важливим напрямом розвитку є інтеграція методів дослідження операцій з інтелектуальними транспортними системами. Такі системи забезпечують автоматизований аналіз транспортної ситуації, прогнозування пасажиропотоків та підтримку прийняття управлінських рішень. Це дозволяє підвищити адаптивність транспортної системи до змінних умов функціонування та забезпечити більш ефективне використання транспортної інфраструктури.

Застосування методів дослідження операцій у транспортних системах міського пасажирського транспорту має важливе практичне значення. Воно дозволяє підвищити ефективність функціонування транспортної системи, зменшити витрати на її експлуатацію, покращити якість транспортного обслуговування населення та підвищити рівень задоволеності пасажирів. Крім того, оптимізація транспортних процесів сприяє зменшенню негативного впливу транспорту на навколишнє середовище шляхом зниження рівня перевантаження транспортної мережі та більш ефективного використання ресурсів.

Таким чином, дослідження операцій є важливим інструментом підвищення ефективності функціонування транспортних систем міського пасажирського транспорту. Його застосування дозволяє обґрунтовано вирішувати задачі планування, управління та розвитку транспортних систем, забезпечуючи їх ефективність, надійність та відповідність сучасним вимогам міського середовища. У практиці управління міським пасажирським транспортом застосовується широкий спектр методів дослідження операцій, які дозволяють аналізувати, прогнозувати та оптимізувати транспортні процеси без надмірної математичної формалізації. Оптимізаційні методи використовуються для прийняття управлінських рішень щодо формування маршрутної мережі, вибору кількості транспортних засобів та визначення інтервалів руху. Основною метою є досягнення балансу між витратами перевізника та рівнем транспортного обслуговування пасажирів.

Таблиця 1– Основні критерії оптимізації в міському пасажирському транспорті

Критерій оптимізації	Характеристика
Час поїздки	Середній час пересування пасажирів від пункту відправлення до пункту призначення
Інтервал руху	Час між прибуттям транспортних засобів на зупинку
Експлуатаційні витрати	Витрати на паливо, електроенергію, технічне обслуговування
Комфорт пасажирів	Рівень заповнення салону, умови поїздки

Теорія масового обслуговування застосовується для аналізу роботи зупинок громадського транспорту, терміналів та пересадкових вузлів. Вона дозволяє оцінити середній час очікування пасажирів, рівень завантаження транспортних засобів та пропускну спроможність елементів транспортної інфраструктури.

Імітаційне моделювання дає змогу відтворювати роботу транспортної системи в умовах, максимально наближених до реальних. Такі моделі враховують випадкові затримки, зміну пасажиропотоків протягом доби та вплив зовнішніх факторів. Для оцінювання ефективності роботи міського маршруту доцільно використовувати систему показників, що характеризують як інтереси перевізника, так і потреби пасажирів.

Таблиця 2 – Основні показники ефективності роботи маршруту

Показник	Опис
Середній час очікування	Час перебування пасажирів на зупинці
Коефіцієнт заповнення	Відношення фактичної кількості пасажирів до місткості салону
Регулярність руху	Відхилення фактичного графіка від планового
Продуктивність маршруту	Кількість перевезених пасажирів за певний період

Аналіз зазначених показників дозволяє виявити «вузькі місця» в роботі маршруту та обґрунтувати управлінські рішення щодо його вдосконалення. Використання GPS-моніторингу, автоматизованих систем обліку пасажирів та аналітики великих даних дозволяє підвищити точність моделей та забезпечити адаптивне управління транспортними процесами в реальному часі.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що застосування методів дослідження операцій є ефективним інструментом підвищення ефективності функціонування міського пасажирського транспорту. Використання математичних моделей дозволяє формалізувати процеси перевезення пасажирів, врахувати обмеження ресурсів і визначити оптимальні параметри роботи транспортної системи. Було визначено, що оптимізація маршрутної мережі та розкладу руху дозволяє: зменшити час очікування пасажирів; підвищити рівень обслуговування населення; знизити експлуатаційні витрати транспортних підприємств; підвищити ефективність використання рухомого складу; забезпечити більш раціональний розподіл транспортних ресурсів. Методи лінійного програмування, теорії масового обслуговування та імітаційного моделювання дозволяють отримати оптимальні або близькі до оптимальних рішення в умовах складної транспортної системи. Таким чином, застосування дослідження операцій у системах міського пасажирського транспорту є важливим науковим і практичним напрямом, який дозволяє підвищити ефективність управління транспортними процесами, покращити якість перевезень та забезпечити сталий розвиток міської транспортної інфраструктури. Вирішення цієї проблеми дозволить забезпечити раціональне використання транспортних ресурсів, підвищити ефективність управління транспортною системою та покращити рівень транспортного обслуговування населення міста.

Список літератури

1. Хіллер Ф., Ліберман Дж. Вступ до дослідження операцій. Київ : Видавництво НТУ, 2015. 856 с.
2. Цедер А. Планування та експлуатація громадського транспорту. Львів : ЛНУ, 2018. 412 с.
3. Вучик В. Міські транспортні системи та технології. Київ : Транспорт України, 2016. 520 с.
4. Ортузар Х., Віллумсен Л. Моделювання транспортних систем. Харків : ХНАДУ, 2017. 486 с.
5. Про затвердження Державної стратегії розвитку міського електричного транспорту : Постанова Кабінету Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua> [in Ukrainian].
6. Кристочук М. Є., Хітров І. О. Організація пасажирських перевезень у містах. Рівне : НУВГП, 2021. 198 с.
7. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В. Критерії ефективності функціонування транспортних систем. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2018. Вип. 62. С. 12–16.
8. Ceder A. Public Transit Planning and Operation. CRC Press, 2016. 626 p.
9. Ortúzar J., Willumsen L. Modelling Transport. Wiley, 2011. 607 p.
10. Vuchic V. Urban Transit Systems and Technology. Wiley, 2007. 602 p.

References

1. Hillier, F. & Lieberman, G. (2015). Introduction to Operations Research. Kyiv: NTU Publishing House [in Ukrainian].
2. Ceder, A. (2018). Public transport planning and operation. Lviv [in Ukrainian].
3. Vuchic, V. (2016). Urban transport systems and technologies. Kyiv [in Ukrainian].
4. Ortúzar, J. & Willumsen, L. (2017). Modelling transport systems. Kharkiv [in Ukrainian].
5. Cabinet of Ministers of Ukraine. State strategy for the development of urban electric transport. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua> [in Ukrainian].
6. Krystopchuk, M. & Khitrov, I. (2021). Organization of passenger transportation in cities. Rivne [in Ukrainian].
7. Aulin, V., Holub, D. & Hrynkyv, A. (2018). Criteria for transport system efficiency. Scientific Notes. 62, 12–16 [in Ukrainian].
8. Ceder, A. (2016). Public Transit Planning and Operation. CRC Press.
9. Ortúzar, J. & Willumsen, L. (2011). Modelling Transport. Wiley.
10. Vuchic, V. (2007). Urban Transit Systems and Technology. Wiley.

Svetlana Kozak, Assoc. Prof., PhD econ.. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine

Operations Research in Urban Passenger Transport Systems

The article examines the application of operations research methods in urban passenger transport systems. Urban transport systems are considered as complex socio-technical systems characterized by dynamic operation, multicriteria decision-making, and stochastic passenger demand. The main optimization problems arising in the planning and management of passenger transportation are identified, including the design of route networks, timetable development, and allocation of rolling stock. The feasibility of using optimization methods and simulation modeling to improve the efficiency of urban passenger transport operation is substantiated. The role of modern information technologies in enhancing service quality and ensuring rational use of transport resources is analyzed.

operations research, urban passenger transport, transport systems, optimization, modeling, transport management

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 04.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

UDC 656.13:656.073.235:005.334 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).414-423](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).414-423)

Daria Kulova, PhD tech. sci., **Mariia Boyko**, PhD agricul. biotech., **Dmytro Kosyakevych**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: d.coolava@gmail.com

Assessment of Risk Factors and Improvement of Transportation Technology for Temperature-Sensitive Cargo in Refrigerated Containers

The article identifies risk factors associated with the transportation of temperature-sensitive cargo in refrigerated containers within the cold supply chain system using different modes of transport and their interaction, which can be taken into account when organizing intermodal, multimodal, and combined transportation. Based on the identified risk factors, hazardous situations characteristic of road transportation of such cargo are determined. The assessment of their criticality is carried out using the FMEA/FMECA methods. **temperature-sensitive cargo, refrigerated containers, cold chain, cold chain logistics, interaction of transport modes, intermodal, multimodal and combined transportation, risk factors, risk assessment method, hazardous situations, road transportation**

Problem statement. The modern development of global logistics is characterized by a steady growth in the transportation of temperature-sensitive cargo (TSC), which increases the importance of the cold chain (CC) in supply systems.

TSC includes a wide range of products for which the stability of the temperature regime is a key factor in maintaining quality. This category includes food products (meat, fish, seafood, dairy products, vegetables, fruits, and frozen semi-finished products), pharmaceutical products, vaccines, biological materials, certain types of chemical reagents, and cosmetic products. For most such cargo, even a short-term deviation of temperature from the specified limits may lead to the loss of consumer properties or complete spoilage of the products.

According to analytical studies, in 2024 the global cold chain logistics (CCL) market amounted to USD 316.34 billion, and by 2033 its volume may reach USD 1,611 billion, with an average annual growth rate exceeding 20% [1]. Such dynamics are associated with the increasing international transportation of food products, pharmaceutical products, and biological materials that require continuous maintenance of specified temperature conditions.

One of the key elements of the CC is the transportation of TSC in refrigerated containers (RC). At the same time, this segment is characterized by higher costs compared to conventional container transportation. In particular, according to APD Ukraine (2024) [2], the cost of transporting one refrigerated container by road from Ukraine to the Port of Constanța is approximately EUR 1,900, whereas the transportation of grain or oil amounts to about EUR 1,324; for rail transport, the corresponding costs are EUR 1,024 and EUR 768, respectively. The increase in costs is associated with the need to ensure uninterrupted operation of refrigeration equipment, the use of autonomous power supply systems such as Generator Set (GenSet), continuous monitoring of environmental parameters, and the minimization of the risk of cargo spoilage.

The provisions of the National Transport Strategy of Ukraine until 2030 [3] are focused on the development of containerization of cargo flows, multimodal and combined transportation, and the improvement of transport process safety. At the same time, the

document identifies a number of issues that create additional risks, including technological inconsistencies at the interfaces of different transport modes, delays at border crossing points, an insufficient level of digital monitoring, and uneven organization of logistics flows.

Currently, ensuring the integrity of TSC in RC has become a critical factor in transportation efficiency. Even short-term temperature deviations, interruptions in power supply, or delays during transshipment may result in significant economic losses. This necessitates a comprehensive risk assessment of refrigerated container transportation and the development of a set of measures aimed at improving technological processes.

Analysis of recent research and publications. According to DSTU ISO 1496-2:2013 [4] and ISO 1496-2:2018 [5], RC belong to the class of insulated containers characterized by enhanced thermal insulation properties. Unlike passive insulated structures, modern RC are equipped with a refrigeration unit that ensures the maintenance of a specified temperature regime within the range from -25°C to $+25^{\circ}\text{C}$, and in some modifications down to -35°C . RC represent a standardized transport unit [4, 5], which allows transportation without cargo transshipment between different modes of transport. Such structural versatility enables the integration of RC into intermodal, multimodal, and combined transport systems. The standardization of dimensions (20 ft, 40 ft, 40 ft High Cube, 45 ft High Cube) ensures compatibility with road, rail, and maritime transport, as well as with terminal infrastructure.

A specific feature of RC operation is the combination of stationary and autonomous power supply. In ports, terminals, and storage yards, containers are connected to stationary electrical outlets, whereas during road or rail transportation their autonomy is ensured by diesel generator units of the GenSet type in clip-on or underslung configurations.

Currently, the development of the CC is characterized by the active implementation of smart technologies and digital solutions corresponding to the concept of Industry 4.0 [6]. RC are equipped with sensor systems for monitoring temperature, humidity, and vibration, GPS tracking modules, as well as digital technologies for monitoring and managing the CC, including Internet of Things (IoT) and blockchain-based solutions [7, 8], which enable real-time data transmission.

In particular, study [8] investigates the application of IoT technologies for managing the energy consumption of RC at port terminals. Studies [9, 10] examine a cyber-physical approach to the problems of transport systems and technologies. In addition, [8] proposes a cyber-physical system that enables the interaction of containers with power supply systems and energy consumption planning platforms. The proposed mathematical models make it possible to optimize the power supply regimes of RC, taking into account variable electricity prices, environmental parameters, and the specific features of their operation.

Maintaining a stable temperature regime is a key condition for the functioning of the CC. As noted in study [11], temperature monitoring during transportation is necessary to ensure the integrity of TSC and to prevent economic losses.

At the same time, transport systems face a number of risks associated with the human factor in the organization of transportation and the influence of external environmental conditions [12]. Study [13] proposes an approach to risk assessment in the transportation of dangerous goods based on the analysis of potential hazardous situations and the application of the expert evaluation method, which makes it possible to determine the probability of their occurrence and the potential consequences.

Methods for the implementation and improvement of smart technologies in transport, taking into account expert recommendations, are considered an effective tool for improving the quality of the transportation process [14] and cargo operations as its component [15]; however, they require further adaptation to the specific features of CCL. At the same time, it is necessary to consider the design features and technical characteristics of specialized vehicles used for the transportation of TSC, as well as their refrigeration units [16].

Modern research pays considerable attention to the environmental aspects of the CC and the improvement of the energy efficiency of refrigeration equipment, which correspond to the general European trends in the development of environmentally oriented transport systems and are consistent with the integration of the transport system of Ukraine into the European transport space. In particular, study [17] examines modern technical solutions in the transportation of RC aimed at reducing energy consumption and negative environmental impact, as well as the use of passive insulated transport units that allow a partial reduction in the need for active cooling.

In the near future, in the field of TSC transportation, it is advisable to implement the principles of risk management in the organization of the transportation process [18], as well as to consider the development of transport corridors oriented toward consumer needs and their logistics demands [3]. Under these conditions, conducting research aimed at identifying critical risk factors and improving transportation processes for TSC, particularly in RC, becomes relevant, as they have significant economic potential in CCL [19, 20].

The aim of the study is to assess hazardous situations and risk factors arising during the transportation of temperature-sensitive cargo in refrigerated containers by road transport and to develop recommendations for improving transportation technology within the cold chain supply system.

To achieve this aim, the following tasks are addressed in the study:

- to classify risk factors associated with the transportation of temperature-sensitive cargo in refrigerated containers by different modes of transport and in their interaction;
- to identify hazardous situations corresponding to the risk factors in the transportation of temperature-sensitive cargo in refrigerated containers by road transport;
- to assess the criticality of hazardous situations in the transportation process of refrigerated containers based on the FMEA (FMECA) method and expert evaluation;
- to develop recommendations for risk reduction and improvement of the technology for transporting temperature-sensitive cargo.

Presentation of the main material. The technology of RC transportation has a multi-stage nature and differs significantly from the transportation of standard containers. The first stage is the Pre-trip Inspection (PTI), which includes diagnostics of the refrigeration unit, verification of tightness, assessment of the condition of thermal insulation, calibration of sensors, and verification of the correct setting of the temperature regime.

Before loading, pre-cooling of the container is carried out to stabilize the internal microclimate and prevent temperature shock. The loading process requires strict compliance with the temperature compatibility of the cargo and proper organization of air circulation inside the container.

A critical stage of the technological process is the transshipment of the container between different modes of transport, as it is at this moment that operating conditions and power supply sources change. Even a short-term disconnection from the power supply under unfavorable climatic conditions may lead to fluctuations in internal temperature parameters. Temporary storage is carried out at specialized sites (reefer racks) equipped with power supply systems and technical monitoring facilities. At the same time, during periods of transshipment and waiting, the process becomes more dependent on organizational factors and compliance with established procedures.

The final stage is unloading and recording the actual temperature parameters, after which the container is either sent for re-inspection or introduced into a new transportation cycle.

The complexity and multi-component nature of this process determine the presence of factors that affect the stability of its functioning. Considering their origin, the risks can be divided into three main categories: human-related risk factors (HRF), technical and technological risk factors (TTRF), and natural and climatic risk factors (NCRF).

Risk factors of the transportation process may be classified according to various criteria, in particular by the stages of the transportation process or by the nature of their impact on the functioning of the transport system. However, for the purposes of this study, their systematization according to the origin of risks is considered appropriate, as it allows the main sources of risk occurrence to be clearly identified.

The identified groups of factors reflect the main directions of potential deviations in the process of transporting refrigerated containers (RC). Their specific manifestations depend on the mode of transport and operating conditions. Typical examples of possible incidents in different modes of transport are summarized in Table 1.

Table 1 – Examples of hazardous situations in the transportation of refrigerated containers by different modes of transport and their interaction

Mode of transport	Risk factors	Hazardous situation	Consequences
Maritime transport	HRE	Dropping of the container from the spreader during vessel unloading at the port	– complete or partial loss of TSC; – damage to the RC; – damage to the berth or adjacent containers.
	TTRF	Failure of the vessel's electrical power system during the voyage	– complete or partial loss of TSC; – costs for repair of the electrical power system.
	NCRF	Strong storm leading to the container falling overboard	– complete loss of TSC; – damage to RC; – costs associated with raising the container from the water.
Rail transport	HRE	The container was not connected to the power supply at the terminal or during train formation	– partial or complete loss of TSC.
	TTRF	Refrigerant leakage in the refrigeration unit	– complete or partial loss of TSC; – repair of the refrigeration unit.
	NCRF	Short circuit in the electrical system due to water ingress	– complete or partial loss of TSC; – damage to the unit; – delays in train traffic and increased logistics costs.
Road transport	HRE	Unauthorized access to the container during parking	– loss of TSC; – possible damage to RC; – penalties for the carrier.
	TTRF	Shutdown or malfunction of the GenSet during transportation	– partial or complete loss of TSC; – costs for generator repair.
	NCRF	A tree falling onto the container due to weather conditions	– complete or partial loss of TSC; – damage to RC; – risks to the driver's health.
Interaction of transport modes	HRE	Violation of technological procedures during transshipment and changes in container operating conditions	– partial or complete loss of TSC; – increase in idle time; – penalties and additional logistics costs.
	TTRF	Interruption of power supply during the transition between transportation segments	– partial or complete loss of TSC; – damage to the refrigeration unit; – delays in transportation and increased costs.
	NCRF	Exposure to open environmental conditions during waiting for transshipment	– partial or complete loss of TSC; – damage to RC or electrical equipment; – delays in subsequent transportation.

Source: developed by the authors

The road transport component of CCL is characterized by increased sensitivity to external influences, as it operates mainly outside controlled terminal infrastructure. The operating conditions of RC in this segment are determined by the variability of the road environment, climatic factors, and the stability of autonomous power supply, which creates an additional level of operational uncertainty. In intermodal, multimodal, and combined transportation systems, road transport usually integrates the container into the logistics chain at the initial and final stages of transportation. It is at these stages that direct contact with the consignor and consignee occurs, which increases the importance of the road segment for ensuring the integrity of TSC and the stability of the entire transportation process.

Taking into account the previous systematization of risk factors (Table 1) makes it possible to form an extended list of hazardous situations characteristic specifically of road transport and to proceed to their assessment using the selected methodology. A generalized list of such hazardous situations is presented in Table 2.

Table 2 – Main hazardous situations in the road transportation of refrigerated containers

Hazardous situations Risk factor group	Risk factor group
Violation of the temperature regime due to power supply failures during idle periods	TTRF
Failure of the refrigeration unit or GenSet during transportation	TTRF
Personnel errors when setting temperature or ventilation parameters	HRF
Violation of loading technology causing blockage of air circulation channels	HRF
Mechanical damage to RC during maneuvering or transshipment between different modes of transport	HRF/TTRF
Unauthorized interference during parking (intrusion by unauthorized persons, attempts to open the container)	TTRF/NCRF
Damage to RC due to adverse weather conditions (strong wind, precipitation, hail)	NCRF

Source: developed by the authors

One of the methods for risk assessment described in [21] is Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), as well as its extended modification – Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA). These methods are widely used for the study of technical and organizational-technological processes, which makes them suitable for risk assessment during road transportation of refrigerated containers (RC).

The application of FMEA makes it possible to:

- systematize potential failures (hazardous situations) of refrigeration equipment, power supply systems, and container components;
- take into account the influence of the human factor;
- determine the priority of hazardous situations.

The quantitative determination of the criticality of a hazardous situation is carried out using the Risk Priority Number (RPN), which is defined as:

$$RPN = S \cdot O \cdot D, \quad (1)$$

where S (Severity) – the severity rating of the consequences of a failure for the integrity of the cargo and the technical condition of the RC; O (Occurrence) – the rating of the probability of occurrence of the corresponding type of failure; D (Detection) – the rating of the ability to detect a deviation before the occurrence of its critical consequences.

The D indicator is ranked in reverse order: the more difficult it is to detect a deviation, the higher the score assigned.

In order to increase the objectivity of the assessment of the parameters S, O, and D, the expert evaluation method was applied. A group of specialists in the field of road

transportation organization and RC operation was involved in the assessment. Each expert was asked to rank the identified hazardous situations according to the three FMEA components using a ten-point scale.

The calculation of the average values of the parameters for each hazardous situation is determined as follows:

$$\bar{S}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ij}, \quad (2)$$

where $i = 1, 2, \dots, n$ – the number of the hazardous situation; $j = 1, 2, \dots, m$ – the number of the expert; S_{ij} – the severity rating of the consequences of the i -th hazardous situation assigned by the j -th expert.

Similarly, the average values of the parameters of the probability of occurrence O_{ij} and detectability D_{ij} are determined as follows:

$$\bar{O}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m O_{ij}, \quad (3)$$

where O_{ij} – the probability of occurrence rating of the i -th hazardous situation assigned by the j -th expert.

$$\bar{D}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m D_{ij}, \quad (4)$$

where D_{ij} – the detectability rating of the i -th hazardous situation assigned by the j -th expert.

The obtained average ratings were used to determine the RPN:

$$RPN_i = \bar{S}_i \cdot \bar{O}_i \cdot \bar{D}_i. \quad (5)$$

Thus, the RPN_i indicator reflects the integral assessment of the criticality of the i -th hazardous situation, taking into account the severity of its consequences, the probability of occurrence, and the difficulty of detection under the conditions of the road transport segment of CCL.

The hazardous situations were ranked in descending order of the RPN_i value (Table 3), which makes it possible to identify the most critical stages of the transportation process and to establish priorities for the implementation of preventive measures.

Table 3 – Ranking-based assessment of main hazardous situations in the road transportation of refrigerated containers

Hazardous situations	S	O	D	RPN
Failure of the refrigeration unit or GenSet during transportation	8	8	6	384
Violation of the temperature regime due to power supply failures during idle periods	9	8	4	288
Personnel errors when setting temperature or ventilation parameters	7	5	7	245
Mechanical damage to RC during maneuvering or transshipment between different modes of transport	9	6	4	216
Violation of loading technology causing blockage of air circulation channels	5	4	8	160
Unauthorized interference during parking (intrusion by unauthorized persons, attempts to open the container)	6	5	5	150
Damage to RC due to adverse weather conditions (strong wind, precipitation, hail)	7	7	3	147

Source: developed by the authors

Overall, the assessment results demonstrate that the greatest risk is associated with situations directly related to violations of the temperature regime, regardless of their root cause – technical, organizational, or related to the human factor. In this regard, it is advisable to develop and implement a set of organizational and technical measures aimed at minimizing these risks.

To reduce the risk of refrigeration equipment failure, it is advisable to carry out regular maintenance and diagnostics of the units before the start of transportation. The use of remote monitoring systems for refrigeration equipment operation is also important, as it allows deviations in its functioning to be detected promptly. An additional measure is the use of backup power sources or the possibility of connecting the container to alternative power supply systems.

Minimizing violations of the temperature regime caused by failures in power supply during idle periods requires ensuring continuous power supply for RC during stops, in particular through the use of stationary power supply points at terminals or backup generators. It is also advisable to implement automated temperature control systems with real-time data transmission.

Reducing the risk of personnel errors can be achieved through the implementation of standardized procedures for configuring container operating parameters, the use of automated systems for input and verification of parameters, as well as regular training and instruction of personnel.

To prevent mechanical damage to RC during maneuvering or transshipment between different modes of transport, it is necessary to ensure compliance with the technology of cargo handling operations, the use of certified handling equipment, and regular technical inspection of containers. An important measure is also the improvement of the qualifications of operators performing cargo operations.

Minimizing the risk of violations in loading technology that may lead to blockage of air circulation channels requires compliance with established cargo placement schemes within the container that ensure free circulation of cold air. In addition, the use of instructions and visual loading schemes for personnel is advisable.

To prevent such situations as unauthorized interference during stops (intrusion by unauthorized persons or attempts to open the container), it is necessary to apply physical and electronic security measures, including container sealing, the use of electronic seals, video surveillance systems, and GPS monitoring. It is also important to ensure access control at terminal areas and parking sites.

Reducing the impact of weather-related factors can be achieved through the selection of safe locations for container parking, the use of protective structures at terminals, and consideration of weather forecasts during transportation planning.

The implementation of the proposed measures will contribute to ensuring the integrity of TSC, reducing economic losses, and improving the efficiency of transport process organization during the transportation of RC.

Conclusions: 1. The specific features of the organization of temperature-sensitive cargo transportation in refrigerated containers within the cold chain supply system were identified. It was established that the stability of the temperature regime is a key factor in ensuring cargo integrity and the efficient functioning of cold chain logistics.

2. A classification of risk factors arising during the transportation of refrigerated containers by different modes of transport and in their interaction was carried out. Three main groups of factors were identified: human, technical and technological, and natural and climatic, which made it possible to systematize the main hazardous situations of the transportation process.

3. A list of hazardous situations characteristic of the road transportation of refrigerated containers was identified. Their criticality was assessed on the basis of the methods of Failure Mode and Effects Analysis and Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMEA/FMECA) using expert evaluation of the parameters of severity of consequences,

probability of occurrence, and the possibility of timely detection of deviations. Based on expert ranking, the corresponding indicator ratings were determined and the Risk Priority Number (RPN) was calculated, which made it possible to rank hazardous situations according to their level of criticality and to identify priority directions for the implementation of preventive measures.

4. Based on the results of the assessment, a set of organizational and technical recommendations aimed at reducing risks during the transportation of refrigerated containers was developed. These include the implementation of remote monitoring systems for temperature parameters, ensuring uninterrupted power supply for refrigeration equipment, improvement of loading procedures, and strengthening control over cargo handling operations. The implementation of the proposed measures will contribute to improving the reliability of the functioning of cold chain logistics and ensuring the integrity of temperature-sensitive cargo.

Список літератури

1. Grand View Research. Cold Chain Market Size, Share & Trends Analysis Report By Temperature Type, By Refrigerated Mode, By End Use, By Region, And Segment Forecasts, 2025–2033. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cold-chain-market> (дата звернення: 15.02.2025).
2. Shapoval, B. Comparison of logistics costs for food exports from Ukraine, Slovakia, Poland and Romania to third countries / German-Ukrainian Agricultural Policy Dialogue (APD). Kyiv, 2025. 19 p. URL: https://www.apd-ukraine.de/fileadmin/user_upload/APD_Schapowal_ENG_SP_fin_Version2.pdf?utm_source (дата звернення 15.02.2025).
3. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. URL: https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_Strategy_2030.pdf (дата звернення 15.02.2025).
4. ДСТУ ISO 1496-2:2013. Вантажні контейнери серії 1. Технічні вимоги та методи випробування. Частина 2. Ізотермічні контейнери (ISO 1496-2:2008, IDT). Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 25 с.
5. ISO 1496-2:2018. Series 1 freight containers. Specification and testing. Part 2: Thermal containers. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 31 с.
6. Головатий А.О., Чумак В.М., Манько Є.В., Аулін В.В., Кульова Д.О. Вдосконалення математичного моделювання машинобудівних технологій для смарт-підприємств в системі машинного зору. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 11(42), Ч.2. С. 143-159. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159)
7. Chen S., Yan J., Tan B., Liu X., Li Y. Processes and challenges for the adoption of blockchain technology in food supply chains: a thematic analysis. Conference paper. iConference. 2019. P 1-3.
8. Tang G., Zhao Z., Schulte F., Iris Ç. Smart charging with demand response and energy peak shaving for reefer containers with Internet-of-Things. *International Journal of Production Research*. 2025. Vol. 63, № 20. P. 7460–7485. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2499868>
9. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Кіберфізичний підхід при створенні, функціонуванні та удосконаленні транспортно-виробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.331-343. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343)
10. Т. М. Надич, В. В. Аулін, А. В. Гриньків, В. В. Слонь. Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42). Ч. 2. С. 298-312. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327)
11. Raab V, Petersen B, Kreyenschmidt J. Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*. Vol. 113 Issue 10. P. 1267–1289. DOI: <https://doi.org/10.1108/00070701111177683>
12. Lavrukhin O., Kovalov A., Schevchenko V., Kyman A., Kulova D. Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 3 (98). P. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163442>
13. Аулін В.В., Кульова Д.О., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч.ІІ, С. 205-213. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.205-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213)
14. Кульова Д.О., Магопєць С.О., Лівіцький О.М. Безпека дорожнього руху в Україні: оцінювання ризиків і перспективи цифровізації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч.ІІ. С. 298-312. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.278-285](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.278-285)
15. Аулін В.В., Кульова Д.О., Варваров В.В. Виявлення, аналіз і прогнозування параметрів ризику

- безвідмовного навантаження готової продукції на транспортно-логістичному терміналі підприємства. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч.І. С. 263-271. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.263-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.263-271).
16. Myroniuk O., Paslavskyi P., Sukach O., & Shevchuk B. Assessment of refrigerator vehicles suitability for the transportation of perishable goods. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, Vol. 28, P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.202>
 17. Neittaanmäki, P., Akimov, K., Akimova, V., Tuovinen, R. Challenges and Current Solutions of Refrigerated Transportation. *Advanced Computational Methods and Design for Greener Aviation. Computational Methods in Applied Sciences*. 2024. Vol 59. P. 241-256. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61109-4_16
 18. Кульова Д.О. Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на транспорті. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч.І. С. 261-269. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.261-269](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269)
 19. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Головатий А.О., Голуб Д.В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем / монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 503 с.
 20. Аулін В. В., Митник М. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Цьонь О. П., Лисенко С. В., Гудь В. З., Гриньків А. В., Голуб Д. В., Бабій М. В. Формування та функціонування логістичних центрів в регіональних транспортно-логістичних системах України: монографія за заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В. В., д.т.н., проф. Ляшука О. Л. – Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2024. – 393 с.
 21. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT), Мінекономрозвитку України. Київ, 2015. 73 с.

References

1. Grand View Research. (2025). *Cold chain market size, share & trends analysis report by temperature type, by refrigerated mode, by end use, by region, and segment forecasts, 2025–2033*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cold-chain-market> [in English].
2. Shapoval, B. (2025). *Comparison of logistics costs for food exports from Ukraine, Slovakia, Poland and Romania to third countries*. German-Ukrainian Agricultural Policy Dialogue (APD). https://www.apd-ukraine.de/fileadmin/user_upload/APD_Schapowal_ENG_SP_fin_Version2.pdf [in Ukrainian].
3. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2018). *National transport strategy of Ukraine until 2030*. https://publications.chamber.ua/2017/Infrastructure/UDD/National_Transport_Strategy_2030.pdf [in Ukrainian].
4. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. (2014). *DSTU ISO 1496-2:2013. Series 1 freight containers. Specification and testing. Part 2: Thermal containers (ISO 1496-2:2008, IDT)*. Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian].
5. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 1496-2:2018. Series 1 freight containers. Specification and testing. Part 2: Thermal containers*. Geneva, Switzerland. [in English].
6. Holovaty, A. O., Chumak, V. M., Manko, Ye. V., Aulin, V. V., & Kulova, D. O. (2025). Vdoskonalennia matematychnoho modeliuвання mashynobudivnykh tekhnolohii dlia smart-pidpriemstv v systemi mashynnoho zoru. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part 2, 143–159. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.143-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159) [in Ukrainian].
7. Chen, S., Yan, J., Tan, B., Liu, X., & Li, Y. (2019). Processes and challenges for the adoption of blockchain technology in food supply chains: A thematic analysis. *iConference*. 1–3. [in English].
8. Tang, G., Zhao, Z., Schulte, F., & Iris, C. (2025). Smart charging with demand response and energy peak shaving for reefer containers with Internet-of-Things. *International Journal of Production Research*, 63(20), 7460–7485. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2499868> [in English].
9. Aulin, V. V., Hryniv, A. V., & Holovaty, A. O. (2020). Kiberfizychnyi pidkhyd pry stvorenni, funktsionuvanni ta udoskonalenni transportno-vyrobnychykh system. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 3(34), 331–343. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343) [in Ukrainian].
10. Nadych, T. M., Aulin, V. V., Hryniv, A. V., & Slon, V. V. (2025). Metody i zakhody udoskonalennia systemy tekhnichnoho servisu vantazhnykh avtomobiliv na osnovi kiberfizychnoho pidkhydu i rozrobky naukovo-tekhnichnoi dokumentatsii yoho operatsii. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part 2, 298–312. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.313-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.313-327) [in Ukrainian].
11. Raab, V., Petersen, B., & Kreyenschmidt, J. (2011). Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*, 113(10), 1267–1289. <https://doi.org/10.1108/00070701111177683> [in English].
12. Lavrukhin, O., Kovalov, A., Shevchenko, V., Kyman, A., & Kulova, D. (2019). Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163442> [in English].
13. Aulin, V. V., Kulova, D. O., Hryniv, A. V., & Lysenko, S. V. (2024). Otsiniuvannya ryzykiv neskhoronnykh perevezhen naftoproduktiv avtomobilnym transportom. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41), Part 2, 205–213. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.205-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213) [in Ukrainian].

14. Kulova, D. O., Mahopets, S. O., & Livitskyi, O. M. (2025). Bezpeka dorozhnogo rukhu v Ukraini: otsiniuvannia ryzykiv i perspektyvy tsyfrovizatsii. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part 2, 298–312. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.278-285](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.278-285) [in Ukrainian].
15. Aulin, V. V., Kulova, D. O., & Varvarov, V. V. (2025). Vyiavlennia, analiz i prohnouzuvannia parametriv ryzyku bezvidmovnogo navantazhennia hotovoi produktsii na transportno-lohistychnomu terminali pidpriemstva. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part 1, 263–271. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.263-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.263-271) [in Ukrainian].
16. Myroniuk O., Paslavskyi P., Sukach O., & Shevchuk B. (2024). Assessment of refrigerator vehicles suitability for the transportation of perishable goods. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, (28), 202–208. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.202> [in Ukrainian].
17. Neittaanmäki, P., Akimov, K., Akimova, V., & Tuovinen, R. (2024). Challenges and current solutions of refrigerated transportation. In *Advanced computational methods and design for greener aviation* (Computational Methods in Applied Sciences, Vol. 59, pp. 241–256). https://doi.org/10.1007/978-3-031-61109-4_16 [in English].
18. Kulova, D. O. (2024). Zastosuvannia kontseptualnogo pidkhodu ryzyk-menedzhmentu v sferi bezpeky rukhu na transporti. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41), Part 1, 261–269. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.261-269](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269) [in Ukrainian].
19. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., Holovaty, A. O., & Holub, D. V. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychyykh system* (V. V. Aulin, Ed.). Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V. F. [in Ukrainian].
20. Aulin, V. V., Mytnyk, M. M., Liashuk, O. L., Hevko, I. B., Tson, O. P., Lysenko, S. V., Hud, V. Z., Hrynkiv, A. V., Holub, D. V., & Babii, M. V. (2024). *Formuvannia ta funktsionuvannia lohistychnyykh tsentriv v rehionalnykh transportno-lohistychnyykh systemakh Ukrainy* (V. V. Aulin & O. L. Liashuk, Eds.). Ternopil: FOP Palanytsia V. A. [in Ukrainian].
21. DSTU IEC/ISO 31010:2013. (2015). Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku (IEC/ISO 31010:2009, IDT) [Risk management – Risk assessment techniques (IEC/ISO 31010:2009, IDT)]. Minekonomrozwytku Ukrainy. Kyiv - Ministry of Economic Development of Ukraine. Kyiv. 73 p. [in Ukrainian].

Д.О. Кульова, д-р філос., М.В. Бойко, канд. с.-г. наук, Д.П. Косякевич

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Оцінювання факторів ризику та удосконалення технології перевезення температурно чутливих вантажів у рефрижераторних контейнерах

Анотація. У статті розглянуто питання оцінювання небезпечних ситуацій та факторів ризику під час перевезення температурно чутливих вантажів у рефрижераторних контейнерах автомобільним транспортом, а також розроблення рекомендацій щодо удосконалення технології перевезення у системі холодового ланцюга постачання.

Визначено фактори ризику перевезення температурно чутливих вантажів у рефрижераторних контейнерах у системі холодового ланцюга постачання різними видами транспорту та при їх взаємодії, що може бути враховано під час організації інтермодальних, мультимодальних і комбінованих перевезень. Проведено класифікацію факторів ризику за характером їх походження та виділено три основні групи: людські, техніко-технологічні та природно-кліматичні. На основі виділених факторів визначено перелік небезпечних ситуацій, характерних для автомобільного транспортування рефрижераторних контейнерів. Оцінювання їх критичності виконано із застосуванням методів аналізу видів і наслідків відмов та їх критичності (FMEA/FMECA) із використанням експертного оцінювання параметрів тяжкості наслідків, імовірності виникнення та можливості своєчасного виявлення відхилень. На основі експертного ранжування розраховано пріоритетне число ризику (RPN), що дозволило здійснити упорядкування небезпечних ситуацій за рівнем їх критичності.

За результатами дослідження розроблено комплекс організаційних та технічних рекомендацій, спрямованих на зниження ризиків під час перевезення рефрижераторних контейнерів. Зокрема, запропоновано впровадження систем дистанційного моніторингу температурних параметрів, забезпечення безперервного енергоживлення холодильного обладнання, удосконалення процедур завантаження та підвищення контролю за технологією вантажних операцій. Реалізація запропонованих заходів сприятиме підвищенню надійності функціонування cold chain logistics та забезпеченню схоронності температурно чутливих вантажів.

температурно чутливі вантажі, рефрижераторні контейнери, логістика холодового ланцюга, взаємодія видів транспорту, інтермодальні, мультимодальні та комбіновані перевезення, фактори ризику, метод оцінювання ризику, небезпечні ситуації, автомобільні перевезення

Одержано (Received) 06.03.2026

Прорецензовано (Reviewed) 10.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

Ю.І. Мельнікова

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна
e-mail: Melnikova.yu.i@ntu.one*

Аналіз впливу параметрів на ефективність застосування генетичного алгоритму при вирішенні задачі синхронізації руху громадського транспорту

Стаття присвячена дослідженню функціональних особливостей генетичного алгоритму (ГА) як інструменту вирішення задачі синхронізації руху громадського транспорту.

Синхронізація руху є складною комбінаторною оптимізаційною задачею, що характеризується випадковими параметрами попиту на послуги громадського транспорту і великим розміром системи транспортної мережі. Тому для вирішення даної задачі найчастіше використовується генетичний алгоритм. Незважаючи на значний потенціал використання генетичного алгоритму для синхронізації графіків руху, досягнення оптимальних показників ефективності прямо залежить від обґрунтованого визначення параметрів ГА. Метою дослідження є підвищення ефективності застосування генетичного алгоритму для вирішення задачі синхронізації руху в пересадочному вузлі шляхом налаштування параметрів ГА.

В якості об'єкту дослідження було обрано наступні параметри генетичного алгоритму: розмір популяції, ймовірність кросинговеру, ймовірність мутації і кількість спроб мутацій.

На основі проведених досліджень представлено результати аналізу чутливості середнього часу очікування пасажирів до параметрів ГА, які дозволили прийти до висновку, що на якість синхронізації впливає розмір популяції та ймовірність кросинговеру, а ймовірність мутації і кількість спроб мутацій не мають статистично значущого впливу на результати роботи генетичного алгоритму в межах даного дослідження.

громадський транспорт, управління автомобільними перевезеннями, синхронізація розкладів руху, генетичний алгоритм, параметри ГА

Постановка проблеми. Для вирішення задачі типу синхронізації руху громадського транспорту базові інструменти оптимізації недоцільно застосовувати через великі масиви даних, які носять стохастичний характер. Для розв'язання поставленої задачі пріоритетними є евристичні та метаевристичні підходи, серед яких особливе місце посідає генетичний алгоритм як ефективний інструмент глобального пошуку. Популярність застосування ГА при вирішенні NP-складних задач практиками і науковцями доводить його ефективність, надійність і гнучкість. Попри доведену ефективність застосування генетичних алгоритмів у задачах синхронізації руху, результативність їх імплементації залежить від обґрунтованого вибору їх параметрів.

До параметрів, що можуть впливати на якість рішення поставленої задачі, відносяться розмір популяції, швидкість кросинговеру, швидкість мутації та інші. Некоректне параметричне налаштування генетичного алгоритму призводить до деградації пошукових можливостей ГА, вираженої у передчасній конвергенції або значному зростанні часових витрат на обчислення. Це, у свою чергу, зменшує практичну ефективність використання ГА для синхронізації розкладів руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування ГА при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху набуло популярності серед науковців [1-12]. Можна виділити два підходи:

- однокритеріальний [1-3], при якому метою вирішення задачі є мінімізація часу очікування пасажирів або загальних витрат.

- багатокритеріальний [4,5] підхід передбачає вирішення задачі з орієнтацією на мінімізацію незручностей для пасажирів і підвищення ефективності використання транспортних засобів або роботи транспортної мережі.

Більшість науковців визнають переваги ГА [6,7] за якістю отриманих рішень, однак автори [8] зазначили, що ГА вимагає значно більше часу на обчислення ніж Gray Wolf Optimizer.

Масштабність застосування та доведена дієвість ГА зумовлюють необхідність підвищення продуктивності даного методу. Ефективність евристичного методу та якісні показники отриманих результатів перебувають у прямій залежності від вибору параметрів алгоритму. Незважаючи на широку апробацію ГА, досліджень, що присвячені визначенню ролі параметрів при застосуванні ГА досить мало [11, 12]. Отже, проблема вибору евристичних параметрів для специфічних умов синхронізації розкладів громадського транспорту залишається недостатньо дослідженою і потребує детального вивчення.

Дане дослідження фокусується на аналізі недостатньо висвітленої в науковій літературі ролі обґрунтування параметрів ГА у процесі синхронізації графіків руху пасажирського транспорту.

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є підвищення ефективності застосування генетичного алгоритму для вирішення задачі синхронізації руху в пересадочному вузлі шляхом налаштування параметрів ГА.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Виявити наявність статистично значущого впливу між параметрами ГА (розмір популяції, ймовірність кросинговеру, ймовірність мутації і кількість спроб мутацій) і кінцевим результатом евристики (середнього часу очікування пасажирів);

2. Визначити характер впливу обраних параметрів ГА на ефективність його застосування в межах даного дослідження.

Виклад основного матеріалу. Основні етапи ГА включають оцінку поточних рішень за допомогою функції придатності, що застосовується до кожного індивіда популяції, відбір найбільш придатних індивідів для розмноження та сам процес розмноження, що включає оператори кросинговеру та мутації. Кожний етап ГА має параметри, які впливають на продуктивність його застосування. Наприклад, зростання такого параметру як розмір популяції підвищує ймовірність знаходження значення наближеного до оптимального, проте значно збільшує час обчислення на кожне покоління. Необхідно відмітити, що процес визначення параметрів ГА потребує індивідуального підходу в залежності від області і специфіки проблеми.

Для проведення експериментальних досліджень ГА застосовувався для розв'язання задачі синхронізації розкладів руху в пересадочному вузлі «Автовокзал» міста Верхньодніпровськ, що входить до складу Кам'янського району Дніпропетровської області. Він відіграє ключову роль у транспортній мережі міста через вигідну локацію, виконуючи роль початкового та кінцевого пункту всіх діючих п'яти маршрутів. Пересадочний вузол «Автовокзал» виступає головним хабом для перерозподілу пасажиропотоку між внутрішньоміськими та приміськими рейсами [13].

Вирішення проблеми синхронізації розкладу руху громадського транспорту у межах генетичного алгоритму здійснюється шляхом визначення часових зсувів початку обслуговування на кожному маршруті (ψ). Ці зсуви кодуються у вигляді вектору, що стає генетичним фундаментом для формування популяції потенційних рішень.

За допомогою імітаційного моделювання проводиться розрахунок фітнес-функції для оцінки якості сформованих розкладів. Головним критерієм оптимізації є мінімізація загального часу очікування пасажирів ($T^{(w)}$) у пересадочному вузлі.

Результати експериментальних досліджень представлені в роботі [13]. Застосування генетичного алгоритму дозволило отримати наступний вектор часових зсувів $\psi = \{22, 17, 9, 18, 11\}$, що призвело до скорочення загального часу очікування на 333 хвилини у ранкову годину пік. В цьому випадку реалізація генетичного алгоритму здійснювалась з наступними параметрами: кількість поколінь – 30; розмір популяції – 100; розмір хромосоми – 35 біт (по 7 біт на кожний маршрут); ймовірність кросинговеру – 0,5; кількість мутацій – 3; ймовірність мутації – 0,1; коефіцієнт виживання – 0,2.

На процес визначення параметрів ГА при синхронізації руху впливає специфіка досліджуваної області (загальна кількість маршрутів громадського транспорту в мережі, максимальний інтервал руху і т. д.).

Для аналізу ефективності синхронізації руху з використанням ГА нами було обрано наступні параметри ГА:

- розмір популяції (S_p). Даний параметр визначає розмір охоплення простору рішень і впливає на обчислювальні витрати;
- ймовірність кросинговеру (p_c), яка впливає на інтенсивність обміну успішними фрагментами розкладів між батьківськими особинами;
- ймовірність мутації (p_m);
- кількість спроб мутацій на одну хромосому (t_m).

Останні два параметри визначають ефективність дослідження простору пошуку та ландшафту функції пристосованості.

Основним критерієм оцінки в побудованих моделях обрано середній час очікування пасажирів $T^{(w)}$. Даний показник дозволяє наочно відстежувати динаміку генетичного алгоритму: мінімізація цієї змінної свідчить про знаходження ефективних комбінацій часових зсувів. Для проведення детального аналізу було сформовано три типи лінійних моделей, кожна з яких фокусується на окремих аспектах еволюційного пошуку:

$$T^{(w)} = \beta_0 + \beta_s \cdot S_p, \quad (1)$$

$$T^{(w)} = \beta_0 + \beta_c \cdot p_c, \quad (2)$$

$$T^{(w)} = \beta_0 + \beta_m \cdot p_m + \beta_t \cdot t_m, \quad (3)$$

де β_0 – коефіцієнт регресійної моделі, що встановлює базову лінію для прогнозованого середнього часу очікування, від якої потім додаються або віднімаються ефекти параметрів ГА; β_s , β_c , β_m , β_t – коефіцієнти регресії, які кількісно визначають питомий вплив розміру популяції, ймовірності кросинговеру, ймовірності мутації та кількості поворотів мутації на хромосому відповідно на результати оптимізації.

Вільний член β_0 у наведених моделях фіксує базовий рівень середнього часу очікування, що є точкою відліку для аналізу. Регресійні коефіцієнти β_s , β_c , β_m , β_t дають змогу кількісно оцінити вплив кожного параметра: напрямок зміни часу очікування (за знаком) та ступінь вразливості системи до операторів алгоритму (за модулем). Такий підхід дозволяє перейти від емпіричного налаштування ГА до науково обґрунтованого проектування оптимальної пошукової стратегії для конкретної мережі громадського транспорту.

Для систематичної оцінки впливу параметрів ГА на ефективність застосування алгоритму в експериментальних дослідженнях, проведених в рамках даної наукової роботи, прийнято межі та розміри кроків для кожного з цих параметрів, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Границі варіювання параметрів ГА при проведенні експериментальних досліджень

Параметр евристики	Нижня границя	Верхня границя	Крок зміни значень
Розмір популяції	20	200	20
Ймовірність кросинговеру	0,1	1,0	0,1
Ймовірність мутації	0,05	0,5	0,05
Кількість мутацій	1	10	1

Джерело: розроблено автором

Для оцінки достовірності впливу кожного параметра генетичного алгоритму на ефективність синхронізації розкладів використовується аналіз довірчих інтервалів отриманих коефіцієнтів регресії. У межах даного дослідження встановлено стандартний для наукових розрахунків поріг значущості на рівні 5%. Ключовим критерієм значущості є відсутність нуля в межах розрахованого довірчого інтервалу для конкретного коефіцієнта β_0 . Якщо інтервал не перетинає нульову позначку, це свідчить про наявність стійкого причинно-наслідкового зв'язку між налаштуванням алгоритму та кінцевим результатом. Такий статистичний висновок дозволяє з високим ступенем впевненості стверджувати, що варіація відповідного параметра ГА спричиняє прогнозовані та відтворювані зміни в ефективності оптимізації.

Застосування інструментарію статистичного аналізу та лінійної регресії дозволило отримати кількісні оцінки впливу розміру популяції, ймовірності кросинговеру та специфічних операторів мутації на середній час очікування пасажирів.

Результати експерименту представлені на рис. 1, де відображено емпіричну залежність середнього часу очікування пасажирів від розміру популяції. Побудовані лінії трендів на рисунку демонструють виражений негативний нахил, що є підтвердженням від'ємної кореляції між розміром популяції та значенням цільової функції. Таким чином, збільшення кількості особин в алгоритмі забезпечує покращення результатів синхронізації.

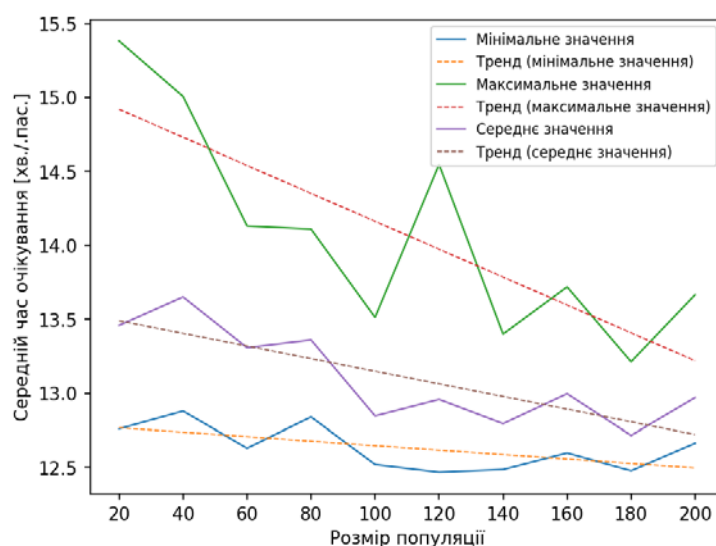


Рисунок 1– Залежність середнього часу очікування від розміру популяції для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Джерело: розроблено автором

Найменше значення часу очікування демонструє тенденцію до стабілізації на рівні близько 12,5-12,7 хв./пас. при досягненні популяцією розміру понад 100 одиниць, що вказує на поступове наближення алгоритму до оптимальних рішень. Водночас максимальні значення характеризуються суттєвою стохастичною мінливістю, проте їхній загальний тренд спрямований донизу, що свідчить про зростання здатності алгоритму уникати найменш ефективних рішень за умови залучення більшої кількості особин. Лінія середніх значень виступає інтегральним показником загальної продуктивності генетичного алгоритму, демонструючи покращення якості оптимізації розкладу зі зростанням S_p .

Об'єктивність візуальних спостережень, зафіксованих на рис. 1, повністю узгоджується з даними регресійного аналізу, наведеними у таблиці 2. Для всіх трьох рівнів $T^{(w)}$ розрахований коефіцієнт регресії β_s має від'ємне значення, що підтверджує факт зниження часу очікування при збільшенні розміру популяції. Відсутність нуля в межах усіх зазначених довірчих інтервалів дозволяє стверджувати, що вплив розміру популяції на результати синхронізації є статистично значущим і прогнозованим для даної транспортної моделі.

Таблиця 2 – Вплив розміру популяції на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень вартостей $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_s	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	-0,0015	(-0,0026; -0,0004)	Так
Найбільший	-0,0094	(-0,0153; -0,0036)	Так
Середній	-0,0043	(-0,0067; -0,0018)	Так

Джерело: розроблено автором

Результати емпіричного аналізу, наведені на рис. 2, розкривають характер впливу ймовірності кросинговеру (p_c), на середній час очікування пасажирів $T^{(w)}$. Візуалізована залежність демонструє тренд до скорочення часових витрат пасажирів із зростанням інтенсивності оператора кросинговеру, що найбільш виражено для мінімальних та середніх значень цільової функції. Зокрема, при максимальній ймовірності кросинговеру показник стабілізується на відмітці нижче 12,5 хв. на особу. Отже, інтенсифікація обміну генетичним матеріалом сприяє ефективнішому виявленню оптимальних графіків руху. Проте велика амплітуда коливань максимальних значень вказує на обмежений вплив даного параметра на початкові невдалі ітерації алгоритму.

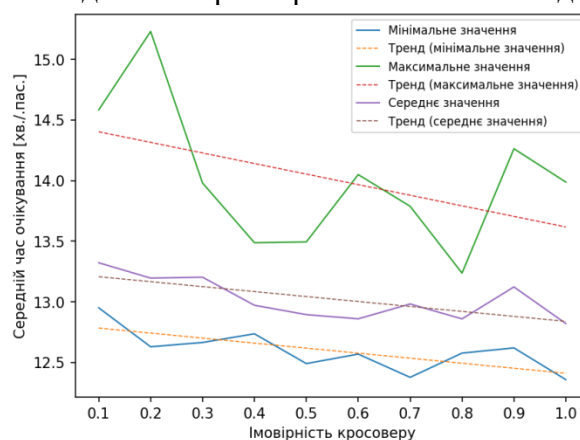


Рисунок 2 – Залежність середнього часу очікування від ймовірності кросинговеру для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Джерело: розроблено автором

Таблиця 3 – Вплив ймовірності кросинговеру на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень вартостей $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_c	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	-0,415	(-0,738; -0,091)	Так
Найбільший	-0,872	(-2,293; 0,548)	Ні
Середній	-0,409	(-0,748; -0,070)	Так

Джерело: розроблено автором

Статистичні дані, наведені у таблиці 4, повністю підтверджують візуальні спостереження (рис. 3) щодо низької значущості ймовірності мутації. Ключовим моментом є те, що довірчі інтервали для всіх трьох представлених рівнів вартості $T^{(w)}$ охоплюють нульове значення. Наявність нуля в межах довірчих інтервалів підтверджує, що в межах проведеного експерименту ймовірність мутації не має статистично значущого впливу на жоден із рівнів вартостей середнього часу очікування. Це дозволяє стверджувати, що для розглянутої задачі синхронізації у пересадочному вузлі коригування частоти мутацій не є дієвим інструментом підвищення операційної ефективності ГА.

Таблиця 4 – Вплив ймовірності мутації на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень вартостей $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_m	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	0,0026	(-0,0071; 0,0124)	Ні
Найбільший	-0,0252	(-0,0771; 0,0267)	Ні
Середній	-0,0065	(-0,0199; 0,0069)	Ні

Джерело: розроблено автором

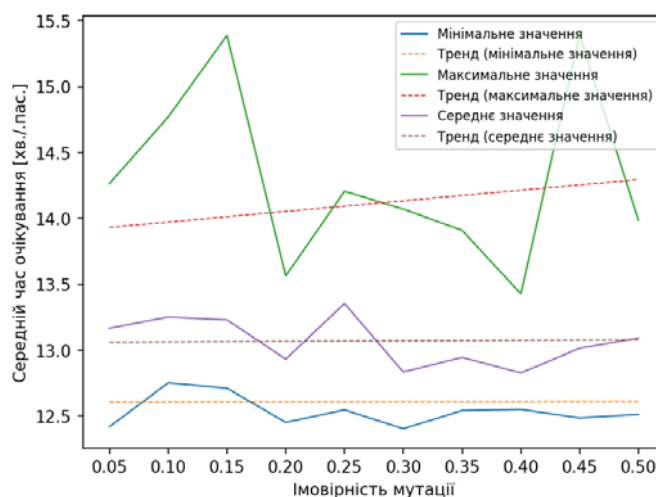


Рисунок 3 – Залежність середнього часу очікування від ймовірності мутації для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Джерело: розроблено автором

Графічна інтерпретація результатів дослідження на рис. 4 демонструє відносно стабільну динаміку всіх показників середнього часу очікування при зміні параметра t_m у діапазоні від 1 до 10. Лінії трендів для всіх рівнів мають майже горизонтальний

характер, що вказує на відсутність вираженої лінійної залежності між кількістю спроб мутацій та результативністю пошуку оптимального розкладу.

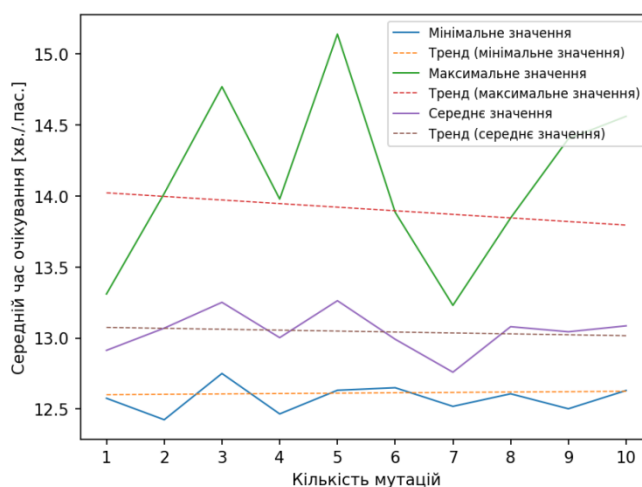


Рисунок 4 – Залежність середнього часу очікування від кількості мутацій для процедури синхронізації в пересадочному вузлі

Джерело: розроблено автором

На основі результатів дослідження, які представлені у таблиці 5, можна зробити висновок, що всі рівні довірчих інтервалів охоплюють нуль. Отже, статистично значущий вплив кількості спроб мутацій на результати роботи генетичного алгоритму відсутній в межах даного дослідження.

Таблиця 5 – Вплив кількості мутацій на ефективність ГА при синхронізації в пересадочному вузлі

Рівень вартостей $T^{(w)}$	Коефіцієнт регресії β_i	Довірчий інтервал	Значимість параметра
Найменший	0,0077	(-0,1873; 0,2027)	Ні
Найбільший	0,8052	(-0,2330; 1,8435)	Ні
Середній	0,0420	(-0,2266; 0,3106)	Ні

Джерело: розроблено автором

Отже, здійснений аналіз дозволяє зробити висновок про доцільність встановлення високих значень розміру популяції і ймовірності кросинговеру для підвищення загальної операційної ефективності генетичного алгоритму. Таке налаштування забезпечує стабільніше досягнення цілей оптимізації та дозволяє суттєво знизити очікувані витрати часу пасажирів у пересадочному вузлі. Однак інтенсифікація оператора мутації через збільшення кількості спроб на кожну хромосому і ймовірності мутації не є критичним фактором для досягнення цілей мінімізації часу очікування пасажирів.

Висновки. В результаті здійснених досліджень були отримані наступні висновки:

1. Встановлено наявність статистично значущого позитивного впливу розміру популяції та ймовірності кросинговеру на якість синхронізації розкладів руху і відсутність статистично значущого впливу ймовірності мутації і кількості спроб мутацій на результати роботи генетичного алгоритму в межах даного дослідження.

2. Зростання значень розміру популяції і ймовірності кросинговеру забезпечує підвищення загальної операційної ефективності генетичного алгоритму при вирішенні задачі синхронізації розкладів руху громадського транспорту.

Отримані висновки даного дослідження можуть стати орієнтиром для науковців і практиків, які воліють ефективно використовувати ГА для вирішення задачі синхронізації руху.

Для підвищення застосовності отриманих результатів роботи подальші дослідження повинні бути присвячені тестуванню запропонованої процедури ГА та перевірці виявлених закономірностей параметрів у різних мережах громадського транспорту.

Список літератури

1. Wu J., Liu M., Sun H., Li T., Gao Z., Wang D. Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. № 51. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>
2. Tuzun A., Yılmaz, S. Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*. 2014. № 37(5). <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>
3. Naumov V., Samchuk G. Class library for simulations of passenger transfer nodes as elements of the public transport system. *Procedia Engineering*. 2017. № 187, p. 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>
4. Ataiean S., Solimanpur M., Amiripour S., Shankar R. Synchronized timetables for bus rapid transit networks in small and large cities. *Scientia Iranica*. 2021. № 28(1), p. 477-491. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.51501.2220>
5. Naeini H., Shafahi Y., Taherkhani M. Optimizing and synchronizing timetable in an urban subway network with stop-skip strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022. №22. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100301>
6. Kang L., Wu J., Sun H., Zhu X., Wang B. A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks. *Omega*. 2015. № 50. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.07.005>
7. Cao Z., Ceder A., Li D., Zhang S. Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2019. p. 231-249. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
8. Wang Y., Li D., Cao Z. Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>
9. Chen Y., Mao B., Bai Y., Ho T., Li Z. Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. № 99(2), p. 110-129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
10. Kapica D., Melnikova Y., Naumov V. Synchronization in public transportation: A review of challenges and techniques. *Future Transportation*. 2025. №5(1), p. 6. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010006>
11. Бугаєва І. Г. Аналіз параметрів генетичного алгоритму розв'язання двовимірної задачі упаковки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. № 2(2). С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.6>
12. Y. Pyrih, M. Klymash, Y. Pyrih, O. Lavriv. Genetic algorithm as a tool for solving optimisation problems/ Information and communication technologies, electronic engineering. 2023. Vol. 3, no. 2. P. 95–107. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictet2023.02.095>
13. Синхронізація розкладів руху міського громадського транспорту у пересадочному вузлі з використанням генетичних алгоритмів/ Ю. І. Мельнікова та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2 (23). С. 180–187. DOI: 10.36910/automash.v2i23.1540

References

1. Wu, J., Liu, M., Sun, H., Li, T., Gao, Z., & Wang, D. (2015). Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.11.001>
2. Tuzun, A., & Yılmaz, S. (2014). Transit coordination with heterogeneous headways. *Transportation Planning and Technology*, 37(5). <https://doi.org/10.1080/03081060.2014.912419>
3. Naumov, V., & Samchuk, G. (2017). Class library for simulations of passenger transfer nodes as elements of the public transport system. *Procedia Engineering*, 187, 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>

4. Ataeian, S., Solimanpur, M., Amiripour, S., & Shankar, R. (2021). Synchronized timetables for bus rapid transit networks in small and large cities. *Scientia Iranica*, 28(1), 477-491. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.51501.2220>
5. Naeini, H., Shafahi, Y., & Taherkhani, M. (2022). Optimizing and synchronizing timetable in an urban subway network with stop-skip strategy. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100301>
6. Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X., & Wang, B. (2015). A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks. *Omega*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.07.005>
7. Cao, Z., Ceder, A., Li, D., & Zhang, S. (2019). Optimal synchronization and coordination of actual passenger-rail timetables. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 231-249. <https://doi.org/10.1080/15472450.2018.1488132>
8. Wang, Y., Li, D., & Cao, Z. (2020). Integrated timetable synchronization optimization with capacity constraint under time-dependent demand for a rail transit network. *Computers & Industrial Engineering*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106374>
9. Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T., & Li, Z. (2019). Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99(2), 110-129. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.003>
10. Kapica, D., Melnikova, Y., & Naumov, V. (2025). Synchronization in public transportation: A review of challenges and techniques. *Future Transportation*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010006>
11. Buhaieva, I. H. (2025). Analysis of genetic algorithm parameters for solving the two-dimensional packing problem. *Herald of Kherson National Technical University*, 2(2), 49–55. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.6>
12. Pyrih, Y., Klymash, M., Pyrih, Y., & Lavriv, O. (2023). Genetic algorithm as a tool for solving optimisation problems. *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, 3(2), 95–107. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2023.02.095>
13. Melnikova, Yu. I., Naumov, V. S., Taran, I. O., & Bovin, D. P. (2024). Synchronization of urban public transport schedules in a transfer hub using genetic algorithms. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, (2), 180–187. DOI: 10.36910/automash.v2i23.1540

Yuliia Melnikova

*Kharkiv National Automobile and Highway University, Senior Lecturer of Transport Management Department
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

Analysis the Impact of Parameters on the Effectiveness genetic Algorithm Application in Solving Synchronizing Public Transport Schedules

The research is devoted to the study of the genetic algorithm's (GA) functional features as a tool for solving the synchronizing public transport schedules problem.

Timetable synchronization is a complex combinatorial optimization problem characterized by random parameters of public transport demand and the large size of the transport network system. Therefore, heuristic and metaheuristic methods are most often used to solve this problem, one of which is a genetic algorithm. Despite the significant potential of using a genetic algorithm for synchronizing traffic schedules, achieving optimal performance indicators directly depends on the reasonable determination of GA parameters. The use of suboptimal parameters can lead to an unreasonable increase in computation time and premature convergence, which reduces the practical usefulness of synchronizing public transport schedules based on a genetic algorithm.

The purpose of the study is to improving the effectiveness of the genetic algorithm for solving the problem of traffic synchronization at transfer node by GA parameters settings.

The following GAs parameters were selected as the object of study: population size, crossover rate, mutation rate, and selection mechanisms. The analysis of the impact of GA parameters on the quality of the schedule was carried out using a simulation model. The Avtovakzal transfer node in the city of Verkhnodniprovsk, Dnipropetrovsk region, Ukraine, was used to apply the simulation model.

The results research of the analysis the sensitivity of the average passenger waiting time to GA parameters are presented. It was concluded that the quality of synchronizing schedules is influenced by the population size and crossover probability, while the mutation probability and number of mutation attempts do not have a statistically significant impact on the results of the genetic algorithm within the scope of this study.

public transport, transport management, synchronizing public transport schedules, genetic algorithm, GA parameters

Одержано (Received) 26.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 23.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

Д. О. Музильов, доц., канд. техн. наук, Є. О. Уколов

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: murza_1@ukr.net

Модель оцінки питомих витрат доставки агропродукції до порту відправлення

Обґрунтовано підхід до оцінювання ефективності доставки агропродукції до порту. Актуальність дослідження зумовлена нестабільністю експортних ланцюгів у воєнний період та зростанням тривалості знаходження автотранспорту у чергах біля портових терміналів. Запропоновано детерміновану модель питомих витрат і тривалості рейсу з виділенням «вузького місця» - очікування в порту. На вибірці натурних спостережень виконано регресійне уточнення та оцінено чутливість параметрів.

автомобільні перевезення, сільськогосподарська продукція, порт відправлення, черга, питомі витрати

Постановка проблеми. Надійність логістики постачання зернових та іншої агропродукції є питанням економічної стійкості держави [1]. Наразі відбулася вимушена перебудова експортних маршрутів, зросла залежність від сухопутних коридорів і транзитних вузлів та портових терміналів, що працюють за умов пропускних обмежень та підвищених ризиків [2, 3]. На ланці «під'їзні шляхи - термінал» нерівномірність прибуття автомобілів створює черги поблизу зернового портового терміналу, яка збільшує загальний час оборту, спричиняючи непродуктивні простої та підвищуючи питомі витрати доставки агропродукції до порту відправлення. Отже, управлінські рішення, які стосуються визначення часових вікон заїзду на територію порту, узгодження навантаження тощо, повинні враховувати одночасно вплив на час і вартість доставки експортної агропродукції. Це зумовлює потребу у простому інструменті, який буде дозволяти визначати на операційному рівні вплив випадкових величин: швидкості доставки, V , часу навантаження автомобіля, $T_{нав}$, і тривалості черги біля порту, $T_{чер}$, на показники ефективності доставки агропродукції до порту відправлення та обирати раціональні сценарії організації процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання стійкості та переформатування ланцюгів постачання в умовах «воєнних шоків» дуже часто розглядаються в аналітичних матеріалах і наукових статтях, де показано зміщення експортних потоків до сухопутних коридорів і зростання ролі прикордонної та портової інфраструктури [1-3]. У паралельному напрямі розвиваються моделі оптимізації схем перевезень із урахуванням порушень та екологічних і витратних критеріїв, зокрема для контейнеризованих потоків зерна [4]. Проте значна частина втрат ефективності логістики формується на «останній милі» до зернового терміналу у порті відправлення, де домінують проблеми пов'язанні із виникненням черг, неритмічність прибуття автотранспорту та технологічні простої, які у логістичних мережових задачах часто агрегуються або враховуються спрощено.

Наразі, для вирішення проблем операційного рівня пропонуються математичні моделі транспортного планування, які можуть враховувати прибутковість і втрати зерна, однак зазвичай працюють з агрегованими часовими параметрами обслуговування [5]. Для українського ринку перевезень агропродукції перспективними є стохастичні мережі Петрі, що відтворюють синхронізацію ресурсів у логістиці зерна та дозволяють оцінювати ефект від зміни режимів обслуговування і кількості

транспортних засобів [6]. Складнощі логістики біля терміналів вирішуються сучасними системами підвищення рівня сервісу та керування чергою (часові вікна заїзду, визначення пріоритетності заїзду на територію порту, цифрова ідентифікація автотранспорту та вантажу) [7]. Економічні оцінки ефекту від оптимізації перевезень підкреслюють, що непродуктивний простій і неритмічність прибуття є одними з ключових джерел втрат рентабельності у перевізника [8]. У більшості поточних публікацій не представлено або поверхнево описано компактний математичний інструментарій, який напряду міг би пов'язувати керовані операційні параметри (V , $T_{нав}$, $T_{чер}$) з питомими витратами і тривалістю доставки агропродукції до порту відправлення. Окремий блок робіт присвячено технологічним втратам зерна під час транспортування та перевантаження. В цьому випадку додаткові затримки і вібраційні впливи від стану дорожнього покриття можуть збільшувати частку втрат і погіршувати якість продукції [9]. Іншою проблемою зернової інфраструктури є збільшення рівня цифровізації та оптимізації технологічних операцій, оскільки техніко-технологічні обмеження та зношеність обладнання збільшують тривалість транспортних циклів і тим самим непрямо збільшують ймовірність формування черги із вантажівок біля портової зони [10, 11]. Навіть у довоєнних оцінках підкреслювалась критична роль портової складової в експорті зерна, що робить оптимізацію підвезення до терміналів практично значущою [12]. З огляду на це, в даній роботі обрано підхід, який поєднує спрощений детерміновано-стохастичний опис процесу доставки з плануванням експерименту і регресійним аналізом. Така комбінація забезпечує просту та зрозумілу інтерпретацію отриманих залежностей та оцінку чутливості без необхідності щоразу будувати детальну імітаційну модель, зберігаючи достатню точність для оперативних рішень.

Постановка завдання. Мета роботи - розроблення та апробація підходу до інтегральної оцінки питомих витрат і тривалості автомобільної доставки агропродукції до порту відправлення з урахуванням портової черги та аналізу чутливості факторів. В контексті роботи формалізовано процес доставки, сформовано план факторного експерименту, побудовано та перевірено регресійну модель для визначення питомих витрат та виконано локальний аналіз чутливості моделі.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконано для типового ланцюга постачання агропродукції «виробник - автомобільне перевезення - морський порт». Сформовано вибірку натурних спостережень $N=120$ щодо швидкості руху V , тривалості навантаження, $T_{нав}$, та очікування в черзі, $T_{чер}$, а також зафіксовано відстань перевезення, D . Структуру показників і контекст їхньої актуальності наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Передумови актуальності задачі доставки агропродукції до порту

Показник	Значення	Інтерпретація для логістики
Частка агросектору у ВВП України (2021)	близько 11%	Суттєвий макроекономічний ефект від логістичних збоїв
Частка агропродукції у експорті України (2021)	близько 40%	Логістика визначає валютну виручку та ціни виробника
Втрати від зниження цін через експортні обмеження (станом на лютий 2024)	24,1 млрд дол. США	Логістичні витрати обумовлюють зниження доходів фермерів
Перевалка у морських портах України (2024)	97,2 млн т	Портові вузли залишаються критичною ланкою експорту
Експорт агропродукції через Solidarity Lanes з травня 2022	близько 96 млн т	Альтернативні маршрути не усувають вузькі місця «last mile»

Джерело: узагальнено авторами на підставі [13-16]

Характер розподілу вантажообігу за видами транспорту можна прослідкувати за узагальненими даними за 2023 рік (табл. 2). При цьому, автомобільний транспорт забезпечує близько третини вантажообігу у тонно-кілометрах, а в припортових ланцюгах фактично виконує роль головного підвізного плеча [17].

Таблиця 2 – Вантажообіг в Україні за видами транспорту у 2023 р.

Вид транспорту	Вантажообіг, млрд ткм	Частка, %
Залізничний	90,6	50,4
Автомобільний	55,5	30,9
Морський	0,4	0,2
Річковий	0,7	0,4
Усього	179,8	100,0

Джерело: узагальнено авторами за даними Державної служби статистики України [17]

Аналітика маршрутів і витрат експорту зернових для України показує, що вибір конфігурації ланцюга «елеватор – транспорт – порт» впливає на сукупні витрати та час, а також на ризики затримок у вузлах [18]. Для в дослідженні це означає, що «структура транспортного забезпечення» повинна бути описана через функції кожного елемента та через ті параметри, що формують витрати і час саме на підході до порту. Тому доцільно систематизувати елементи структури транспортного забезпечення із прив'язкою до операцій, ресурсних обмежень і джерел втрат часу та витрат (табл. 3).

Таблиця 3 – Елементи структури транспортного забезпечення при доставці агропродукції до порту відправлення

Елемент ланцюга постачань	Основні ресурси і обмеження	Типові джерела втрат часу
Виробник (ферма)	Продуктивність навантажувачів, готовність техніки, графік відвантаження	Очікування техніки, неузгодженість готовності партії
Елеватор, пункт зберігання	Місткість, черга на ваговій, лабораторія	Черга на приймання, лабораторні затримки
Перевізник (автотранспорт, залізниця)	Обмеження дороги, недосконалість графіку, доступність ТЗ, режим праці	Затори, очікування на сервісних точках
Портові ворота	Кількість смуг, швидкість контролю, правила пропуску	Черга на в'їзді, повторний контроль
Зерновий термінал	Продуктивність ліній, місткість складу, суднове «вікно»	Черга на приймання, затримки аналізу, очікування навантаження

Джерело: узагальнено авторами на підставі [18]

Процес доставки до порту розглянуто як послідовність трьох етапів: рух автомобіля до порту ($\frac{D}{V}$), навантаження і оформлення на терміналі ($T_{нав}$) та очікування у черзі перед заїздом ($T_{чер}$). Сумарна тривалість доставки визначається виразом:

$$T_{заг} = T_{рух} + T_{нав} + T_{чер} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $T_{рух}$ – час на рух вантажівки до порту відправлення, год. При цьому $T_{рух} = \frac{D}{V}$;

$T_{нав}$ – загальний час навантаження на елеваторі відправника та агропідприємстві, год.;

$T_{черг}$ – портова складова витрат часу у системі доставки сільськогосподарської продукції (очікування черги у припортовій зоні), год.

Саме тому у подальших перетвореннях і при побудові регресійних моделей природно з'являється складова виду $D \cdot \frac{1}{V}$ або безпосередньо $\frac{1}{V}$ як фактор, що лінійно впливає на тривалість руху.

Для можливості подальшого порівняння сценаріїв організації доставки вводиться розклад сумарного часу за частками:

$$\omega_{рух} = \frac{T_{рух}}{T_{заг}}, \quad (2)$$

$$\omega_{нав} = \frac{T_{нав}}{T_{заг}}, \quad (3)$$

$$\omega_{чер} = \frac{T_{чер}}{T_{заг}}. \quad (4)$$

У практичній інтерпретації модель підвищення ефективності націлена насамперед на зменшення $\omega_{чер}$, оскільки ця складова найбільш «організаційно чутлива» (тайм-слоти, попередні дані, дисципліна прибуття).

Для практичного використання модель доповнюється умовами щодо обмеження за строками:

$$T_{заг} \leq T_{норм}, \quad (5)$$

$$T_{приб} \leq T_{cutoff}, \quad (6)$$

де $T_{норм}$ - нормативний час на подолання певного маршруту до порту, год.;

$T_{приб}$ - час прибуття на портовий термінал, год.;

T_{cutoff} - час руху на маршруті перевезення із затримками, год.

Цільову функцію сформовано як суму складових питомих витрат рейсу, приведених до 1 т вантажу:

$$ПВ = \frac{C_{рух} + C_{нав} + C_{чер} + C_{fix}}{Q} \rightarrow \min, \quad (7)$$

де $ПВ$ - питомі витрати, грн/т; Q - розмір партії відправки сільськогосподарських вантажів до порту, т; $C_{рух}$ - витрати на рух (транспортну роботу) до порту, грн; $C_{нав}$ - витрати на навантаження-розвантаження, грн; $C_{чер}$ - витрати від простою (очікування у черзі) у припортовій зоні, грн; C_{fix} - умовно фіксовані витрати рейсу (документи, диспетчеризація, супутні платежі), грн.

Запропонована модель дозволяє кількісно оцінити ефективність доставки агропродукції до порту відправлення та обґрунтувати організаційні рішення (зокрема тайм-слоти та попередню підготовку документації) через мінімізацію питомих витрат на 1 т вантажу.

Для ідентифікації впливу керованих параметрів використано повнофакторний експеримент 2^3 за факторами: швидкість руху V (км/год), час навантаження та оформлення $T_{нав}$ (год) і час очікування у черзі $T_{чер}$ (год). Для перевірки лінійності та оцінювання відтворюваності додано повтори у центральній точці ($V=52,5$ км/год; $T_{нав}=2,5$ год; $T_{чер}=3,0$ год), що сформувало 12 серій. Дистанцію, D , у кейсі фіксовано на

рівні 500 км (типовий міжміський підвіз до порту), а вплив D на витрати враховано через детермінований лінійний компонент моделі.

Діапазони факторів визначено за результатами аналізу емпіричної вибірки $N=120$ спостережень доставки. Для швидкості руху отримано середнє значення 52,5 км/год і стандартне відхилення 4,0 км/год; для компонент часу: $T_{рух} = 9,54 \pm 0,72$ год, $T_{нав} = 2,68 \pm 1,05$ год, $T_{чер} = 3,31 \pm 1,12$ год. Перевірка гіпотези про нормальність (критерій Шапіро-Уїлка) не виявила істотних відхилень ($p=0,953$; $0,151$; $0,060$ відповідно), що дозволило використовувати ці параметри для формування реалістичних інтервалів змін факторів у плані експерименту.

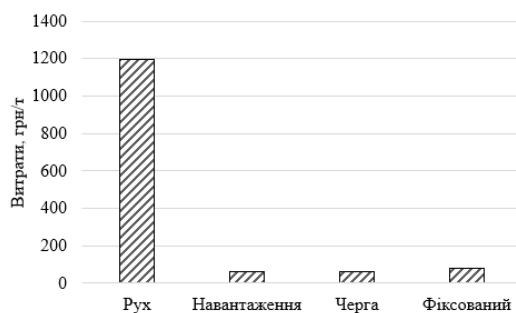
Для проведення експерименту за детерміністично-стохастичним підходом, у моделі наявні чотири фактори D , V , $T_{нав}$, $T_{чер}$ (керовано-обліковані параметри), однак у рамках конкретного експерименту дистанцію D зафіксовано на базовому рівні, що відповідає умовам розглянутого маршруту до порту (у даному випадку $D=500$ км). Така фіксація дозволяє «очистити» вплив організаційно-часових компонентів (швидкість, навантаження, черга) і не змішувати його з ефектом вибору маршруту в цілому або певного плеча перевезення. При цьому D залишається фактором моделі (входить у розрахунок), але не є фактором варіювання в серіях цього плану. Цей підхід узгоджується з тим, що у моделі може бути більше параметрів, ніж керовано варійованих факторів експерименту.

Щоб одночасно перевірити стабільність розрахунків, отримати оцінку «чистої» похибки (розсіювання) та мати можливість контролю наявності нелінійності у зоні середніх значень факторів, до базових 8 серій додано 4 повтори в центральній точці (усі фактори на середніх рівнях). У підсумку маємо:

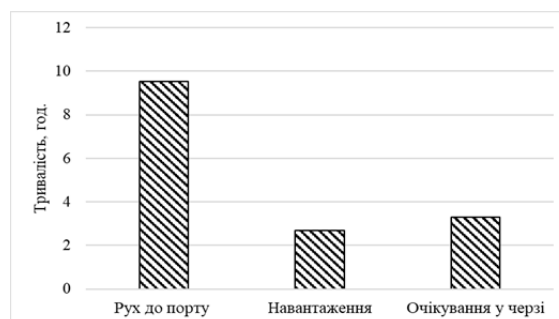
$$N = 8 + 4 = 12 \text{ серій.} \quad (8)$$

Отже, 12 серій – це не «усічення» чи «скорочення» без обґрунтованої логіки, а раціональна схема проведення експерименту типу 2^3+4 , в якому присутні центральні точки за умови фіксованої відстані D , яка відповідає прикладній постановці задачі підвищення ефективності саме за рахунок управління операційними часом та режимом руху. Плану експерименту виконано для розміру партії $Q=20$ т.

Результати експерименту показали, що у структурі питомих витрат домінує компонент руху, тоді як витрати на навантаження та чергу мають менший абсолютний, але суттєву питому вагу. Середні значення компонентів наведено на рисунку 1а. Аналогічно, структура часу доставки характеризується тим, що частка часу руху є найбільшою, але за умов пікових періодів саме $T_{чер}$ може бути визначальним для перевищення нормативних строків. Середні значення тривалості етапів за польовими спостереженнями наведено на рисунку 1б.



а)



б)

Рисунок 1 – Результати визначення: а) питомих витрат доставки, грн/т; б) часу доставки, год
Джерело: розроблено авторами

Для практичної інтерпретації сформовано три типові сценарії: базовий (серія 5), оптимізований за рахунок мінімізації черги (серія 10) та піковий сезонний (серія 7). Порівняння питомих витрат і загальної тривалості показано на рисунку 2

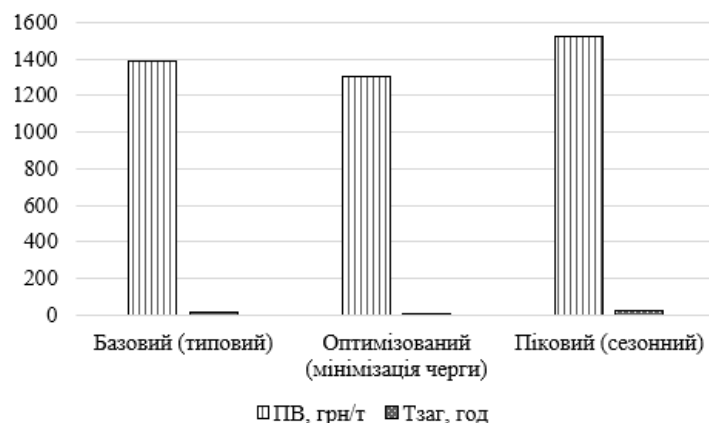


Рисунок 2 – Порівняння сценаріїв організації доставки до порту: вплив організації процесів на час і витрати

Джерело: розроблено авторами

Питомі витрати доставки, PB визначалися як сума складових витрат руху, навантаження та очікування у черзі з подальшим нормуванням і зважуванням. Для перевірки адекватності регресійної моделі виконано оцінювання параметрів методом найменших квадратів, аналіз значущості коефіцієнтів (t-критерій) та порівняння лінійної і нелінійної моделей (табл. 5), а чутливість факторів оцінено локальною еластичністю при зміні параметрів на +10% від базового режиму. За сукупністю показників точності для подальших розрахунків прийнято лінійну форму. Для отримання швидкого інструменту оцінювання застосовано регресійне моделювання, де як залежну змінну розглянуто питомі витрати PB , а як змінні - D , V , $T_{нав}$ і $T_{чер}$. Порівняння якості альтернативних моделей (лінійна, логарифмована, ступенева) наведено в таблиці 4. За сукупністю показників точності для подальших розрахунків прийнято лінійну форму

Таблиця 4 – Порівняння якості регресійних моделей для PB

Модель	R^2	SE	$MAPE$, грн/т	R^2 прогнозне
Лінійна	0.95	0.15	41.75	0.82
Логарифмована	0.87	0.39	102.15	0.63
Ступенева	0.95	0.16	43.84	0.81

Джерело: розроблено авторами

Отримане рівняння лінійної регресійної моделі має вигляд:

$$PB = 626,745 + 0,096D - 8,361V + 28,765T_{нав} + 20,473T_{чер} . \quad (9)$$

Для інтерпретації управлінських ефектів виконано аналіз чутливості моделі. Локальна чутливість S_x визначається як відносна зміна PB при відносному невеликій зміні фактору x :

$$S_x = \frac{PB(x \cdot 1,1) - PB(x)}{PB(x)} \cdot 100\%, \quad (10)$$

де $PB(x)$ – значення питомих витрат, отримане за регресійною моделлю (9), а всі інші фактори під час зміни x фіксуються на базових значеннях.

Результати локальної чутливості для збурення +10% наведено на рисунку 3.

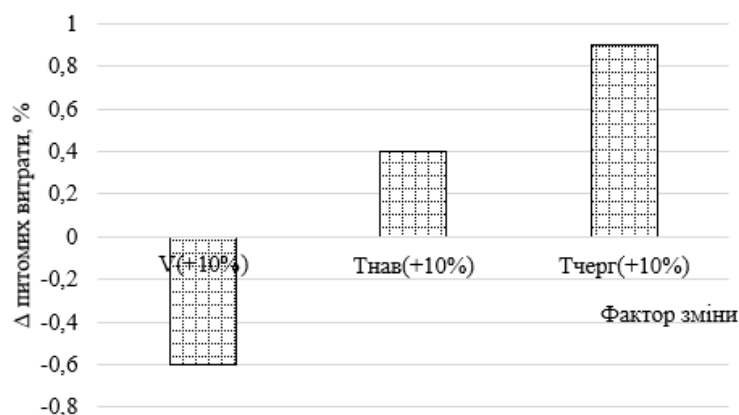


Рисунок 3 – Порівняння сценаріїв організації доставки до порту

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати показують, що головним операційним важелем підвищення ефективності є управління чергою (часові вікна, узгодження прибуття тощо), адже навіть помірне зростання $T_{чер}$ суттєво підвищує питомі витрати, а запропонована лінійна регресійна модель доповнює мережеву оптимізацію як швидкий інструмент попереднього відбору сценаріїв підвезення агропродукції до портових терміналів.

Висновки. Виконане дослідження підтвердило, що для експортної агрологістики в умовах високої варіативності операційних параметрів вирішальними стають не лише тариф і відстань, а й можливість управляти часовими параметрами процесу доставки на ланці «під'їзд до порту - термінал». Саме на вищевказаному ланцюзі виникають черги та непродуктивні простоя, які формують значну частку додаткових витрат і призводять до розбалансування графіків розвантаження.

Методика базується на декомпозиції витрат і часу доставки, факторному експерименті та регресійному моделюванні для швидкого порівняння сценаріїв. Для маршруту із відстанню $D=500$ км діапазон питомих витрат становив 1307-1519 грн/т, а тривалість доставки - 10,3-20,6 год залежно від інтенсивності черги та швидкості. Отримана лінійна регресійна модель дозволяє кількісно оцінювати внесок кожного фактору. Результати перевірки точкової чутливості побудованої регресії продемонстрували що зростання часу очікування в черзі $T_{чер}$ на 10% підвищує $ПВ$ приблизно на 0,9%, тоді як $T_{нав}$ - на 0,4%, а підвищення V на 10% зменшує $ПВ$ приблизно на 0,6%.

Отримані результати обґрунтовують пріоритетність організаційних рішень для зменшення черг у припортовій зоні, оскільки саме ці заходи найшвидше знижують непродуктивні простоя й забезпечують стабілізацію часу доставки. Запропонована методика може використовуватися логістичними операторами та вантажовласниками як інструмент оперативного ранжування альтернативних сценаріїв «маршрут - порт - організація процесів» за витратами та часом. Подальші дослідження доцільно спрямувати на деталізацію механізмів формування черги (імітаційна модель) та калібрування параметрів на розширеній базі рейсів для різних портів і сезонів.

Список літератури

1. Wageningen University & Research. Food Supply Chains in Ukraine: Measurement of Resilience of the Supply Chains. Supply chain schemes. 2023 : веб-сайт. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/D_III_WUR_Schemes_v2.pdf (дата звернення: 07.11.2025).
2. Yanovska V., Krol M., Pittman R. Wartime reconfiguration of Ukraine's grain export logistics: Priority areas. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2025. Vol. 30. 101363. DOI:10.1016/j.trip.2025.101363.
3. Sadłowski A., Brdulak J., Budzyńska A. The transport of ukrainian grain through poland and the domestic grain market. *Humanities and Social Sciences quarterly*. 2023. Vol. 30, no. 2. P. 109–119.

- DOI:10.7862/rz.2023.hss.19.
4. Optimization of Green Containerized Grain Supply Chain Transportation Problem in Ukraine Considering Disruption Scenarios / J. Li et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 7620. DOI:10.3390/su15097620.
 5. A mathematical model to maximize the grain transport planning profit / J. Vieira et al. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2026. Vol. 35. P. 101773. DOI:10.1016/j.trip.2025.101773.
 6. Павленко О.В., Волкова Т.В., Музильов Д.О., Медведєв Є.П. Імітаційна модель функціонування логістичної системи постачання зернових вантажів із України в країни світу. *Комунальне господарство міст*. 2024. № 6(187). С. 295-301. DOI:10.33042/2522-1809-2024-6-187-295-301.
 7. Veremeenko E. Development of a System for increasing the Level of Vehicle Service at the Grain Terminal. *MATEC Web of Conferences*. 2021. Vol. 334. P. 01029. DOI:10.1051/mateconf/202133401029.
 8. Khomenko L.M., Angelyuk A.O., Davydov I.S., Hlushko D.M. Increased profitability by optimizing grain transportation. *Economics and Region*. 2023. No. 2(89). P. 88-95.
 9. Percentage of Corn Grain Losses in Roads Transport Based on Weight of Loads / P. S. X. Pereira et al. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2019. P. 1–10. DOI:10.9734/jeai/2019/v37i430272.
 10. Gaponyuk O., Aleksashin A., Goncharuk G. Optimization of press-granulator work in smart technologies system. *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2022. Vol. 22, no. 1. DOI:10.15673/gpmf.v22i1.2341.
 11. Mizanbekov I., Kalym K. Identification of transport and technological problems in the grain product subcomplex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 2, no. 13 (128). P. 15–25. DOI:10.15587/1729-4061.2024.301844.
 12. Колодійчук В. А. Логістичне забезпечення експортного зернового потенціалу України. *Євроінтеграційні перспективи розвитку аграрної економіки України*. 2023. С. 465–490. DOI:10.32782/978-966-2384-21-5-12.
 13. AgroDigest Ukraine. January 2025. Kyiv School of Economics (KSE Agrocenter). 2025. 49 p. URL: https://kse.ua/AgroDigest_Ukraine_January_2025.pdf (дата звернення: 20.11.2025).
 14. Agricultural Outlook Ukraine 2024-2033 Report-summary. Kyiv School of Economics (KSE Agrocenter). 2024. 29 p. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/UA-Outlook-2024-2033-Report-1.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).
 15. Cargo transshipment in Ukrainian ports in 2024 increased by 57% at once. GMK Center. 12.02.2025. URL: <https://gmk.center/en/infographic/cargo-transshipment-in-ukrainian-ports-in-2024-increased-by-57-at-once/> (дата звернення: 18.11.2025).
 16. Solidarity Lanes: Latest figures - October 2025. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. 03.12.2025. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-october-2025-2025-12-03_en (дата звернення: 18.11.2025).
 17. Транспорт України 2023: статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ, 2024. 94 с. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2024/zb/10/zb_Trans_23.pdf (дата звернення: 24.11.2025).
 18. Salin D. L. Ukraine Grain Transportation. USDA Agricultural Marketing Service. June 2025. URL: <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

References

1. Wageningen University & Research. (2023). *Food supply chains in Ukraine: Measurement of resilience of the supply chains. Supply chain schemes* [Web resource]. Kyiv School of Economics. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/D_III_WUR_Schemes_v2.pdf
2. Yanovska, V., Krol, M., & Pittman, R. (2025). Wartime reconfiguration of Ukraine's grain export logistics: Priority areas. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 30, 101363. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101363>.
3. Sadłowski, A., Brdulak, J., & Budzyńska, A. (2023). The transport of Ukrainian grain through Poland and the domestic grain market. *Humanities and Social Sciences Quarterly*, 30(2), 109-119. <https://doi.org/10.7862/rz.2023.hss.19>.
4. Li, J., Huang, Z., Zhou, H., Luo, J., & Zheng, X. (2023). Optimization of green containerized grain supply chain transportation problem in Ukraine considering disruption scenarios. *Sustainability*, 15(9), 7620. <https://doi.org/10.3390/su15097620>.
5. Vieira, J., Lima, P., Silva, A., & Sousa, J. (2026). A mathematical model to maximize the grain transport planning profit. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 35, 101773. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101773>.
6. Pavlenko, O., Volkova, T., Muzylov, D., & Medvediev, Y. (2024). Simulation model of the functioning of the logistics system for the supply of grain cargoes from Ukraine to the countries of the world. *Municipal economy of cities*, 6(187), 295–301. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-295-301>.

7. Veremeenko, E. (2021). Development of a system for increasing the level of vehicle service at the grain terminal. *MATEC Web of Conferences*, 334, 01029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133401029>.
8. Khomenko, L. M., Angelyuk, A. O., Davydov, I. S., & Hlushko, D. M. (2023). Increased profitability by optimizing grain transportation. *Economics and Region*, (2(89)), 88-95.
9. Pereira, P. S. X., Silva, A. R., Souza, M. A., & Oliveira, L. F. (2019). Percentage of corn grain losses in roads transport based on weight of loads. *Journal of Experimental Agriculture International*, 1-10. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v37i430272>.
10. Gaponyuk, O., Aleksashin, A., & Goncharuk, G. (2022). Optimization of press-granulator work in smart technologies system. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 22(1). <https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i1.2341>.
11. Mizanbekov, I., & Kalym, K. (2024). Identification of transport and technological problems in the grain product subcomplex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 15-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301844>.
12. Kolodiichuk, V. A. (2023). Logistics support for Ukraine's export grain potential. In *European integration prospects for the development of Ukraine's agricultural economy* (pp. 465-490). NNVK "ATB". [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/978-966-2384-21-5-12>.
13. Kyiv School of Economics, KSE Agrocenter. (2025). *AgroDigest Ukraine: January 2025* (49 p.). https://kse.ua/AgroDigest_Ukraine_January_2025.pdf.
14. Kyiv School of Economics, KSE Agrocenter. (2024). *Agricultural outlook Ukraine 2024-2033: Report summary* (29 p.). <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/UA-Outlook-2024-2033-Report-1.pdf>.
15. GMK Center. (2025, February 12). *Cargo transshipment in Ukrainian ports in 2024 increased by 57% at once*. <https://gmk.center/en/infographic/cargo-transshipment-in-ukrainian-ports-in-2024-increased-by-57-at-once/>.
16. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. (2025, December 3). *Solidarity lanes: Latest figures - October 2025*. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-october-2025-2025-12-03_en.
17. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Transport of Ukraine 2023: Statistical yearbook* (94 pp.) [in Ukrainian]. https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2024/zb/10/zb_Trans_23.pdf.
18. Salin, D. L. (2025, June). *Ukraine grain transportation*. USDA Agricultural Marketing Service. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf>.

Dmitriy Muzylyov, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Yevgeniy Ukolov**

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

A Model for Cost Assessment of Delivering Agricultural Products to the Departure Port

This paper proposes and validates a compact, reproducible model for the operational cost assessment of road delivery of agricultural products to a departure port. The motivation is the high variability of export logistics under wartime disruptions and infrastructure constraints, where queues in the pre-port area create non-productive downtime and destabilize unloading schedules.

The approach combines decomposition of the delivery process into travel, loading and paperwork, and queue waiting, decomposition of total trip cost into movement, loading, queue-related idle time, and fixed administrative components, a full-factorial experiment 2^3 with central-point replications for the controllable factors - average speed V , loading and paperwork time T_{load} , and queue waiting time T_{queue} , and linear regression meta-modeling for rapid scenario comparison. Empirical data from $N=120$ field observations were used to parameterize the baseline regime and to quantify the typical variability of speed and time components. For a representative route length of $D=500$ km, the unit delivery cost ranges from 1307 to 1519 UAH/t and the total delivery time ranges from 10.3 to 20.6 hours, depending primarily on the queue intensity and speed regime. A local one-at-a-time sensitivity analysis (+10% change) shows that queue waiting time is the dominant operational driver of unit cost: a 10% increase in T_{queue} raises unit cost by about 0.9%, while the same increase in T_{load} raises it by about 0.4%; conversely, a 10% increase in V reduces unit cost by about 0.6%.

The resulting regression relationships do not replace network-level optimization or detailed simulation, but they provide an interpretable decision-support tool for fast screening of delivery scenarios, tuning of arrival time slots, and prioritization of interventions aimed at reducing port queues and standardizing loading operations. Further research should aim to detail queuing mechanisms, including a simulation model, and calibrate parameters based on an extended flight schedule for various ports and seasons.

road transportation, agricultural products, port of departure, queue, unit costs

Одержано (Received) 26.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 23.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

О. В. Павленко, доц., канд. техн. наук, **А. Г. Бойко**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: ttpov@ukr.net

Оцінка ефективності функціонування транспортно-експедиторської компанії при виборі раціональної моделі автомобіля

В статті визначено параметр оцінки визначення умов ефективного функціонування ТЕК. Проведено статистичний аналіз параметрів впливу на основі реальних даних по функціонуванню ринку транспортно-експедиторського обслуговування замовлень. Проведені експериментальні дослідження по визначення умов ефективного функціонування ТЕК. Визначені умови ефективного функціонування ТЕК за рахунок вибору раціональної моделі автомобіля.

експедиторські послуги, вантажні автомобілі, взаємодія, раціональна модель

Постановка проблеми. Розвиток цифрових технологій, модернізація транспортної інфраструктури та гармонізація законодавства з нормами Європейського Союзу створюють умови для підвищення прозорості та ефективності логістичних операцій. На цьому фоні ринок транспортно-експедиторських послуг продовжує динамічно зростати, зокрема завдяки дерегуляції та відкритості до міжнародних партнерств [1]. Збільшення кількості транспортно-експедиторських компаній (ТЕК) посилює конкуренцію та стимулює учасників ринку до впровадження інноваційних рішень. ТЕК є ключовим елементом транспортного комплексу України, головним завданням якого є підвищення якості логістичних послуг та задоволення зростаючих потреб економіки в ефективних перевезеннях. Важливою метою розвитку цієї галузі є також створення сприятливих соціально-економічних умов в країні шляхом оптимізації транспортних витрат на перевезення вантажів по території України [2].

ТЕК своєю діяльністю виступають зв'язувальною ланкою між виробником і споживачем, при цьому координуючи вибір відповідного виду транспорту, маршруту, пакування, митного супроводу доставки вантажу та інших послуг. Суттєві експлуатаційні витрати в транспортному процесі припадають на автомобільний транспорт. Своєчасність доставки прямо впливають на собівартість перевезення, прибуток та конкурентоспроможність експедитора. У сучасних умовах нестабільності глобальної торгівлі, підвищення цін на паливо та необхідності зниження вуглецевого сліду, оптимальний вибір автопарку стає критичним фактором ефективності підприємства як з економічної, так і з екологічної точки зору.

Міжнародні огляди Reuters також підкреслюють, що геополітичні ризики – зокрема проблеми з проходженням вантажів через Червоне море та зростання тарифів на контейнерні перевезення – суттєво збільшили навантаження на наземні перевізні засоби, зокрема на автомобільний транспорт, який повинен забезпечити гнучкість і оперативність доставки в умовах нестабільності глобальних маршрутів [3]. Це особливо актуально для ТЕК, які зацікавлені у зменшенні операційних витрат, підвищенні ефективності використання транспортних засобів та забезпеченні високого рівня сервісу при мінімальних затримках.

Виклики, які виникли внаслідок глобального економічного спаду, зміни в поведінці споживачів та перевищення попиту над пропозицією призвели до скорочення світового ринку експедирування вантажів на 1,3 % у реальному вираженні у 2023 році, в результаті чого ринкова вартість склала 192730 млн. Євро (рис. 1). У номінальному вираженні світовий ринок експедирування вантажів скоротився на 45,6 % у 2023 році. Це значне падіння можна пояснити зниженням фрахтових ставок на деякі види перевезення порівняно з минулим роком. Проте прогнозується, що до 2028 року обсяг світового ринку експедирування вантажів збільшиться до 215000 млн. Євро [4].

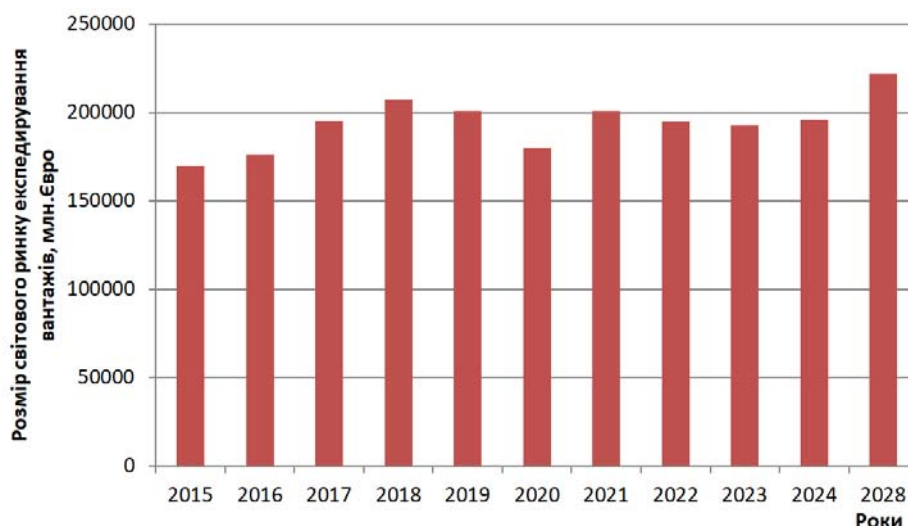


Рисунок 1 – Розмір світового ринку експедирування вантажів з 2015 по 2024 роки з прогнозом на 2028 рік

Джерело: розроблено на підставі [4]

Очікуваним результатом дослідження стане розробка науково-обґрунтованої моделі вибору марки автомобіля, що дозволить ТЕК підвищити ефективність своєї діяльності шляхом зниження собівартості перевезень, підвищення маневреності та адаптивності експедиторських послуг, що, в свою чергу, покращить якість обслуговування клієнтів. Обґрунтоване впровадження результатів дослідження сприятиме підвищенню конкурентоспроможності українських ТЕК як на внутрішньому, так і на міжнародному ринку та забезпечуватиме більш раціональне використання транспортних ресурсів у сучасних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток інформаційних технологій за останні роки забезпечує високий рівень інформатизації та віртуалізації технологічних процесів на сучасних транспортних та експедиторських ринках. Це призвело до змін у ролі експедиторів як компаній, що надають посередницькі послуги. Сучасні ТЕК є архітекторами ланцюгів поставок, що забезпечують найефективніший спосіб взаємодії між учасниками транспортного ринку [5]. Отже, ефективність технологічних процесів експедиторських компаній на сьогодні є одним із ключових факторів, що визначає ефективність систем доставки вантажів. Оцінка попиту на продукцію підприємств (або їхні послуги) є необхідним етапом, який зазвичай здійснюється перед прийняттям рішень щодо покращення якості продукції (або обслуговування клієнтів), підвищення ефективності технологічних процесів, підвищення конкурентоспроможності компанії тощо. В цьому дослідженні запропоновано метод дослідження потоку замовлень на послуги транспортно-експедиторського обслуговування (ТЕО) з використанням інструментів інформаційно-логістичного порталу. На основі результатів експериментальних досліджень для ринку

автомобільних перевезень України обґрунтовано розподіли параметрів потоку замовлень та визначено числові характеристики попиту на послуги українських ТЕК.

В багатьох дослідженнях розглядається комплексний підхід до управління логістичними процесами транспортно-експедиторських підприємств [6-9]. Визначається, що це управління охоплює всі етапи життєвого циклу послуги, від замовлення та зберігання до транспортування, доставки та обміну інформацією. Дослідники встановлюють, що ключові аспекти управління включають планування, координацію, складування, транспортування, доставку, обмін інформацією, управління ризиками, контроль, забезпечення якості послуг та впровадження інновацій. Досліджені основні принципи ефективного логістичного обслуговування, а саме: системність, постійне вдосконалення, орієнтація на клієнта, оптимізація, інновації, технології, екологічність та ефективна комунікація. Обґрунтовано, що основними цілями управління логістичними процесами є досягнення оптимальної ефективності, зниження витрат, підвищення якості послуг та посилення конкурентоспроможності на ринку. Для досягнення цих цілей виділяється застосування різних методів та стратегій, що відповідають специфіці транспортно-експедиторської галузі.

Оцінка ефективності використання автомобільних транспортних засобів залишається значною проблемою для сучасних транспортних компаній, оскільки численні стохастичні впливи, такі як стохастичність попиту, невизначеність дорожніх умов, коливання ринку транспорту тощо, впливають на технологічний процес [10-12]. Для врахування нечітко-логічного підходу в статтях пропонується нечіткий логічний підхід. Так в [10] згідно з розробленим підходом, ефективність транспортних засобів описується на основі функції належності, тоді як ефективність усього автопарку оцінюється як нечітка множина. Для демонстрації розробленого підходу зображено тематичне дослідження використання вантажних транспортних засобів для доставки сільськогосподарської продукції. Числові результати представлені для вибраних моделей транспортних засобів, які транспортна компанія використовує для обслуговування групи клієнтів. Транспортні послуги, що надаються кожному з клієнтів, характеризуються числовими параметрами попиту – вагою вантажу та відстанню доставки. Виконані розрахунки дозволили отримати функції належності для альтернативних моделей транспортних засобів та представити автопарк транспортної компанії як нечітку множину.

Сучасні зарубіжні дослідження демонструють використання математичних моделей дискретного вибору та машинного навчання для визначення оптимального типу вантажного автомобіля залежно від параметрів маршруту, структури вантажопотоку та показників вартості. Такі наукові підходи підкреслюють важливість комплексного аналізу технічних, економічних та експлуатаційних критеріїв.

Постановка завдання. Для визначення умов ефективного функціонування транспортно-експедиторської компанії необхідно розробити науково-обґрунтований підхід отримання позитивного прибутку від використання раціональних моделей автомобілів.

Для досягнення мети необхідно вирішити ряд завдань: 1) визначити параметр оцінки визначення умов ефективного функціонування ТЕК; 2) провести статистичний аналіз параметрів впливу на основі реальних даних по функціонуванню ринку транспортно-експедиторського обслуговування замовлень; 3) провести експериментальні дослідження по визначення умов ефективного функціонування ТЕК; 4) визначити умови ефективного функціонування ТЕК за рахунок вибору раціональної моделі автомобіля.

Виклад основного матеріалу. Ефективність ТЕК значною мірою визначається якістю взаємодії з ключовими суб'єктами ринку транспортних послуг. Кожен із них

виконує специфічну роль у логістичному ланцюгу, а від узгодженості їх дій залежить своєчасність та надійність доставки. Основними контрагентами експедиторської компанії є замовники-вантажовласники, перевізники (автомобільні, залізничні, авіаційні, морські), інші експедиторські компанії, які можуть залучатися для міжнародних або комбінованих перевезень, а також складські підприємства, що забезпечують проміжне чи тривале зберігання вантажів. Організацію роботи ТЕК представимо в схематичному зображенні взаємодії транспортно-експедиторської компанії з основними учасниками процесу доставки вантажу в міжнародному сполученні (рис. 2). Ця схема відображає, що ТЕК виконує центральну координаційну роль, забезпечуючи ефективне управління потоками інформації, документів і вантажів між усіма сторонами. В статті будемо розглядати трьох учасників взаємодії (пунктирний прямокутник – рис. 2).

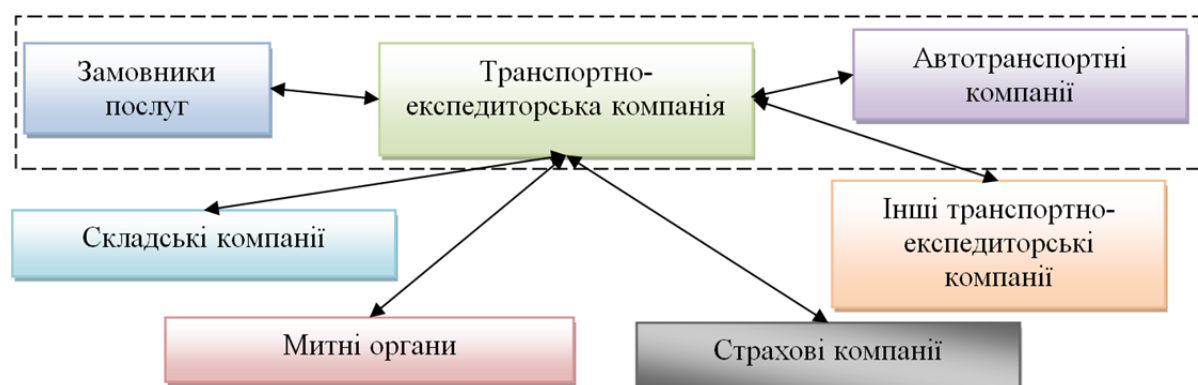


Рисунок 2 – Схема функціональної взаємодії між учасниками транспортно-експедиторського обслуговування замовлень

Джерело: розроблено авторами

Для визначення умов ефективного функціонування ТЕК при виборі раціональної моделі автомобіля обрано наступний критерій – питомий прибуток ТЕК за виконані замовлення – $\Pi_{ТЕК}$, ткм. Даний оціночний показник буде залежати від: доходу ТЕК від виконання замовлення – $D_{ТЕК}$, грн; витрат, які несе ТЕК під час виконання замовлення на перевезення вантажу – B_e , грн; обсягу партії вантажу – Q_s , т; відстані перевезення вантажів – $L_{пер}$, км:

$$\Pi_{ТЕК} = \frac{D_{ТЕК} - B_e}{Q_s \cdot L_{пер}}. \quad (1)$$

Дохід ТЕК від виконання замовлення:

$$D_{ТЕК} = T_{пер} \cdot L_{пер}, \quad (2)$$

де $T_{пер}$ – тариф на перевезення вантажу, грн/км.

Витрати, які несе ТЕК під час виконання замовлення на перевезення вантажу:

$$B_e = B_{орг.дост.} + B_{транс.}, \quad (3)$$

де $B_{орг.дост.}$ – витрати на організацію доставки відповідного виду вантажу ТЕК, грн;

$B_{транс.}$ – витрати на транспортування відповідного виду вантажу, грн.

Витрати на організацію доставки відповідного виду вантажу для виконання кожного замовлення ТЕК враховують наступні складові: витрати на інформаційне забезпечення; витрати на розрахунково-фінансові операції; витрати на оформлення документів; витрати на укладання договорів на ТЕО; приймально-здавальні операції та

оформлення документації; інформування учасників транспортного процесу про рух вантажу; витрати на виконання навантажувально-розвантажувальних робіт; витрати на пошук клієнтів.

Витрати на транспортування вантажу та експлуатацію автотранспортних засобів складають приблизно 80-85 % витрат ТЕК з власним рухомим складом [5]. Насамперед це пояснюється досить високою ціною на дизельне паливо та мастильні матеріали.

Витрати на транспортування відповідного виду вантажу складаються з наступних складових: витрати на паливо; витрати на відновлення та ремонт шин; витрати на мастильні матеріали; витрати на технічне обслуговування (ТО) та ремонт; витрати на амортизацію; витрати на заробітну платню водіям; витрати на «добові» водія; загальногосподарські витрати.

В дослідженні пропонується розглядати в якості параметрів впливу на питомий прибуток: обсяг партії вантажу, відстань перевезення вантажів, інтервал отримання замовлення ТЕК.

Для реалізації експерименту проведено якісний статистичний аналіз факторів впливу. Натурні дослідження проводилися за результатами обробки замовлень з відкритих джерел сайтів: <https://della.com.ua/> та <https://lardi-trans.ua/>. Замовлення на перевезення вантажів в міжнародному сполученні відповідними моделями автомобілів: Volvo FH16 750, MAN TGX, MAN TGM, Renault C, Renault Premium, DAF-XF 560, Iveco T-Way – були проаналізовані за вересень місяць 2025 року. Результати визначення обсягів вибірки та статистичних показників для встановлених параметрів доставки вантажів у міжнародному сполученні наведені в таблиці 1. Розрахунки були виконанні за допомогою програмного середовища «Excel». Визначено, що значення обсяг партії вантажу та відстань перевезення вантажів розподілені за нормальним законом розподілу випадкових величин, а інтервал отримання замовлення розподілене за експоненційним законом розподілу. Це підтверджується відповідним рівнем довірчої ймовірності. Також визначені мінімальні та максимальні значення параметрів впливу (табл. 2).

Таблиця 1 – Результати проведених розрахунків обсягів вибірки для визначених параметрів впливу

Показники	Обсяг партії вантажу, т	Відстань перевезення вантажів, км	Інтервал отримання замовлення ТЕК, год.
Математичне очікування	11,72	1895	25,02
Середньоквадратичне відхилення	36,81	775,77	96,69
Похибка розрахунків	0,59	94,75	1,25
Обсяг вибірки, од.	99	72	100

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Результати оцінки визначених параметрів впливу

Рівень значень	Обсяг партії вантажу, т	Відстань перевезення вантажів, км	Інтервал отримання замовлення ТЕК, год.
Мінімальне	0,45	194	0,05
Максимальне	23	3652	52

Джерело: розроблено авторами

Розроблено повнофакторний план експерименту для трьох встановлених вхідних параметрів впливу. План було складено для досягнення максимальної точності вимірювань при відповідній мінімальній кількості досліджень, а також для збереження статистичної достовірності отриманих результатів. План для трьох параметрів та двох рівнів (мінімальний та максимальний) складається з восьми серій дослідів. На основі складеного плану проведено моделювання для кожної серії дослідів. Було проведено тестування отриманих значень на достатність відповідно до критерію Кохрена. В результаті проведення експерименту отримали значення оціночного критерію – питомий прибуток ТЕК за виконані замовлення для кожної моделі автомобіля.

Для того щоб, проаналізувати вплив обсягу партії вантажу, відстані перевезення вантажів та інтервалу отримання замовлення ТЕК на оціночний параметр – питомий прибуток ТЕК проведено регресійний аналіз. За допомогою програми «MS Excel» та вбудованого елемента надбудови «Data Analysis-Regression» були визначені відповідні показники: дисперсії, коефіцієнти рівняння за змінними та регресійна статистика. Регресійний аналіз результатів проведеного експерименту дозволив визначити регресійні моделі лінійної та нелінійної (ступеневої) форми. Визначено, що отримані лінійні моделі є адекватними за значеннями показника «R-квадрат». Також були перевірені отримані значення коефіцієнтів регресійних моделей, з яких адекватними є параметри: обсяг партії вантажу та відстань перевезення вантажів. На підставі цих даних сформовані регресійні моделі (табл. 3)

Таблиця 3 – Регресійні моделі визначення питомого прибутку ТЕК для відповідних моделей автомобілів

Модель автомобіля	Вид регресійної моделі
Volvo FH16 750	$\Pi_{TEO}^{Volvo FH16 750} = -26,63 + 0,9114 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0071 \cdot L_{\text{пер}}$
MAN TGX	$\Pi_{TEO}^{MAN TGX} = -27,9 + 0,9648 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0069 \cdot L_{\text{пер}}$
MAN TGM	$\Pi_{TEO}^{MAN TGM} = -26,61 + 0,9088 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0071 \cdot L_{\text{пер}}$
Renault C	$\Pi_{TEO}^{Renault C} = -30,59 + 1,0776 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0068 \cdot L_{\text{пер}}$
Renault Premium	$\Pi_{TEO}^{Renault Premium} = -29,98 + 1,047 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0069 \cdot L_{\text{пер}}$
DAF-XF 560	$\Pi_{TEO}^{DAF-XF 560} = -31,52 + 1,1136 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0068 \cdot L_{\text{пер}}$
Iveco T-Way	$\Pi_{TEO}^{Iveco T-Way} = -31,9 + 1,1272 \cdot Q_{\text{с}} + 0,0068 \cdot L_{\text{пер}}$

Джерело: розроблено авторами

Для визначення характеру зміни значень оціночного показника побудуємо характеристичні графіки залежності питомого прибутку ТЕП від зміни значень параметрів впливу за наступним принципом (умова 1): фіксуємо максимальне значення відстані перевезення вантажів – 3600 км, змінюємо рівномірно значення обсягу партії вантажу {0,45; 3,45; 6,45; 9,45; 12,45; 15,45; 18,45; 21,45; 23} (рис. 3.а). З графіків бачимо, що динаміка зміни значень питомого прибутку ТЕК для всіх моделей автомобілів однакова. При мінімальному значенні обсягу партії вантажу використання всіх моделей автомобілів збиткове. Тільки при збільшенні значень обсягу партії вантажу більше 9,45 тонн питомий прибуток стає позитивним для всіх моделей автомобілів. Для умови 2: фіксуємо максимальні значення обсягу партії вантажу – 23 тони, змінюємо рівномірно значення відстані перевезення вантажів {190; 590; 990; 1390; 1790; 2190; 2590; 2990; 3600} (рис.3.б). З графіків бачимо, що питомий прибуток стає позитивним при відстані більше 990 кілометрів для всіх моделей автомобілів.

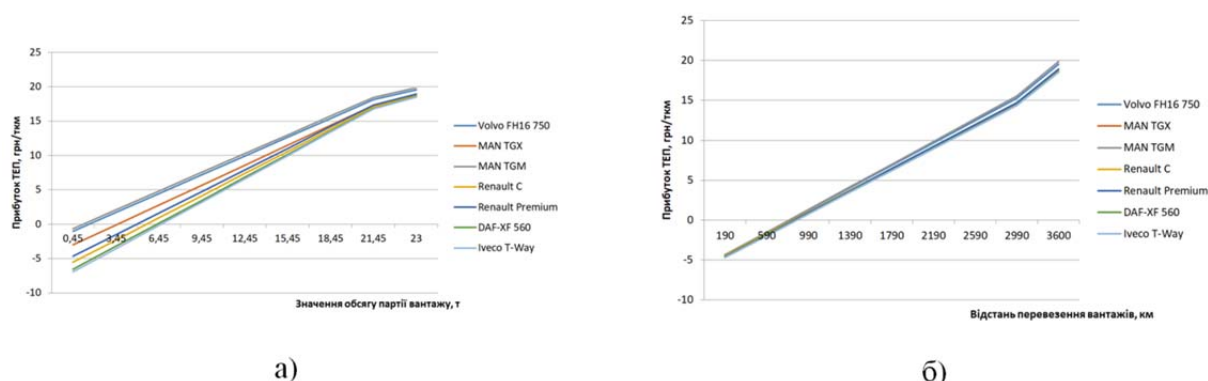


Рисунок 3 – Характеристичний графік залежності питомого прибутку ТЕК при зміні значень: обсягу партії вантажу та фіксації максимального значення відстані перевезення вантажів – умова 1 (а) та відстані перевезення вантажів та фіксації максимального значення обсягу партії вантажу – умова 2 (б)
Джерело: розроблено авторами

Висновки. 1. Визначено параметр оцінки умов ефективного функціонування ТЕК. В якості інтегрального критерію ефективності запропоновано використовувати питомий прибуток транспортно-експедиторської компанії за виконанні замовлення, грн/ткм, який комплексно враховує доходи від перевезення та сукупні витрати на організацію і виконання транспортного процесу. Запропонований критерій дозволяє об'єктивно порівнювати різні моделі вантажних автомобілів за умов варіативності обсягів партій вантажу, відстаней перевезення та інтенсивності надходження замовлень, що забезпечує науково обґрунтований вибір раціонального рухомого складу.

2. Проведено статистичний аналіз параметрів впливу на основі реальних даних ринку транспортно-експедиторських послуг. На основі обробки замовлень із відкритих інформаційно-логістичних порталів виконано аналіз параметрів функціонування ТЕК у міжнародному сполученні. Встановлено, що: обсяг партії вантажу та відстань перевезення підпорядковуються нормальному закону розподілу; інтервал надходження замовлень має експоненційний характер розподілу. Визначені статистичні характеристики дозволили обґрунтовано сформувати межі варіювання вхідних параметрів і забезпечити достовірність подальших експериментальних досліджень.

3. Розроблено та реалізовано повнофакторний експериментальний план дослідження. Сформовано повнофакторний план експерименту для трьох факторів впливу з двома рівнями варіювання, що забезпечило отримання достатньо повної інформації про характер впливу кожного параметра на зміну питомого прибутку. За результатами експерименту побудовано регресійні моделі лінійного типу для семи моделей вантажних автомобілів. Перевірка адекватності отриманих моделей за критерієм коефіцієнта детермінації підтвердила їх статистичну надійність та можливість використання для прогнозування економічної ефективності ТЕК.

4. Визначено умови ефективного функціонування ТЕК за рахунок вибору раціональної моделі автомобіля. На основі регресійного аналізу встановлено, що найбільш вагомими факторами впливу на питомий прибуток є обсяг партії вантажу та відстань перевезення. Побудовані характеристичні залежності дозволили визначити граничні значення параметрів, при яких діяльність ТЕК переходить у прибуткову зону. Встановлено, що: при обсязі партії вантажу понад 9,45 т забезпечується позитивне значення питомого прибутку для всіх досліджуваних моделей автомобілів за максимального значення відстані перевезення; при максимальному обсязі партії вантажу позитивний економічний ефект досягається при відстані перевезення понад 990 км. Обґрунтовано раціональну модель автомобіля для умов міжнародних

перевезень. За результатами порівняльного аналізу встановлено, що максимальний питомий прибуток ТЕК складає 19,86 грн/ткм при використанні автомобіля MAN TGM за максимальних значень обсягу партії вантажу та відстані перевезення. Це дозволяє рекомендувати дану модель як раціональну для експлуатації в умовах міжнародних автомобільних перевезень, орієнтованих на підвищення економічної ефективності транспортно-експедиторських послуг.

Список літератури

1. Wu R., Li M. Optimization of shipping freight forwarding services considering consumer rebates under the impact of carbon tax policy. *Ocean & Coastal Management*. 2024. Vol. 258, P. 107361. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2024.107361
2. Лебідь Є. М. Заходи з оптимізації бізнес-процесів транспортно-експедиторських підприємств при організації міжнародних перевезень різних видів вантажів. *Інтелектуальні транспортні технології: тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції* (м. Харків, 24-26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 179–182.
3. Global freight rises but shows signs of weakness in US : веб-сайт. URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/global-freight-rises-shows-signs-weakness-us-2024-06-27> (дата звернення: 12.01.2026).
4. Global freight forwarding market size & forecasting 2023-2028 : веб-сайт. URL: <https://ti-insight.com/wp-content/uploads/2024/07/GFF-Market-Size-Forecasting-2023-2028-WP.pdf> (дата звернення: 12.01.2026).
5. Naumov V., Kholeva O. Studying Demand for Freight Forwarding Services in Ukraine on the Base of Logistics Portals Data. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187, P. 317-323. DOI:10.1016/j.proeng.2017.04.381
6. Dobrovolskiy O., Dobrovolska A., Kuznetsova E. Management Of Logistics Service Processes In Freight Forwarding Activities. *Modern Science*. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/394391860_MANAGEMENT_OF_LOGISTICS_SERVICE_PROCESSES_IN_FREIGHT_FORWARDING_ACTIVITIES (Last accessed: 13.01.2026).
7. Wang L., Wang Y., Li N. A deep reinforcement learning approach for robust dynamic Bayesian network-based systemic risk analysis in freight forwarding. *Reliability Engineering & System Safety*. 2026. Vol. 271, P. 112190. DOI:10.1016/j.ress.2026.112190
8. Aulin V., Lyashuk O., Pavlenko O., Velykodnyi D., Hryniv A., Lysenko S., Holub D., Vovk Y., Dzyura V., Sokol M. Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21(2), P. 3-12.
9. Логістика постачання транспортних і виробничих підприємств, фірм, компаній: навч. посіб. / В. В. Аулін та ін. – Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2022. 325 с.
10. Taran I., Karsybayeva A., Naumov V., Murzabekova K., Chazhabayeva M. Fuzzy-logic approach to estimating the fleet efficiency of a road transport company: a case study of agricultural products deliveries in Kazakhstan. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 5, P. 4179. DOI:10.3390/su15054179
11. Medvediev I., Muzylyov D., Montewka J. A model for agribusiness supply chain risk management using fuzzy logic. Case study: Grain route from Ukraine to Poland. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 190, P. 103691. DOI:10.1016/j.tre.2024.103691
12. Taran I., Kairatkyzy G., Pavlenko O., Nefyodov V., Muzylyov D. Determining the optimal service area of a logistics center: a quantitative approach. *Transport Problems*. 2025. Vol. 20(3), P. 5-18. DOI:10.20858/tp.2025.20.3.01

References

1. Wu, R., & Li, M. (2024). Optimization of shipping freight forwarding services considering consumer rebates under the impact of carbon tax policy. *Ocean & Coastal Management*, 258, 107361. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107361>
2. Lebid E. M. Measures to optimize business processes of freight forwarding companies when organizing international transportation of various types of cargo. *Intelektual'ni transportni tekhnolohiyi: tezy dopovidey 6-yi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (pp. 179-182). Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].
3. Global freight rises but shows signs of weakness in US. <https://www.reuters.com/markets/commodities/global-freight-rises-shows-signs-weakness-us-2024-06-27>
4. Global freight forwarding market size & forecasting 2023-2028. <https://ti-insight.com/wp-content/uploads/2024/07/GFF-Market-Size-Forecasting-2023-2028-WP.pdf>

5. Naumov, V., & Kholeva, O. (2017). Studying Demand for Freight Forwarding Services in Ukraine on the Base of Logistics Portals Data. *Procedia Engineering*, 187, 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.381>
6. Dobrovolskiy, O., Dobrovolska, A., & Kuznetsova, E. (2025). MANAGEMENT OF LOGISTICS SERVICE PROCESSES IN FREIGHT FORWARDING ACTIVITIES. *Modern Science*. <https://doi.org/10.62204/2336-498x-2025-2-14>
7. Wang, L., Wang, Y., & Li, N. (2026). A deep reinforcement learning approach for robust dynamic Bayesian network-based systemic risk analysis in freight forwarding. *Reliability Engineering & System Safety*, 271, 112190. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.112190>
8. Aulin, V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D., Hryniv, A., Lysenko, S., Holub, D., Vovk, Y., Dzyura, V., & Sokol, M. (2019). Realization of the Logistic Approach in the International Cargo Delivery System. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, 21(2), 3–12. <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.3-12>
9. Aulin, V. et al. (2022). *Logistics of supply of transport and manufacturing enterprises, firms, companies*. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
10. Taran, I., Karsybayeva, A., Naumov, V., Murzabekova, K., & Chazhabayeva, M. (2023). Fuzzy-Logic Approach to Estimating the Fleet Efficiency of a Road Transport Company: A Case Study of Agricultural Products Deliveries in Kazakhstan. *Sustainability*, 15(5), 4179. <https://doi.org/10.3390/su15054179>
11. Medvediev, I., Muzylyov, D., & Montewka, J. (2024). A model for agribusiness supply chain risk management using fuzzy logic. Case study: Grain route from Ukraine to Poland. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 190, 103691. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103691>
12. Taran, I., Kairatkyzy, G., Pavlenko, O., Nefyodov, V. & Muzylyov, D. (2025). Determining the optimal service area of a logistics center: a quantitative approach. *Transport Problems*, 20(3), 5–18. <https://doi.org/10.20858/tp.2025.20.3.01>

Olexiy Pavlenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Andriy Boyko**

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Assessment Of The Efficiency Of A Freight Forwarding Company When Choosing A Rational Vehicle Model

It is necessary to develop a comprehensive approach that will include the collection and analysis of technical and operational characteristics of various car models, calculation of operating costs, formation of a multi-criteria selection model, and assessment of the sensitivity of results to changes in demand parameters.

To improve the efficiency of the TEK operation, it is proposed to consider interaction with a regular carrier who has seven vehicles with different characteristics, as well as customers who submit applications for the delivery of goods in international traffic in the direction of European countries. The TEK operation process will be evaluated by specific profit. The parameters of the outflow on specific profit: the volume of the cargo consignment, the distance of cargo transportation, the interval of receiving the order. According to the results of the regression analysis of the obtained values of the evaluation indicator, linear regression models were built to determine the specific profit of the TEK. The statistical analysis of the parameter values allowed us to establish that the values of the cargo batch volume and the distance of cargo transportation are distributed according to the normal distribution law of random variables, and the interval of receiving the order is distributed according to the exponential distribution law. To achieve maximum measurement accuracy with a minimum number of studies and maintain statistical reliability of the results, a full-factorial experimental design was developed for three input parameters, which consists of eight series of experiments.

It was established that when the values of the cargo consignment volume increase by more than 9.45 tons, the specific profit of the TEK becomes positive for all car models at the maximum level of the transportation distance. And at the maximum volume of the cargo consignment, the specific profit becomes positive at a distance of more than 990 kilometers for all car models. The maximum specific profit of the TEK will be obtained when using the MAN TGM car model - 19.86 UAH/tkm at the maximum values of the cargo consignment volume and the distance of cargo transportation.

forwarding services, trucks, interaction, rational model

Одержано (Received) 23.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 17.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

Natalia Potaman¹, PhD, Assoc. Prof., Ashraf Hamed², PhD, Oleksandr Orda¹

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

²*A+S Consult, Dresden, Germany*

e-mail: n.potaman@khadi.kharkov.ua

Adaptation of European experience in compensation mechanisms for public transport operators in urban public transport in Ukraine

At present, one of the key directions for improving the efficiency of urban public transport systems is the formalization of contractual relations between public authorities and transport operators. These relations should consider such core aspects as the contract model, compensation calculation mechanisms, monitoring and KPI achievement systems, as well as the transparency of financial flows. European experience demonstrates that precisely these elements – combined with a clear allocation of risks and the application of bonus–penalty mechanisms – are decisive for improving the quality and efficiency of transport services. Particular attention is paid to the development of modern mechanisms for calculating compensation to public transport operators in urban public transport in Ukraine, taking into account European best practices and the requirements of Regulation (EC) No 1370/2007. Based on an analysis of the EU regulatory framework, academic research on the effectiveness of contractual models (gross cost, net cost, performance-based contracting), and the practical outcomes of their implementation in European cities, the key principles for organizing transparent and result-oriented contractual relations in the transport sector are substantiated. The analysis of Ukrainian legislation and existing compensation mechanisms reveals their fragmented nature, the absence of unified approaches across different transport modes, and a low degree of linkage between public funding and performance indicators. The proposed models are aimed at improving the quality of transport services, ensuring transparency of budget financing, and adapting the Ukrainian system to European standards for the provision of public transport services.

compensation to transport operators, urban public transport, KPI, public service contracts, Regulation (EC) No 1370/2007, quality of transport services

Statement of the problem. The current stage of development of urban public transport in Ukraine is characterized by growing demand for improved quality of passenger transport services, financial stability of operators, and transparency of compensation mechanisms. The National Transport Strategy of Ukraine up to 2030 (Cabinet of Ministers Resolution No. 1550-2024) defines Strategic Objective 2 as ensuring high-quality passenger transport services and barrier-free mobility for the population, which implies the establishment of economically sound mechanisms for financing public transport [1].

One of the key directions in this context is the development of compensation calculation methodologies for transport operators providing socially significant transport services, considering actual operating costs, passenger flow structures, and the accessibility of transport services for socially vulnerable population groups.

Analysis of recent studies and publications. The issue of effective development of urban passenger transport remains one of the priority areas of contemporary academic research and managerial decision-making within the framework of sustainable urban development. Improving service quality, ensuring the financial sustainability of operators, and enhancing the transparency of compensation mechanisms are actively discussed at the international level among researchers, economists, representatives of local authorities, and governmental institutions [2–4].

In its strategic policy documents, the European Commission consistently emphasizes the importance of establishing a balanced transport policy focused on accessibility,

environmental sustainability, and economic efficiency of urban transport services. Accordingly, within European transport policy, significant attention is devoted to the creation of harmonized rules governing public transport organizations and compensation systems, aimed at ensuring transparent use of public funds and increasing the efficiency of transport services.

To achieve these objectives, one of the key legislative acts was adopted – Regulation (EC) No 1370/2007, approved by the European Parliament and the Council on 23 October 2007. The development of this regulatory act was driven by the need to regulate the provision of public passenger transport services, ensure fair competition among operators, establish uniform principles of public financing, and clearly define the cases and conditions under which public authorities may compensate transport operators for incurred costs [5].

Although the Regulation was adopted in 2007, its implementation was not immediate. The European Commission recognized that both public authorities and transport operators would require time to adapt to the new regulatory framework. Therefore, the Regulation provided for a transitional period of ten years, during which Member States were expected to gradually align their contractual arrangements and financing systems with the established requirements. Full implementation of the Regulation began only in 2019, following the completion of the transitional phase.

During this period, cities across the EU undertook extensive efforts to adapt their transport systems to the requirements and recommendations of the Regulation. These efforts focused on establishing clear and transparent rules for granting public support to transport operators, introducing contractual models of interaction between public authorities and operators, and defining standards for public service obligations and corresponding compensation mechanisms.

Practical experience in EU countries shows that even with clearly defined regulatory requirements, full implementation of the new approach typically takes 8–12 years. This is due to the need to adapt governance structures, change the culture of interaction between authorities and transport undertakings, modernize contractual approaches, and establish effective financial mechanisms.

To date, several studies have sought to assess whether the implementation of Regulation (EC) No 1370/2007 has achieved its intended effects and to what extent. One of the key studies in this field is the *Study on the implementation of Regulation (EC) No 1370/2007 on public passenger transport services by rail and by road* (2016) [6], commissioned by the European Commission. The aim of this study was to evaluate the impact of Regulation 1370/2007 on the economic and financial performance of the public transport sector in EU Member States, including changes in funding levels, service quality, operational efficiency, and other performance indicators.

The study was based on the analysis of case studies from various European cities (metro, bus, and urban rail/tram systems), statistical data, stakeholder surveys, expert assessments, and comparative analysis. As a result of the analysis conducted, the main conclusions can be identified (Table 1).

Studies conducted by Sheng D. and Meng Q. (2020) [7] are devoted to assessing the effectiveness of contractual models used in organizing urban public transport services between public authorities and transport operators. The paper analyses how different types of contracts affect service quality, the financial stability of operators, and the interaction between public authorities and transport undertakings. The objective of the study was to systematize accumulated international experience and determine which contractual schemes (gross cost, net cost, performance-based contracts) deliver the best outcomes.

Table 1 – Key Results of the Study on the Impact of Implementing Regulation (EC) No 1370/2007 in EU Member States

Research aspect	Key findings/conclusions
Change in public transport usage	During 2000–2012, public transport ridership increased on average by approximately 8%, which is partly attributed to improvements in service quality and attractiveness following the introduction of new standards.
Cross-country differences	The effects vary significantly between countries and cities; outcomes depend on national legislation, market structure, funding levels, and the administrative capacity of local authorities.
Transparency and financing	Increased transparency of funding, the introduction of clearly defined contracts, and properly structured compensation mechanisms are critical factors for achieving high-quality and accessible transport services.
Contractual models	Various contractual models are applied in Europe, including net cost, gross cost, cap-and-share, and gross cost contracts with bonus–penalty schemes; the choice of model depends on the local context. There is no universal solution.
Role of the state	Some countries transfer a larger share of risks to the operator (net cost contracts), while others ensure a significant level of public sector involvement in financing and control (gross cost contracts).
Contract formulation	Successful implementation of the Regulation is directly dependent on the clarity of contracts, including the definition of public service obligations, compensation mechanisms, principles of exclusivity, and risk allocation, as stipulated in Regulation (EC) No 1370/2007.

Based on the aggregated data, the authors draw several key conclusions. First, the effectiveness of contractual models strongly depends on the local context, including the level of institutional development, market structure, and the capacity of public authorities to exercise effective oversight. Second, the mere existence of contracts does not automatically lead to improvements in service quality. The decisive factor is the content of the contract, the clarity of quality indicators, and the organization of the monitoring system. Third, different contractual models imply an uneven distribution of risks: net cost models are more effective where operators can influence demand, whereas gross cost contracts are better suited to markets with low or unstable passenger demand. The authors emphasize the absence of a universal solution, noting that any contractual model must be designed and adapted to the specific conditions of a given city and the capabilities of its transport system.

Several academic studies focus on analyzing how performance-oriented contracts between public authorities and transport operators affect operational efficiency. One such approach is Performance-Based Contracting (PBC), under which payments to the operator depend not on the number of trips operated or incurred costs, but on the achievement of predefined quality and performance indicators [8–9].

Within these studies, some authors apply economic modelling methodologies, enabling the construction of mathematical contract models in which operator performance is assessed using Key Performance Indicators (KPI) [8]. Other studies develop econometric demand models that allow forecasting passenger volumes based on elasticity estimates, thereby assessing how passengers respond to changes in service conditions. Subsequently, using a mathematically defined system of bonuses and penalties, researchers determine the

extent to which actual operator performance deviates from calculated target levels and the corresponding rewards or penalties to be applied [9].

In urban public transport systems, service quality is typically evaluated using a set of key performance indicators that enable a comprehensive assessment of operator performance. The most important indicators include:

- regularity of service provision and adherence to timetables;
- service fulfilment ratio;
- availability of rolling stock, defined as the share of technically serviceable vehicles ready for operation.

The KPI system also includes safety indicators, such as the number of accidents or incidents, as well as indicators of cleanliness and comfort inside vehicles, assessed through inspections or passenger surveys. In addition, the availability and reliability of information systems – such as electronic displays, fare validation systems, and GPS-based monitoring – are considered. An important indicator is also the level of user satisfaction, which reflects service quality from the passengers' perspective.

The introduction of performance-based contracts implies the transfer of a significant share of operational, technical, and service-related risks to the operator. At the same time, this model incorporates incentive mechanisms: when target KPI values are exceeded, the operator receives bonuses, which compensate for the increased level of responsibility and motivate the maintenance of high service quality.

Performance-Based Contracts (PBC) contribute to improving the quality of public transport services, as they incentivize operators to enhance service regularity, vehicle technical condition, passenger comfort, and overall user satisfaction. However, the application of this contractual model is only feasible under conditions of clearly defined KPIs, a transparent incentive scheme, and the implementation of sanctions in cases of non-compliance with established quality targets. PBCs demonstrate the highest effectiveness when combined with a gross cost model, in which the public authority retains control over tariff policy, while the operator focuses on meeting service standards. Traditional volume-based models (GCC, NCC) do not provide a comparable level of motivation, as payments are not directly linked to performance outcomes.

The key prerequisites for successful implementation of PBCs include reliable KPI measurement, transparency of the financial model, adequate oversight by public authorities, and a balanced allocation of risks between the contracting parties. At the same time, even when KPI systems are well defined, financial models are transparent, and effective public control mechanisms are in place, a fundamental conclusion remains there is no universal contract type. The selection of an appropriate contractual model must consider the specific characteristics of the city, passenger demand levels, and the institutional and managerial capacity of public authorities.

Empirical research results confirm the effectiveness of performance-based contracts in practice. In the city of Porto (the case of Metro do Porto, operated by a private sub concessionaire under a PBC arrangement), the period from 2010 to 2016 demonstrated the following outcomes: passenger-kilometers increased by 10.9 %, while the volume of services provided grew by only 8.9 %, indicating a better alignment of supply with actual demand. Operating costs per passenger-kilometer decreased by 19.5 %, non-subsidized revenues increased by 23.7 %, and the cost coverage ratio excluding subsidies rose from 72 % to over 110 %. These results demonstrate that PBCs are capable of simultaneously improving service quality, operational efficiency, and the financial sustainability of urban public transport systems [10].

Contractual models for the provision of transport services differ substantially in terms of compensation structures, risk allocation, and the degree of operator involvement.

Nevertheless, the existence of a regulatory framework such as Regulation (EC) No 1370/2007 establishes a unified strategic direction for the development of relationships between public authorities and transport operators in the public transport sector. This approach is based on transparency, clearly defined obligations, measurable outcomes, and a strong orientation towards service quality.

The implementation of different types of contracts provides an effective tool for influencing both the quality of transport services and the operational performance of operators. However, no contractual model can ensure identical effects across different cities or countries, as each transport system operates under unique conditions, including passenger demand patterns, budgetary constraints, infrastructure characteristics, institutional capacity, and legal traditions.

Therefore, public service contracts should be designed individually for each country and each city, considering their specific needs, structural features, and strategic objectives for transport system development. Such an approach not only enables the adaptation of best European practices but also ensures a tangible, rather than purely formal, effect from their implementation.

At present, domestic researchers also devote considerable attention to the study of modernization of Ukraine's transport system in the context of European integration. Key research areas include the improvement of state transport policy, optimization of tariff-setting mechanisms, and the search for effective financial instruments to support urban transport operators.

Setting the task. Within the framework of Ukraine's European integration trajectory, the adaptation of the national compensation system to European standards becomes particularly relevant. According to Regulation (EC) No 1370/2007, which defines the rules for the provision of public passenger transport services, compensation to operators must be transparent, economically justified, and limited to the level of net costs incurred in the provision of transport services.

The aim of the study is to analyse contemporary approaches and practices for calculating compensation to transport operators in urban public transport, taking into account European experience and the requirements of Regulation (EC) No 1370/2007, in order to develop an effective mechanism of financial support for operators. This mechanism is intended to improve the quality of passenger transport services and ensure the sustainable development of urban mobility in Ukraine.

Presentation of the main material. At present, there is a significant mismatch between the existing Ukrainian legislation and modern European approaches to the organization of urban public transport. The regulatory and legal framework of Ukraine remains fragmented and outdated and therefore requires comprehensive updating and harmonization with EU directives and regulations [11].

Currently, the operation of public transport in Ukraine is regulated by three main legislative acts, namely: "On Railway Transport", "On Urban Electric Transport", and "On Automobile Transport" [12–14]. Each of these legal acts governs different modes of transport, which hinders their integration and synergy. This particularly affects municipal enterprises that provide passenger transport services using multiple modes of transport.

At the same time, many private operators providing urban passenger transport services operate on a self-financing basis. The compensation provided by municipalities for the carriage of certain privileged categories of passengers does not fully cover the operators' costs, while operators retain all revenues generated from fare-paying passengers. One of the most challenging issues in implementing contractual models in Ukraine concerns the calculation of compensation for transport services provided, as well as the mechanisms for

applying penalties and bonuses to ensure the required level of service quality and for defining contract durations.

In most cities, compensation calculation methods differ between trolleybuses and bus passenger transport services. For trolleybus routes, a contractual model is applied under which the operator retains fare revenues from ticket sales, while additional compensation is calculated based on the number of vehicle-kilometers operated and as the difference between economically justified costs and planned revenues (including compensation for privileged passengers). Formally, this is expressed through a formula of the following type

$$C_{Trolley} = (T \times Q_{km}) - (R_1 + R_2 + R_3) + C_1, \quad (1)$$

where T – approved calculated tariff for transport services (cost per one vehicle-kilometer of passenger transport by trolleybus), UAH/trolleybus-km; Q_{km} – volume of transport work over the reporting period, trolleybus-kilometers;

R_1 – revenues obtained from core operating active ties, namely the carriage of fare-paying passengers in urban transport, UAH; R_2 – net revenue generated from the provision of ancillary services in other areas of economic activity, UAH; R_3 – net financial difference associated with the carriage of passengers entitled to free travel on electric public transport, UAH; C_2 – compensation for cancelled or unperformed trips.

For bus routes, the current compensation practice also предусматривает that the operator retains fare revenues from ticket sales on its balance sheet, while the municipality provides compensation primarily for the carriage of privileged passenger categories.

$$C = P_{bus} \times T_{bus} \quad (2)$$

where P_{bus} – number of privileged passengers, according to data obtained from on-board accounting and validation devices installed in vehicles, passengers; T_{bus} – applicable fare per trip for a fare-paying passenger, UAH/passenger.

Such an approach creates inconsistencies between different modes of transport and generates a risk of “double financing” (fare revenues plus compensation), which complicates transparency and control over the use of public funds.

An analysis of existing compensation practices in Ukrainian cities has revealed the following shortcomings: fragmentation of compensation mechanisms across different transport modes; double payments; the absence of a unified methodology for calculating compensation for enterprises of different ownership forms and transport modes; insufficient linkage between compensation payments and performance indicators (KPI); and difficulties in adjusting compensation schemes in response to external factors such as inflation and fuel price fluctuations.

Based on the review of academic literature, the analysis of European experience in implementing public service contracts, and the assessment of the current state of Ukrainian legislation and compensation practices, the study proposes two alternative approaches to calculating compensation for transport operators that may be applied by Ukrainian cities in the context of public transport system reform.

The first option proposes the use of a contractual model in which compensation is calculated based on the volume of transport work performed. This contractual model предусматривает the transfer of all revenues generated from passenger fares to the balance sheet of public authorities (gross cost model).

Under this arrangement, the operator is remunerated for the actual kilometres operated, while all fare revenues are collected by the municipality. This approach strengthens public control, streamlines financial flows, and enables the introduction of bonus–penalty mechanisms linked to service quality.

The second option involves the application of a hybrid contractual model (gross cost + revenue sharing). This alternative system combines kilometre-based remuneration with partial retention of fare revenues by the operator. Such an approach preserves incentives for attracting a higher number of passengers, while simultaneously maintaining the level of control characteristic of the gross cost model.

In the study, each of these options is assessed against three key criteria:

- financial impact – projected municipal expenditures and revenue allocation;
- operational feasibility – applicability given the structure of the transport network and the level of digitalization;
- compliance with Ukrainian legislation – the degree of alignment with existing legal norms and the need for additional regulatory changes.

The core concept of the proposed contractual model based on compensation calculated according to the volume of transport work performed lies in the centralization of fare revenues (transfer of collected revenues from the operator to the municipality) and the payment of compensation to the operator based on operated kilometers, including an economically justified profit margin. At the same time, this option proposes the use of a single unified contractual model with a uniform compensation calculation principle for all modes of urban public transport.

$$C = ((P_{bus} \times KM_{bus}) + (P_{trolleybus} \times KM_{trolleybus})) + P_r - R^* + BON - PEN \quad (3)$$

where P_{bus} , $P_{trolleybus}$ – price per kilometer of operation for the respective mode, UAH/km; KM_{bus} , $KM_{trolleybus}$ – number of operated vehicle-kilometres, km; P_r – economically justified profit for the operator, UAH; R^* – total verified revenue earned by the operator from the provision of local public transport services during the month for which compensation is granted. This includes revenue from ticket sales, income from other activities related to the provision of local public transport services, any grants or other forms of revenue support to which the operator is entitled under the contract, as well as all other operator revenues associated with the public transport services covered by the contract, UAH; BON – performance bonus awarded to the operator upon achieving the agreed KPI threshold values, UAH; PEN – performance-related penalty imposed on the operator when key performance indicators fall below the agreed minimum threshold levels, UAH.

The advantages of applying a contractual model in which compensation is calculated based on the volume of transport work performed include: unification of approaches across transport modes; predictability of payments; incentives for operators to deliver the planned volume of transport services; and the ability to introduce KPI-based bonus–penalty mechanisms.

The disadvantages include the need for accurate mileage accounting and monitoring (GPS, reporting systems), periodic adjustment of rates influenced by external factors, and legislative adaptation.

The application of the second, hybrid contractual model is better aligned with the current legislative framework in Ukraine, while at the same time enabling the introduction of measures aimed at improving service quality. The proposed model combines partial retention of revenues by the operator (for example, revenues generated from bus route services) with kilometre-based payments for trolleybus services. At the same time, it introduces adjustable rates, a system of bonuses and penalties linked to compliance with defined performance indicators and explicitly accounts for an economically justified profit.

The objective of applying this contractual model is to balance the interests of municipalities and operators, preserving incentives for operators to increase passenger demand while simultaneously ensuring transparency and accountability in the use of public funds.

$$C = ((P_{\text{trolleybus}} \times KM_{\text{trolleybus}}) + P_r - R^*) + (P_{\text{bus}} \times T_{\text{bus}}) - PEN \quad (4)$$

where $P_{\text{trolleybus}}$ – price per kilometre of operation for trolleybus services, UAH/trolleybus-km; $KM_{\text{trolleybus}}$ – number of operated trolleybus-kilometres, trolleybus-km; P_r – economically justified profit for the operator, UAH; R^* – total verified revenue earned by the operator from the provision of local public transport services during the month for which compensation is granted. This includes revenue from the sale of travel documents, income from other activities related to the provision of local public transport services, any grants or other forms of revenue support to which the operator is entitled under the Contract, as well as all other revenues derived from activities related to the provision of public transport services covered by the Contract, UAH; PEN – performance-related penalty imposed on the operator when key performance indicators fall below the agreed minimum threshold values, UAH; P_{bus} – number of privileged passengers, according to data obtained from on-board accounting and validation devices installed in vehicles, passengers; T_{bus} – applicable fare per trip for a fare-paying passenger, UAH/passenger.

The advantages of the hybrid approach include greater flexibility in accounting for local conditions, a reduced risk of fully transferring demand-related risks to the operator, and a more balanced alignment of the interests of municipalities and operators. However, this approach entails more complex administration.

The application of penalty mechanisms in contracts for the provision of urban transport services is based on systematic quality monitoring and the recording of violations that affect service levels. The process consists of several sequential stages: approval of normative KPI values at the contractual level; monitoring compliance with these standards; documentation of violations; review by the responsible authority; decision-making regarding the application of penalties; and formal notification of the operator. The operator has the right to appeal the decision; however, if the violation is confirmed, the operator is obliged to pay the penalty within the specified timeframe.

The calculation of penalties depends on the nature and frequency of violations, their severity, and their potential impact on passengers. In most Ukrainian cities, similar principles are applied: classification of the type of violation (e.g. failure to adhere to the timetable or inadequate technical condition of vehicles), determination of the degree of deviation from established standards, and application of a base rate or a percentage of the compensation amount. In practice, Ukrainian cities employ various approaches, including fixed penalties (e.g. in Pryluky and Chernihiv), proportional reduction of compensation based on unperformed trips (Oleksandriia), contract termination in cases of systematic non-compliance with schedules (Kyiv), or substantial penalties for each instance of violation (Zaporizhzhia and Odesa).

The main criteria for imposing penalties include punctuality, service regularity, safety, comfort, accessibility, environmental performance, and passenger satisfaction. Within the proposed model, it is planned to apply two key KPIs—punctuality and comfort—which must be achieved at a minimum level of 95%. Performance deviations within the range of 85–95% result in a reduction of compensation, while values below 85% may lead to the absence of compensation.

Conclusions. The research conducted demonstrates that the effectiveness of modern urban passenger transport systems largely depends on how transparently and economically sound compensation mechanisms for operators are designed by public authorities. The analysis of European experience and academic research in the field of transport contracting indicates that successful public transport systems are based on clearly defined contracts linked to measurable quality indicators (KPIs) and combine transparent financing, risk allocation, and well-designed incentive and penalty mechanisms.

At present, the domestic system of compensation calculation in almost all Ukrainian cities remains fragmented, varies by mode of transport, and often creates conditions for “double financing,” which significantly complicates the control of public expenditures. These shortcomings are primarily driven by an outdated legislative framework, the absence of a unified methodology for compensation calculation, and a low level of integration of service quality monitoring systems.

Based on the analysis of European practices—particularly the implementation outcomes of Regulation (EC) No 1370/2007 and successful applications of performance-based contracting (PBC) models (e.g. Metro do Porto)—this study develops two alternative approaches to compensation design: a per-kilometre gross-cost model with centralized fare revenue collection and KPI-based bonuses and penalties; and a hybrid model that allows partial revenue retention by the operator and adjustment of calculated rates depending on service quality performance. The application of these models enables a gradual transition toward European public transport governance practices and contributes to the development of sustainable urban transport systems in Ukraine.

Summarizing the findings of the study, the following key conclusions can be drawn:

- there is no universal contract model; its structure must be adapted to the specific characteristics of each city, including passenger flow patterns and the institutional capacity of local authorities;
- the key factor for success is the use of KPIs, which ensures that compensation is linked to the actual quality of services rather than solely to the volume of transport work performed;
- bonus–penalty systems are particularly effective, especially when combined with a gross-cost contracting model;
- reforming the Ukrainian compensation system is critically necessary to align it with European standards and to ensure the financial sustainability of transport operators;
- the proposed models can already be implemented in Ukraine, and their pilot application would represent an important step toward adapting the national transport system to EU requirements.

References

1. Постанова Кабінету Міністрів «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.01.2026).
2. World Bank. Paris Handbook: Good Practices – Who Pays for What? Washington, 2024. 112 p. URL: https://ppp.worldbank.org/sites/default/files/202408/Paris_handbook_good_practices_who%20pays%20for%20what.pdf (дата звернення: 15.01.2025).
3. Virginia Bergamaschi Tavares, Shanna Trichès Lucchesi, Ana Margarita Larranaga, Helena Beatriz Bettella Cybis. Influence of public transport quality attributes on user satisfaction of different age cohorts. *Case Studies on Transport Policy Volume 9, Issue 3*, September 2021, Pages 1042-1050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.04.018>
4. Abenoza, Roberto F., Oded Cats, and Yusak O. Susilo. "Determinants of traveler satisfaction: Evidence for non-linear and asymmetric effects." *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. (2019): 339-356. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.09.009>
5. Regulation (EC) No 1370/2007 of the European Parliament and of the Council URL: https://www.legislation.gov.uk/eur/2007/1370/adopted?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 18.01.2026).
6. Study on economic and financial effects of the implementation of Regulation 1370/2007 on public passenger transport services URL https://transport.ec.europa.eu/document/download/ddab72c0-93a7-424d-89fd-a8970e115a1f_en?filename=2016-02-effects-implementation-regulation-1370-2007-public-pax-transport-services.pdf (дата звернення: 08.01.2026).

7. Sheng, D., & Meng, Q. Public bus service contracting: A critical review and future research opportunities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.102853>.
8. Hensher, David A. & Stanley, John. *Performance-based quality contracts in bus service provision. Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, vol. 37(6), pages 519-538. DOI: [10.1016/S0965-8564\(03\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(03)00006-5)
9. Sheng, Dian & Meng, Qiang, *Public bus service contracting: A critical review and future research opportunities. Research in Transportation Economics*, Elsevier, 2020, vol. 83(C). DOI: [10.1016/j.retrec.2020.100938](https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100938).
10. Coutinho dos Santos, M., Pinto, J. M., & Verga Matos, P. Performance-Based contracting of urban transport operation Services: Evidence from Porto's Light-Rail. *Case Studies on Transport Policy*, 16, 2024, Article 101193. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101193>.
11. Н.В. Потаман, О.О. Орда, О.М. Орда. Аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки / Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences», Вип. 10(41), Ч. II / Issue 10(41), Part II, 2024 – с.188-195. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195).
12. Закон України «Про залізничний транспорт» від 04.07.1996 № 273/96-ВР <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/c273/96-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 20.01.2026).
13. Закон України «Про міський електричний транспорт» від 29.06.2004 № 1914-IV <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text> (дата звернення 20.01.2026).
14. Закон України «Про автомобільний транспорт» від 05.04.2001 № 2344-III <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> (дата звернення 20.01.2026).

References

1. Postanova Kabinetu Ministriv «Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025-2027 rokakh» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 15.01.2026) [in Ukrainian].
2. World Bank. Paris Handbook: Good Practices – Who Pays for What? Washington, 2024. 112 p. URL: https://ppp.worldbank.org/sites/default/files/202408/Paris_handbook_good_practices_who%20pays%20for%20what.pdf (data zvernennia: 15.01.2025).
3. Virginia Bergamaschi Tavares, Shanna Trichês Lucchesi, Ana Margarita Larranaga, Helena Beatriz Bettella Cybis. Influence of public transport quality attributes on user satisfaction of different age cohorts. *Case Studies on Transport Policy* Volume 9, Issue 3, September 2021, Pages 1042-1050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.04.018>
4. Abenoza, Roberto F., Oded Cats, and Yusak O. Susilo. "Determinants of traveler satisfaction: Evidence for non-linear and asymmetric effects." *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. (2019): 339-356. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.09.009>
5. Regulation (EC) No 1370/2007 of the European Parliament and of the Council URL: https://www.legislation.gov.uk/eur/2007/1370/adopted?utm_source=chatgpt.com (data zvernennia: 18.01.2026).
6. Study on economic and financial effects of the implementation of Regulation 1370/2007 on public passenger transport services URL https://transport.ec.europa.eu/document/download/ddab72c0-93a7-424d-89fd-a8970e115a1f_en?filename=2016-02-effects-implementation-regulation-1370-2007-public-pax-transport-services.pdf (data zvernennia: 08.01.2026).
7. Sheng, D., & Meng, Q. Public bus service contracting: A critical review and future research opportunities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.102853>
8. Hensher, David A. & Stanley, John. *Performance-based quality contracts in bus service provision. Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, vol. 37(6), pages 519-538. DOI: [10.1016/S0965-8564\(03\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(03)00006-5)
9. Sheng, Dian & Meng, Qiang, *Public bus service contracting: A critical review and future research opportunities. Research in Transportation Economics*, Elsevier, 2020, vol. 83(C). DOI: [10.1016/j.retrec.2020.100938](https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100938).
10. Coutinho dos Santos, M., Pinto, J. M., & Verga Matos, P. Performance-Based contracting of urban transport operation Services: Evidence from Porto's Light-Rail. *Case Studies on Transport Policy*, 16, 2024, Article 101193. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101193>.
11. N.V. Potaman, O.O. Orda, O.M. Orda. Analiz aspektiv planuvannia staloi miskoi mobilnosti v konteksti yevrointehratsiinykh reform v Ukraini «Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky / Central

- Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences», Vyp. 10(41), Ch. II / Issue 10(41), Part II, 2024 – s.188-195. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195) [in Ukrainian].
12. Закон України «Pro zaliznychnyi transport» vid 04.07.1996 № 273/96-VR <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/c273/96-%D0%B2%D1%80#Text> (data zvernennia 20.01.2026) [in Ukrainian].
13. Закон України «Pro miskyi elektrychnyi transport» vid 29.06.2004 № 1914-IV <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text> (data zvernennia 20.01.2026) [in Ukrainian].
14. Закон України «Pro avtomobilnyi transport» vid 05.04.2001 № 2344-III <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> (data zvernennia 20.01.2026) [in Ukrainian].

Н. В. Потаман, доц., канд. техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

Ашраф Хамед, канд. техн. наук

A+S Consult, м. Дрезден, Німеччина

О. М. Орда

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

Адаптація Європейського досвіду нарахування компенсацій перевізникам у міському громадському транспорті в Україні

Метою статті є аналіз та узагальнення підходів до формування механізмів нарахування компенсацій перевізникам у системі міського громадського транспорту з урахуванням європейського досвіду та вимог Регламенту (ЄС) № 1370/2007. У роботі досліджуються сучасні моделі договірних відносин між органами влади та транспортними операторами, а також їх вплив на якість транспортних послуг. Особливу увагу приділено можливостям адаптації європейських практик до умов функціонування громадського транспорту в українських містах.

У статті проведено аналіз нормативно-правової бази Європейського Союзу у сфері організації публічних пасажирських перевезень, зокрема положень Регламенту (ЄС) № 1370/2007 та практики його імплементації в містах країн ЄС. Узагальнено результати наукових досліджень щодо ефективності моделей договорів типу gross cost, net cost і договорів, орієнтованих на результативність (performance-based contracting). Проаналізовано чинні механізми компенсації перевізникам в Україні та виявлено їх ключові недоліки, серед яких фрагментованість підходів, відсутність єдиної методики та слабка прив'язка фінансування до показників якості. На основі європейського досвіду запропоновано два альтернативні підходи до формування компенсацій: покілометрову gross-cost модель із централізацією доходів та використанням KPI, а також гібридну модель, що поєднує елементи gross cost і розподілу доходів між містом та перевізником. Запропоновані підходи оцінено за критеріями фінансового впливу, операційної реалізованості та відповідності чинному законодавству України.

Результати дослідження підтверджують, що ефективна система компенсацій у міському громадському транспорті має базуватися на чітких договірних відносинах, прозорому фінансуванні та використанні показників ефективності. Встановлено, що універсальної моделі договору не існує, а вибір механізму компенсації повинен враховувати специфіку міста та управлінські можливості органів влади. Запропоновані моделі створюють передумови для підвищення якості транспортних послуг і адаптації української системи громадського транспорту до європейських стандартів.

компенсація перевізникам, міський громадський транспорт, KPI, договори надання громадських послуг, Регламент (ЄС) № 1370/2007, якість транспортних послуг

Одержано (Received) 06.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 20.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026

Nataliya Rozhko, Prof., Dr. econ.sci., **Oleg Lyashuk**, Prof. Dr.tech.sci., **Yurii Vovk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Uliana Plekan**, Assoc. Prof. Ph.D. econ. sci., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

e-mail: rozhko18@googlemail.com

Integration of Standardized Warehouse Logistics in Ukraine Under Conditions of Structural and Cognitive Development

This paper examines the key features of standardized warehouse logistics and its implementation within the contemporary Ukrainian market, as well as the complex realities of logistics processes amidst global changes. Modern warehouse logistics, which previously relied on traditional management and communication methods, is now significantly influenced by cutting-edge technologies. Artificial intelligence, e-commerce, big data, automation, the Internet of Things (IoT), and blockchain are all rapidly being integrated into warehouse logistics operations and logistics systems, substantially improving their efficiency and adaptability to changing market conditions. The digitalization of logistics processes within the warehouse presents a challenge to the functioning of an organization's structural model.

The adoption of new technologies necessitates changes in management approaches and employee interactions, as well as demanding the development of new skills and competencies among staff. The construction of a comprehensive system for warehouse and logistics market provision drives changes in knowledge management, decision-making, and relationships among all organizational levels. Therefore, the aim of this work is to determine the main features of the modern system of standardized warehouse and logistics market provision under conditions of globalization, taking into account transformational changes and the circumstances of the state of martial law in the country.

warehouse logistics, logistics process, logistics system, warehouse logistics market, standardization of warehouse logistics, organizational structure, transformational changes, innovation, digitalization, digital technologies, logistics enterprises, business entities, innovative activity, digital logistics, globalization, intermodal transportation

Problem statement. The war in Ukraine has significantly altered the functioning of logistics processes in the country. Destroyed infrastructure, blocked ports, and constant security threats have become the new realities for businesses. From the first days of the full-scale invasion, it became clear that conventional logistics routes were no longer operational. During the first year of the war, approximately 30% of logistics and freight forwarding companies ceased their activities due to ruined infrastructure, fuel shortages, and risks to cargo. Logistics has always been a key component of the economy, and its importance has only increased during the war. The efficiency of goods delivery directly affects the operation of enterprises, the preservation of jobs, and the inflow of foreign currency earnings into Ukraine.

In the current challenging environment, marked by the instability of processes due to Russia's war in Ukraine, it is necessary to establish and streamline warehouse logistics processes. Most large companies and enterprises did not foresee the closure of borders and factories, which, in turn, led to delays in the supply of materials and raw resources. Therefore, in contemporary conditions, increasing the efficiency of warehouse logistics at the micro-, meso-, and macro-levels becomes a critical priority.

Analysis of key research and publications. Warehouse logistics is a concept firmly established in the business environment; consequently, it is unsurprising that a significant body of work is dedicated to this topic. This research spans the study of the concept itself, its practical applications, and its impact on other areas, such as cost optimization.

Specifically, researchers such as V.V. Volobuiev, I.B. Haliuk, Yu.I. Danko, O.H. Deineka, I.V. Konovalova, V.M. Kolosok, E.V. Krykavskiy, L.O. Kustrich, I.S. Lutsenko, N.O. Makarenko, N.I. Mykhailiyk, Yu.V. Ponomarova, O.M. Sumets, A.A. Cherevan, V.V. Shcherbyna, and others have studied issues in logistics. At the same time, a need exists for the implementation of standardized warehouse logistics and its application under conditions of martial law. This necessity is typically driven by new strategic objectives for warehouses, the requirement to implement modern technologies, changes in the external environment, and the imperative to operate effectively amidst intense competition. Based on this, we consider the issue of developing standardized warehouse logistics under conditions of martial law to be both topical and practically significant.

Formulation of the task. The objective of this article is to define the specific characteristics of establishing standardized warehouse logistics under conditions of martial law within the country, taking into account the ongoing transformational changes.

Presentation of the main material. Historically, Ukraine has possessed significant potential as a transit country due to its geographical location. Restoring this status will be a critical task in the post-war period. In this context, the development of warehousing technologies will play a decisive role. Modern warehouse management systems, digital solutions for cargo tracking, and the automation of logistics processes will enhance the efficiency and transparency of the industry.

As global statistics show, container trade is gradually growing every year (Fig. 1), and Ukrainian logistics as a whole has adapted to the new realities and is functioning successfully under military rule. This business sector is actively rebuilding, integrating its operations with continental and worldwide transit frameworks.

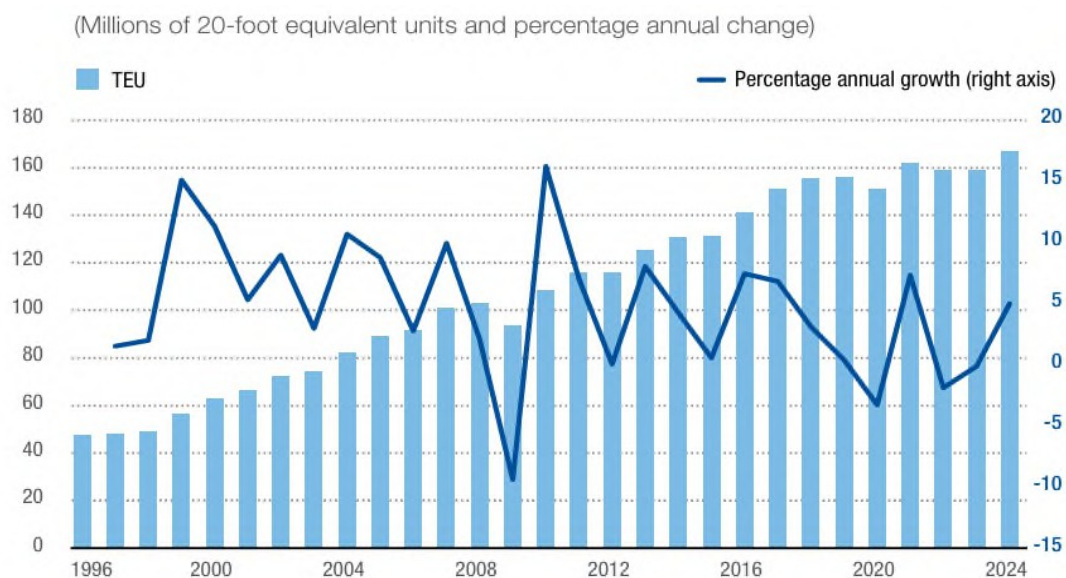


Figure 1 - Global container trade 1996-2024. [11]

According to Clarksons Research (2024a) predictions, container transport growth in tons will be 3% and 5% in 2025 and 2026, respectively. Therefore, despite the destabilizing impact of military operations, the market for standardized logistics services in Ukraine is characterized by relative resilience and gradual recovery. During the past several years, a positive trend contributing to the expansion of freight transport volumes, distinctly in the rail

and road transport segments, demonstrating the resilience and adjustment of supply chain networks amidst severe instability. This, in turn, necessitates the development of a warehouse logistics market in Ukraine.

Thus, the effect of establishing warehouse logistics is a measure that defines changes in production leading to reduced costs and increased resource utilization. Naturally, this benefit accrues to both producers and buyers. As a result of scale, revenue increases concurrently with a reduction in costs and an increase in production volume.

The effect of implementing warehouse logistics yields numerous advantages, among which the following can be noted:

- The aforementioned reduction in average total costs;
- Better access to sources of financing, such as loans;
- Greater opportunity to utilize new technologies and knowledge, associated with the acquisition of modern machinery and equipment primarily adapted for large-scale production volumes;
- The application of specialized management methods, adapted to production sectors where the enterprise achieves significant economies of scale;
- Employment of the labor force in a specific industry, thereby shaping the labor market in a particular region;
- A better division of labor;
- The ability to use more effective technologies (high-tech machinery involves high costs and is generally geared towards large-scale production);
- Specialized production and services (the more concentrated the market, the greater the specialization);
- Facilitated access to financial services (favoritism from creditors towards companies with larger assets);
- Extensive infrastructure (average costs in "dense markets").
- Greater external benefits from knowledge and reduced information asymmetry (a larger market generates more information);
- Better developed and complementary institutions, and lower costs;
- The transactional aspect, which consists of the legal protection of property rights.

For the purpose of developing warehouse logistics, we propose the enhancement of wholesale market operations – specifically, consolidation alongside logistics hubs situated within major regions. Manufacturers transport high-capacity goods toward these distribution nodes, from which distributors make purchases and subsequently allocate the inventory to regional retail networks.

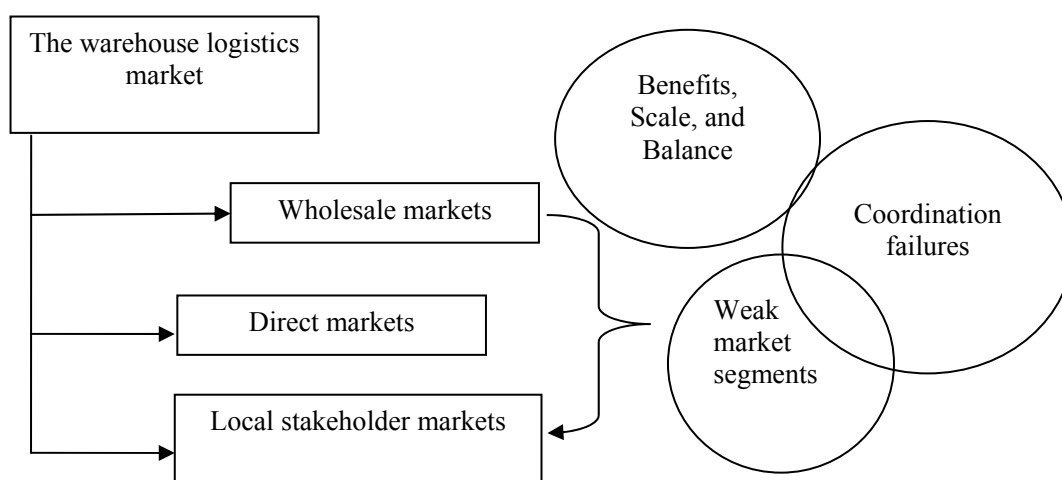


Figure 2 - The effect of establishing warehouse logistics * *Researched by the author

Buyers in warehouse logistics (terminal markets) include purchasers for retail chains or large-scale wholesalers. While specific operational needs can differ marginally, these entities seek certain fundamental attributes from their vendors:

- Substantial product quantities required from a single supplier, that alleviating the need to circumvent numerous small purchases.
- Additionally, reliable procurement stream that endures for an extended timeframe, ensuring to eliminate the necessity for constant sourcing of secondary suppliers.
- High-quality goods available for purchase aligned with current prevailing commercial rates. Such logistics hubs may additionally require diverse retail and bulk packaging options to meet diverse retailer needs.

Advantages of warehouse logistics:

- Contemporary commercial data remains typically accessible within the warehouse.
- Producers have the opportunity to connect with many potential buyers.
- Producers can sell large quantities of goods relatively expeditiously.

Frequent drawbacks linked with warehouse logistics include:

- Consumers typically approve only products of continuously maintained high quality.
- Purchasers often impose rigorous encasement specifications.
- Valuations reflect prevailing consumer rates are based on current retail market prices and might therefore vary significantly over time.
- Manufacturers bear the obligation of arranging transportation to the warehouse for their products.
- Producers must deliver products to the warehouse in relatively large quantities (i.e., truckloads).

Summarizing the above, we deem it necessary to direct efforts towards the development and implementation of a unified logistics market within a single regional center by establishing common standards and unifying them with international norms.

As an alternative to conventional warehouse buildings, some experts envision rapidly deployable structures, which can be useful when it is necessary to: deploy a warehouse, establish a production unit, rapidly expand premises, or relocate inventory. They do not require permits, assembly/disassembly takes more days, and installation is possible on any type of surface: solid ground, concrete, crushed stone, slabs, or asphalt. Furthermore, scaling the structure is possible, as it is a modular system where every construction element is certified according to EU standards.

These solutions are not new; similar projects have been implemented in Europe and Ukraine. However, they are particularly relevant now, given the extent of the damage sustained by warehousing and logistics infrastructure in Ukraine: 364,000 sq. m in the Kyiv region alone (according to CBRE Ukraine). Nearly 21% of the total volume of warehouse space in the Kyiv region has been completely or partially destroyed. Among these were facilities leased by retailers, logistics operators, manufacturing companies, and cold and pharmaceutical storage operators. The total area of warehouses that suffered partial destruction amounts to 164,000 sq. m [6].

The standardization of logistics could commence with the logistics market of the Western region of Ukraine. Logistics standardization is crucial for adapting to the gradual shifts in transportation mode utilization, moving from sea or air freight to intermodal transport.

The advantages of intermodal freight transport include:

- The ability to select an optimal route in terms of cost and delivery duration by utilizing various combinations.

- The capability to deliver goods directly to the customer's door.
- The potential to reduce transportation time.

Intermodal freight transport is most frequently used for long distances, as it allows for reductions not only in the supply period but also in cost, which is critically important for any entrepreneur.

To maintain substantial financial expansion through unified logistics market, logistics enterprises must comprehend their present logistical status, pinpoint their pertinent delivery routes, alongside resolve these complications via joint endeavors. Such endeavors encompass involve establishing standartilized distributional practices in the region, which assists in minimizing distributional expenditures while decreasing conveyance durations across entities by updating and uniformizing their distributional infrastructure, gear, and procedural methods.

The standardization of warehouse logistics in the market pertains to collaborative efforts to simplify and unify logistics equipment, including physical structures (for instance, depots and fulfillment hubs), handling apparatuses (such as forklifts), along with implements (for example, parcels, receptacles, and skids), in addition to the digital programs designed to facilitate distributional data, assets, and cash movements via synchronization and collaboration between procurement network associates

In this regard, it is appropriate to consider the seven guiding principles for standardization developed by the Standardization Committee of the International Organization for Standardization (ISO):

1. The goal of uniformization is averting gratuitous disarray and intricacy via the streamlining of societal functions.
2. Uniformization relies upon the consensus-based endeavors from every financial and societal domain.
3. The establishing of norms is directed at protecting the interests of the majority.
4. The establishing of norms ought to focus on chosen operations to be maintained.
5. Uniformization of norms undergoes evaluation alongside revision as required.
6. Normalization must consider the inherent characteristics of the item undergoing standardization.
7. The establishing of norms necessitates rigorous deliberation regarding consumer requirements for the product [9].

Based on these guiding principles, the primary objectives of harmonization of distribution processes encompass product containment, freight movement, cargo handling operations, **inventory holding**, and information and communication technologies (ICT) (Fig. 3).

The main principles of logistics standardization are highlighted below:

1. The harmonization of packaging systems pertains to the unification of packaging specifications dimensions, constituent materials, mass parameters, durability characteristics, handling administration, in addition to disposal.
2. Freight transportation standardization mainly concerns focused on the dimensional specifications of shipping containers as well as the railways and vehicles capable of accommodating palletized shipments.
3. Storage standardization is designed to unify common warehousing infrastructure, mechanized storage systems, racking structures, supply chain centers, cargo terminals, along with protective equipment and operational procedures.
4. The standardization of cargo handling involves orientation towards dimensional parameters, load capability, technical nomenclature, specifications and safety protocols related to lifts, carts, conveyors, pallets, as well as robotic systems.

5. The harmonization of ICT seeks to standardize digital data exchange systems (DDE), barcodes, identifier devices, logistics management platforms (LMP), their system integrations, and associated digital applications

Consequently, the effectiveness of warehouse logistics standardization and its condition is ensured by adherence to the principles of systematicity, feedback, optimality, and flexibility, as well as regulatory and legal support [10]. Striving to unify the process of warehouse logistics standardization, we propose considering the possibility of implementing leading practices of foreign states, including the member states of the European Union. Furthermore, given that the principles and guidelines of ISO standardization as best practices are broadly recognized by the global community, it is proposed to harmonize and consider ISO standardization procedures as a strategic framework for the effective execution of warehouse distributions regularization in Ukraine. Conventional ISO standardization processes begin through the submission of a proposal regarding the domains requiring standardization by means of Innovative Project Plan for warehouse logistics standards. However, it is appropriate here to also consider the factor that the standardization of logistics systems may cause multiple obstacles arising from significant divergences in commercial practices, cultural norms, infrastructural capacity, and regulatory frameworks.

In general, we propose directing efforts towards the formulation and execution of internal as well as international standards concerning the supply chain of apparatus, instruments, containmant matherials, warehousing, freight movement, cargo handling/unloading, together with ICT (Information and Communication Technologies), aligned with internationally recognized logistics frameworks, including ISO norms. However, such standards necessitate thorough planning and systematic coordination within the entire "manufacturer-intermediary-consumer" chain. It is advisable to pay attention to the effectiveness of the planning and conceptualization system for warehouse logistics standardization, as well as to raise the level of awareness regarding logistics standardization within the international logistics community.

Overall, within the framework of warehouse logistics standardization, it is also important considering the system of planning, delivery, and control system that governs the movement of tangible products, promotional materials, and data from the manufacturer all the way to the end consumer. The goal is to adddress client needs in tandem with obtaining a satisfactory margin.

Warehouse logistics' support for an enterprise has always played an important role in business. Among retail and wholesale enterprises, this logistical support extends farther than stock control and distribution activities, aiming to ensure one of the crucial factors for business success – it is a location's proximity to markets or supply sources. Logistics' support for the warehouse concerns key issues as planned geographical positioning, primary resources supply, and service quality benchmarks. In recent years, shifts in the business environment have compelled enterprices to address key important points when forming a business strategy: regulation policies, country's modern state of transport system, resource constrains, as well as technological development.

Comprehensive warehouse-logistics support for the market is presented generally in the form of Fig. 3. According to Fig. 4, comprehensive warehouse-logistics support is characterized by complex directions, hypotheses, and the application of various artificial intelligence and logistics tools for their interaction, and has a practical focus on supporting the domestic producer. In this case, the main directions of work for comprehensive warehouse-logistics support should be:

Artificial intelligence and data analytics increase repeat sales. Attracting new customers is always more expensive than retaining old ones. Mailings (e.g., email campaigns) effectively return users to the site—they come back to purchase the product.

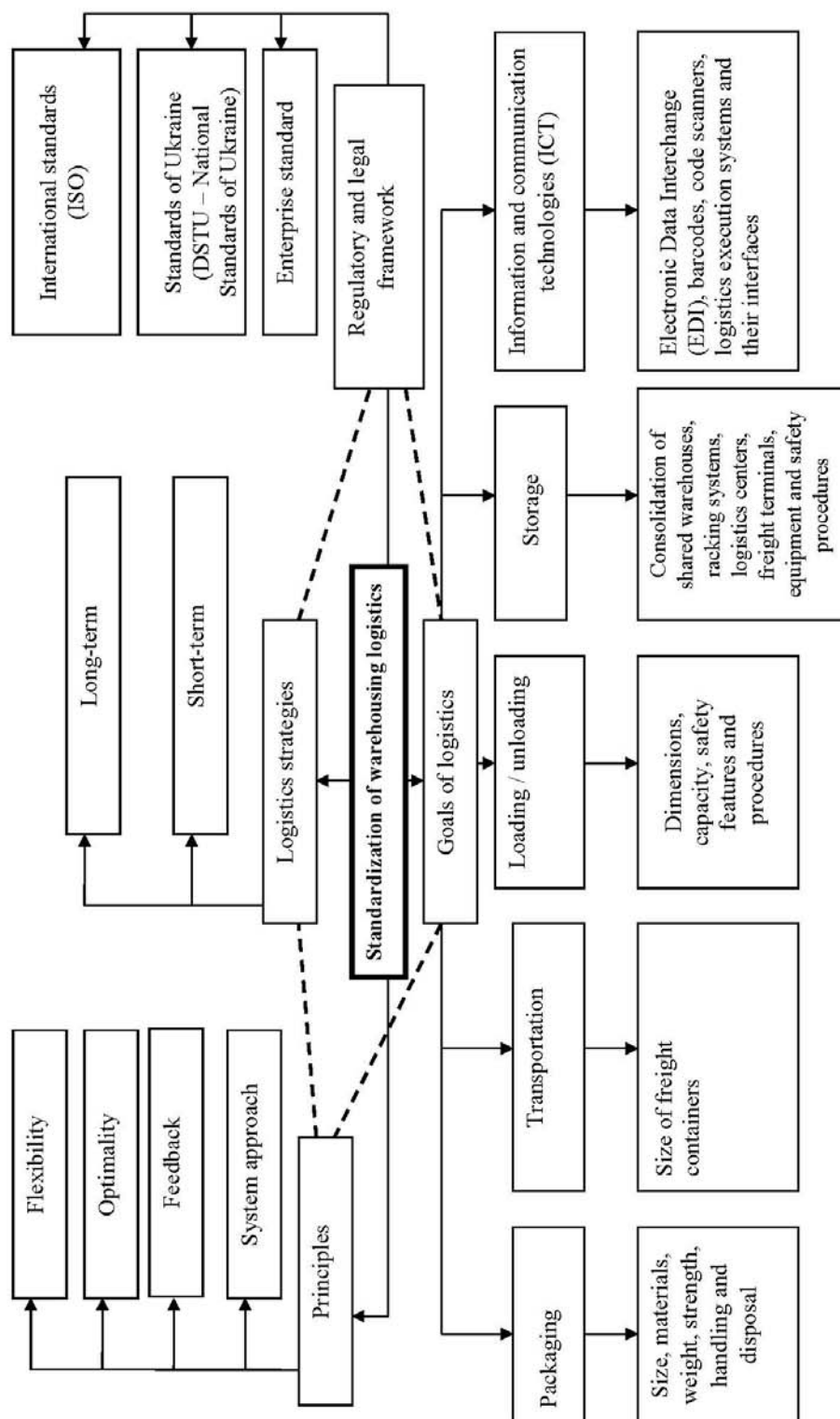


Figure 3 - The basic platform for building the standardization of warehouse logistics Systematized by the author

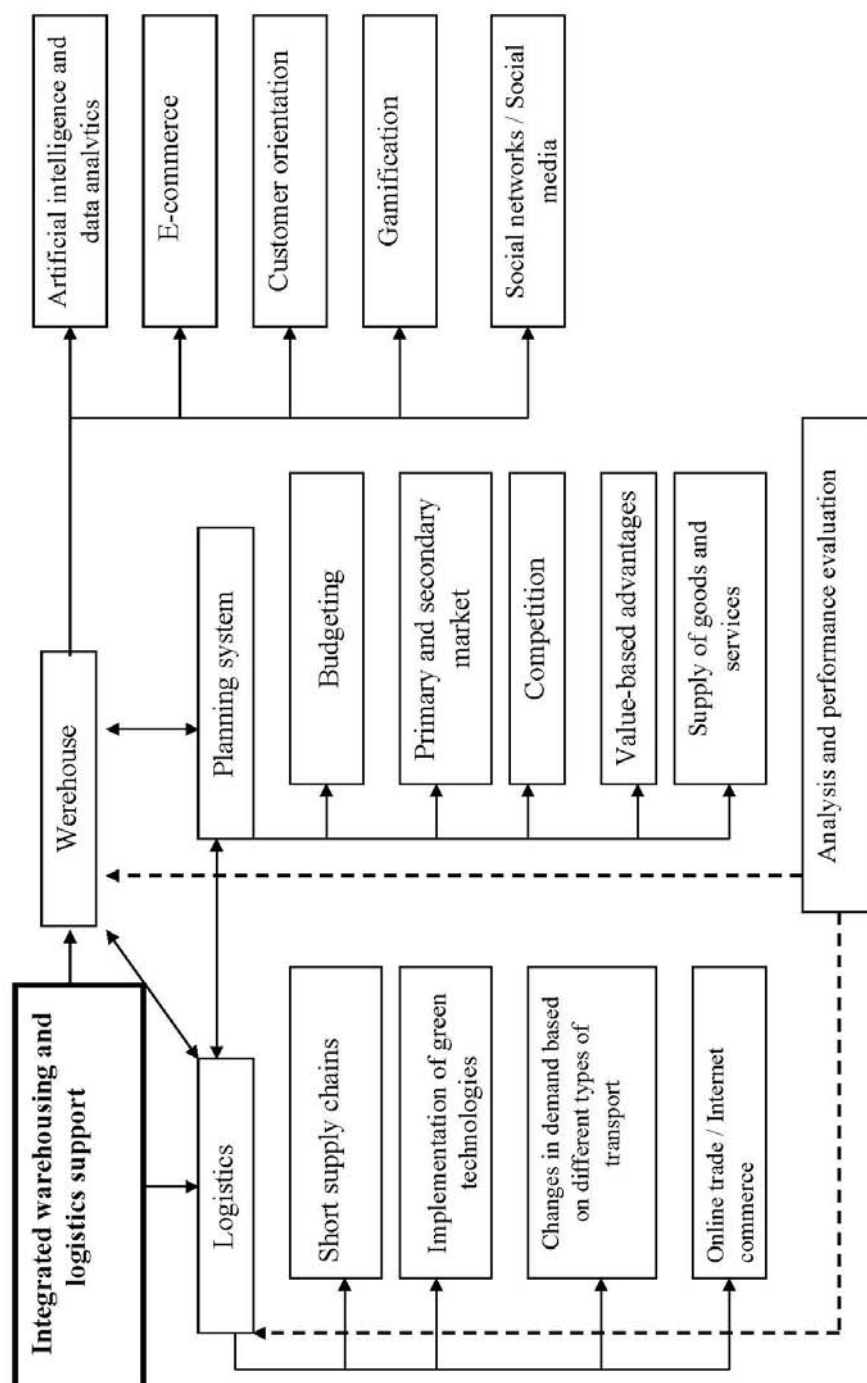


Figure 4 - Comprehensive warehouse-logistics support of the market. ** Formed by the author

E-commerce. Engaging sophisticated online tools facilitates the broadest reach of the intended audience, establishing meaningful engagement, which ensures the strong impact of this framework. Digitalization tools encompass all strategies, techniques, and approaches that enable reaching a broad audience and capturing the interest of prospective customers toward a company, brand, service, or a product. Frequently, a variety of tools are applied in parallel, which enables reaching the broadest possible audience and achieving strong promotional effectiveness. The selection of tools applied depends on the campaign objectives, its phase, the traits of the intended audience, the product being advertised, and other factors.

Customer centricity is found much less frequently in business practice and is often more the result of a manager's intuition than a deliberate step. However, modern market conditions encourage the transformation of this concept from a separate element into a business philosophy. Customer-centricity is a criterion that characterizes the capabilities and abilities of a company, oriented towards maximizing product sales volume and generating income by improving the quality of customer service. Customer-centricity is proactive; it does not arise with the appearance of a customer. For everything in the company to work this way, internal processes must be formed: correctly hiring and training employees, purchasing tools for working with clients, and designing offline and online contact points. A customer-centric business is designed for the long-term perspective and brings the owner stable income. The owner must make a choice about what they truly want: to simply make money quickly or to build a business system that will exist and develop for a long time. It must be understood that a customer-centric enterprise always invests first in one way or another, and then receives dividends for it. Conversely, if you save on customer-centricity, you will pay for it—perhaps not immediately, but it will definitely happen.

Gamification for users presents the service adoption (onboarding) process as a conscious gaming process, forcing a calculation of where effort is required from the user, where they can relax, what the user sees as an immediate goal, and how we can reward them for their work. Similar tools exist for retention: when the user should return to the service, why, how they will find out about it, and how to set a rhythm for the user. Gamification in business significantly helps to:

- increase sales volume thanks to bonus accrual and the customer's desire to spend them;
- build brand recognition;
- inform clients about product features or updates in a game format;
- expand the customer base and increase their loyalty;
- teach users how to interact with the program through games;
- stimulate clients to recommend the offered brand to friends.

Social networks. One of the main principles of warehouse logistics—meeting consumer needs and competently identifying the target audience—stimulates producers to promote brands on social networks. After all, it is there that users independently provide all the necessary data, starting from gender and age and ending with hobbies and interests. All that remains is to clearly define the target audience and engage in PR on social networks.

Within warehouse logistics, it is advisable to first pay attention to short supply chains, the implementation of green technologies, changes in demand across different transport modes, and internet trade.

Conclusions. In general, standardized warehouse logistics support must necessarily consider a system for planning and analyzing previous actions, strategies, market behavior, and so forth. It should be aimed at improving service and information dissemination. Consequently, individual clients see traditional "value" in standardized warehouse logistics as short service times, availability, and timely delivery. Customers, primarily within the scope of

logistical support, are increasing demands on logistics itself through requests for operational value-added tasks, such as packaging, barcoding, and information systems.

Therefore, comprehensive standardized warehouse-logistics support for the market is an integral process of state development that helps automate work processes, reduce the load on employees, improve communication, and optimize logistical processes. However, in practice, this process is a complex mechanism that requires comprehensive and planned implementation. Its future lies in the development of artificial intelligence and machine learning, the use of blockchain and the Internet of Things, the personalization and customization of processes, and an enhanced focus on the demands and needs of both producers and end consumers.

List of references

1. Аналіз ринку складської нерухомості України (грудень 2024 – червень 2025) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gisuvecon.com/main/108/analiz-rinku-skladskoyi-neruhomosti-ukrayini-gruden-2024-cherven-2025/>
2. Адамов В. Управління складом у воєнний час: зміни та виклики.[Електронний ресурс]. –Режим доступу: <https://www.c4r.eu/blog/logistics/upravlenie-skladskoy-logistikoy/>
3. Дейнека О.Г., Волобуєв В.В., Канна Л. Удосконалення логістичного менеджменту в умовах економічних перетворень. Інфраструктура ринку. 2019. Вип. 33. С. 166–170.
4. Інтерв'ю із CEO Zammler про виживання в умовах війни [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/interview/ukrainskaya-kompaniya-pod-bukvoyz-intervyu-s-seo-zammler-o-vyjivanii-v-usloviyah-voyny>
5. Підняти складську інфраструктуру можна за лічені тижні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://logist.fm/news/pidnyati-skladsku-infrastrukturu-mozhna-za-licheni-tizhni>
6. Гринів Н. Т., Равліковська А. А. Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні. Академічні візії. 2022. № 13. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/84> (дата звернення: 07.04.2024).
7. Куницька О.М., Гужевська Л.А. Теоретичні основи кросс-докінгу як технології роботи складу. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2011. № 82. С. 82–87. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2011_82_15
8. John J. Bartholdi III, Kevin R. Gue. The Best Shape for a Crossdock. TRANSPORTATION SCIENCE. May 2004. Vol. 38. No. 2. P 235–244. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www2.isye.gatech.edu/~jjb/papers/crossdock-shape.pdf>
9. Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko. The use of network intralogistics and fulfillment for the functioning of transport and warehouse complexes // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2023. Col.7(38), Part II
10. Щербина В.В., Борщенко О.В. Оцінка ефективності складської логістики підприємств. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2019. Вип. 4. С. 38–48.
10. Review of Maritime Transport 2024. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf

References

1. Analysis of the warehouse real estate market of Ukraine (December 2024 - June 2025) [Electronic resource]. – Access mode: <https://gisuvecon.com/main/108/analiz-rinku-skladskoyi-neruhomosti-ukrayini-gruden-2024-cherven-2025/>
2. Adamov V. Warehouse management in wartime: changes and challenges. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.c4r.eu/blog/logistics/upravlenie-skladskoy-logistikoy/>
3. Deineka O.H., Volobuiev V.V., Kanna L. Improvement of logistics management in the conditions of economic transformations. *Market infrastructure*. 2019. Iss. 33. pp. 166–170.
4. Interview with the CEO of Zammler about survival in war conditions [Electronic resource]. – Access mode: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/interview/ukrainskaya-kompaniya-pod-bukvoyz-intervyu-s-seo-zammler-o-vyjivanii-v-usloviyah-voyny>
5. Warehouse infrastructure can be raised in a matter of weeks [Electronic resource]. – Access mode: <https://logist.fm/news/pidnyati-skladsku-infrastrukturu-mozhna-za-licheni-tizhni>

6. Hryniv N. T., Ravlikovska A. A. Restructuring of logistics under martial law in Ukraine. *Academic visions*. 2022. No. 13. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/84> (date of access: 07.04.2024).
7. Kuniyska O.M., Huzhevska L.A. Theoretical foundations of cross-docking as a warehouse operation technology. *Automobile roads and road construction*. 2011. No. 82. pp. 82–87. [Electronic resource]. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/adidb_2011_82_15
8. John J. Bartholdi III, Kevin R. Gue. The Best Shape for a Crossdock. *TRANSPORTATION SCIENCE*. May 2004. Vol. 38. No. 2. pp. 235–244. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www2.isye.gatech.edu/~jib/papers/crossdock-shape.pdf>
9. Rozhko, N.Ya. (2020). Posluhy 3PL u mezhakh vidpovidalnoho lohistychnoho miksu. Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Ser. Ekonomichna. Yurydychna, Issue 25, 126–133 [in Ukrainian].
10. Shcherbyna V.V., Borshchenko O.V. Assessment of the effectiveness of warehouse logistics of enterprises. *Development of management and economic methods in transport*. 2019. Iss. 4. pp. 38–48.
11. Review of Maritime Transport 2024. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf

Н. Р. Рожко, проф., д-р екон. наук, **О. Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук, **Ю. О. Вовк**, доц., канд. техн. наук, **У. М. Плекан**, доц., канд. екон. наук, **О. П. Цюнь**, доц., канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

Інтеграція стандартизованої складської логістики в Україні в умовах структурного і когнітивного розвитку

В даній роботі розглядаються основні особливості стандартизованої складської логістики та її запровадження в умовах сучасного сьогодення на ринку України, а також складні реалії логістичних процесів в умовах глобалізаційних змін. Сучасна складська логістика, яка раніше базувалася на традиційних методах управління і комунікацій, сьогодні перебуває під значним впливом новітніх технологій. Штучний інтелект, електронна комерція, великі дані, автоматизація, інтернет речей, блокчейн - всі ці технології швидко впроваджуються в роботу діяльності складської логістики і логістичних систем, це суттєво покращує їхню ефективність і адаптивність до змінюваних умов ринку. Діджиталізація логістичних процесів на складі стає викликом для функціонування організаційної моделі підприємства.

Запровадження нових технологій потребує змін у підходах в управлінні, взаємодії між співробітниками, а також вимагає розвитку нових навичок і компетенцій у працівників. Побудова комплексної системи складського-логістичного забезпечення ринку спричиняє зміни в управлінні знаннями, прийнятті рішень, а також у взаєминах між усіма рівнями організації. Одже мета цієї роботи полягає у визначенні ключових особливостей сучасної системи стандартизованого складського-логістичного забезпечення ринку в умовах глобалізації з урахуванням трансформаційних змін та змін в умовах воєнного стану в країні.

складська логістика, логістичний процес, логістична система, ринок складської логістики, стандартизація складської логістики, організаційна структура, трансформаційні зміни, інноваційність, цифровізація, цифрові технології, логістичні підприємства, суб'єкти підприємництва, інноваційна діяльність, цифрова логістика, глобалізація, інтермодальні перевезення

Одержано (Received) 16.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 06.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Алієв Ельчин Бахтияр огли – старший дослідник, доктор технічних наук, професор кафедри інжинірингу технічних систем, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-4006-8803, e-mail: aliev@meta.ua.

Elchyn Aliiev – Senior Researcher, Doctor in Technics (Doctor of Technic Sciences), Professor Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-4006-8803, e-mail: aliev@meta.ua.

Аулін Віктор Васильович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: AulinVV@gmail.com.

Viktor Aulin – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-120X>, e-mail: AulinVV@gmail.com.

Ашраф Хамед – кандидат технічних наук, старший експерт з транспорту та мобільності, незалежний міжнародний транспортний радник, A+S Consult, м. Дрезден, Німеччина, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7597-7581>, e-mail: drashrafhamed@gmail.com.

Ahraf Hamed – PhD in Engineering Sciences, Senior Transport and Mobility Expert, Independent International Transport Advisor, A+S Consult, Dresden, Germany, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7597-7581>, e-mail: drashrafhamed@gmail.com.

Бажан Ігор Миколайович – аспірант кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4391-9084>, e-mail: igor23_81@ukr.net, bazhanigor23@gmail.com.

Ihor Bazhan – PhD student at the Department of Agricultural Machinery, Central Ukrainian National Technical University (Central Ukrainian National Technical University, 8, Prospekt Universytetskyi, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4391-9084>, e-mail: igor23_81@ukr.net, bazhanigor23@gmail.com.

Байцан Віктор Григорович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3519-9090>, e-mail: v.baitsan@landtech-ukraine.com.

Viktor Baitsan - PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3519-9090>, e-mail: v.baitsan@landtech-ukraine.com.

Барабанов Олександр Валерійович – доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, ORCID: 0009-0009-2434-6085, e-mail: alex1464b@gmail.com.

Oleksandr Barabanov – Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, ORCID: 0009-0009-2434-6085, e-mail: alex1464b@gmail.com.

Бойко Андрій Григорович - аспірант кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7293-4326>, e-mail: andreyboyko1976@gmail.com.

Andriy Boyko - postgraduate student of Transportation Technologies Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7293-4326>, e-mail: andreyboyko1976@gmail.com.

Бойко Володимир Андрійович – кандидат технічних наук, викладач кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9240-0303>, e-mail: boykovolodymyr24@gmail.com.

Volodymyr Boiko – PhD (Candidate of Technical Sciences), lecturer of the department of transport and logistics, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9240-0303>, e-mail: boykovolodymyr24@gmail.com.

Бойко Марія Вікторівна – кандидат сільськогосподарських наук, магістрант групи ЛАТ-25мз, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0542-9765>, e-mail: maryaulina@gmail.com.

Mariia Boiko – PhD in Agricultural Biotechnology (Candidate of Agricultural Sciences), Master's Student of group LAT-25mz, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0542-9765>, e-mail: maryaulina@gmail.com.

Бреславський Олег Ігорович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні за спеціальністю «Інженерія програмного забезпечення», Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5164-2913>, e-mail: breslavskyi.oleh@chnu.edu.ua.

Oleh Breslavskyi – PhD student in Software Engineering, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5164-2913>, e-mail: breslavskyi.oleh@chnu.edu.ua.

Брикса Андрій Олегович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3223-0682>, e-mail: brao@ukr.net.

Andriy Bryksa – PhD student in Industrial mechanical engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3223-0682>, e-mail: brao@ukr.net.

Бучинський Володимир Михайлович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9680-5426>, e-mail: knowledgebasis@gmail.com.

Volodymyr Buchinsky – PhD student in Industrial mechanical engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9680-5426>, e-mail: knowledgebasis@gmail.com.

Васильковський Олексій Михайлович – професор, кандидат технічних наук, завідувач кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9590-742X>, e-mail: olexa74@ukr.net.

Oleksii Vasylovskyi – Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9590-742X>, e-mail: olexa74@ukr.net.

Висоцька Вікторія Анатоліївна – доцент, доктор технічних наук, професор кафедри «Інформаційних систем і мереж», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, ORCID: 0000-0001-6417-3689, e-mail: victoria.a.vysotska@lpnu.ua.

Victoria Vysotska – Associate Professor, Doctor in Information Technology (Doctor of Technical Sciences), Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: 0000-0001-6417-3689, e-mail: victoria.a.vysotska@lpnu.ua.

Вовк Юрій Ярославович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: 0000-0001-8983-2580, e-mail: sepd.tntu@gmail.com.

Yurii Vovk – Associate Professor, Candidate in Technical Sciences, Associate Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: 0000-0001-8983-2580, e-mail: sepd.tntu@gmail.com.

Вовнянко Богдан Геннадійович – аспірант кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9332-4927>, e-mail: b.vovnyanko@ukr.net, b.vovnyanko@kernel.ua.

Bohdan Vovnianko – PhD student at the Department of Agricultural Machinery, Central Ukrainian National Technical University (Central Ukrainian National Technical University, 8, Prospekt Universytetskyi, Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9332-4927>, e-mail: b.vovnyanko@ukr.net, b.vovnyanko@kernel.ua.

Гаркуша Микола Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua, (096) 6287905.

Mykola Harkusha - Associate Professor, PhD in Highways and Airfields (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>, e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua, (096) 6287905.

Гвоздецький Володимир Миколайович – старший дослідник, доктор технічних наук, завідувач лабораторії газотермічних методів наплення покриттів відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2956-5182>, e-mail: gvosdetcki@gmail.com.

Volodymyr Hvozdetckii – Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Thermal Spray Coating Methods of the Department of Materials Science Foundations of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2956-5182>, e-mail: gvosdetcki@gmail.com.

Гевко Іван Богданович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Ivan Hevko - Professor, Doctor of Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5170-0857>, e-mail: gevkoivan1@ukr.net.

Гевко Ігор Богданович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Бережанський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Бережани, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1984-6822>, e-mail: gevkoigor1@gmail.com.

Igor Hevko - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Road Transport, Berezhany Professional College of the National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Berezhany, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1984-6822>, e-mail: gevkoigor1@gmail.com.

Головатюк Андрій Олександрович – здобувач ступеню “доктор філософії” зі спеціальності F7 – Комп’ютерна інженерія, Хмельницький Національний Університет, Хмельницький, Україна, ORCID: 0009-0002-4543-7495, e-mail: golovatiukao@gmail.com.

Andrii Holovatiuk – Doctor of Philosophy student, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: 0009-0002-4543-7495, e-mail: golovatiukao@gmail.com.

Голуб Дмитро Вадимович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4984-1161>, e-mail: dimchik529@gmail.com.

Dmytro Holub - Associate Professor, PhD of Transport Technologies (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4984-1161>, e-mail: dimchik529@gmail.com.

Грасовник Василь Юрійович – аспірант кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7375-8790>, e-mail: grasovnyk@gmail.com.

Vasyl Grasovnyk – Postgraduate student of the Mechanical Engineering Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7375-8790>, e-mail: grasovnyk@gmail.com.

Гриньків Андрій Вікторович – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4478-1940>, e-mail: AVGrinkiv@gmail.com.

Andrii Hrynkiv – Senior Researcher, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Lecturer of the Department of Machinery Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4478-1940>, e-mail: AVGrinkiv@gmail.com.

Гриценко Карина Олександрівна – здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні вищої освіти за спеціальністю «Транспортні технології (за видами)», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2093-3161>, e-mail: hrytsenkokrn28@ukr.net.

Karina Hrytsenko – higher education student at the second (master's) level of higher education in the specialty «Transport Technologies (by type)», Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2093-3161>, e-mail: hrytsenkokrn28@ukr.net.

Гудь Віктор Зіновійович – доцент, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5312-526X>, e-mail: vic_g@ukr.net.

Victor Gud – Associate Professor, Doctor of Science, Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5312-526X>, e-mail: vic_g@ukr.net.

Гуральник Олександр Борисович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1175-8726>, e-mail: guruaalexua@gmail.com.

Oleksandr Huralnyk – PhD student in Computer Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1175-8726>, e-mail: guruaalexua@gmail.com.

Гурський Вадим Юрійович – здобувач вищої освіти на другому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, e-mail: nighttima@gmail.com.

Vadym Hurskyi – Master's student in Computer Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, e-mail: nighttima@gmail.com.

Давиденко Олександр Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>, e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, (050) 4713399.

Oleksandr Davydenko - Associate Professor, PhD in Construction Mechanics (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Tunnel Bridges and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0176-3256>, e-mail: oleksandr.davydenko@ntu.edu.ua, (050) 4713399.

Довбуш Анатолій Дмитрович – старший викладач, старший викладач кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6656-9150>, e-mail: anatoliydowbush@gmail.com.

Anatoliy Dovbush – Senior Lecturer, Senior Lecturer of the Department of Technical Mechanics and Agricultural Machinery, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6656-9150>, e-mail: anatoliydowbush@gmail.com.

Довбуш Тарас Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8354-7276>, e-mail: tarasowbush@gmail.com.

Taras Dovbush - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Agricultural Machinery, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8354-7276>, e-mail: tarasowbush@gmail.com.

Доля Костянтин Вікторович – доцент, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4693-9158>, e-mail: k.v.dolia@gmail.com.

Kostiantyn Dolia – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4693-9158>, e-mail: k.v.dolia@gmail.com.

Доренський Олександр Павлович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua.

Oleksandr Dorenskyi – Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Cybersecurity and Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-7625-9022>, e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua

Драгобецький Володимир Вячеславович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9637-3079>, e-mail: kafedra.tehmash@gmail.com.

Volodymyr Dragobetskii - Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department Mechanical engineering, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9637-3079>, e-mail: kafedra.tehmash@gmail.com.

Дячун Андрій Євгенович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Andrii Dyachun – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Mechanical Engineering Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1354-9468>, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.

Загорянський Володимир Георгійович – доцент, доктор технічних наук, професор кафедри транспортних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5607-7571>, e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Volodymyr Zahorianskyi – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Transport Technologies Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5607-7571>, e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Задорожна Христина Романівна – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1310-6467>, e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com.

Khrystyna Zadorozhna – Senior Research Associate, Ph.D. Senior Researcher of the Department of Materials Science Foundations of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1310-6467>, e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com.

Зубко Владислав Миколайович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри агроінжинірингу, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна. ORCID: 0000-0002-2426-2772, e-mail: vladyslav.zubko@snau.edu.ua.

Vladyslav Zubko - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agroengineering, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine. ORCID: 0000-0002-2426-2772, e-mail: vladyslav.zubko@snau.edu.ua.

Іванов Олег Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Будівництва та професійної освіти», Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-9913>, e-mail: oleg.ivanov@pdau.edu.ua.

Oleg Ivanov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Vocational Education, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-9913>, e-mail: oleg.ivanov@pdau.edu.ua.

Йовченко Алла Василівна – кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7069-1092>, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua.

Alla Yovchenko – PhD tech. sci, senior lecturer of Department of Automobiles and Technology of Their Operation, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7069-1092>, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua.

Карнаух Сергій Григорович – доцент, доктор технічних наук, завідувач кафедри основ проєктування машин, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна, ORCID: 0000-0003-2878-4065, e-mail: karnaukh.sergii@gmail.com.

Serhii Karnaukh – Associate Professor, Doctor of Science in Engineering, Head of the Department of Fundamentals of Machine Design, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine, ORCID: 0000-0003-2878-4065, e-mail: karnaukh.sergii@gmail.com.

Качурівський Володимир Орестович – доцент, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та вищої математики, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7357-8706>, e-mail: kv.orestovich@gmail.com.

Volodymyr Kachurivskiy – Associate Professor, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technology and Higher Mathematics, Separate Structural Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Berezhany Agrotechnical Institute”, Berezhany, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7357-8706>, e-mail: kv.orestovich@gmail.com.

Качурівська Ганна Михайлівна – доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та вищої математики, Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2710-4343>, e-mail: anna.kachurivska@gmail.com.

Hanna Kachurivska – Associate Professor, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technology and Higher Mathematics, Separate Structural Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine “Berezhany Agrotechnical Institute”, Berezhany, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2710-4343>, e-mail: anna.kachurivska@gmail.com.

Качур Артем Вячеславович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Комп’ютерна інженерія», Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4658-2056>, e-mail: kachurav@khnmu.edu.ua.

Artem Kachur – PhD student in Computer Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4658-2056>, e-mail: kachurav@khnmu.edu.ua.

Кічура Руслан Петрович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: romnik83@ukr.net.

Ruslan Kichura – PhD student in Road Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: romnik83@ukr.net.

Кобець Олександр Миколайович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5334-0133>, e-mail: ddau-shmk@ukr.net.

Oleksandr Kobets – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Tractors and Agricultural Machinery, Dnipro state agrarian and economic university, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-5334-0133>, e-mail: ddau-shmk@ukr.net.

Ковальов Сергій Григорович – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3922-8697>, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Serhii Kovalov – PhD in Pedagogy (Candidate of Pedagogical Sciences), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3922-8697>, e-mail: kovalyovserggr@ukr.net.

Козак Іван Володимирович – аспірант кафедри «Інформаційних систем і мереж», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-4953-2816>, e-mail: ivan.v.kozak@lpnu.ua.

Ivan Kozak – PhD student of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4953-2816>, e-mail: ivan.v.kozak@lpnu.ua.

Козак Світлана Володимирівна – доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних технологій та технічного сервісу, Національний університет водного господарства та

природокористування, м. Рівне, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3204-1861>, e-mail: s.v.kozak@nuwm.edu.ua.

Svetlana Kozak – Associate Professor, PhD in Economics Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Technologies and Technical Service, National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3204-1861>, e-mail: s.v.kozak@nuwm.edu.ua.

Козлов Ростислав Русланович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Матеріалознавство», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>, e-mail: rovrost@gmail.com.

Rostyslav Kozlov – student in Materials Science, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>, e-mail: rovrost@gmail.com.

Корецька Людмила Олександрівна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4284-4936>, e-mail: koretskal@khmnu.edu.ua.

Liudmyla Koretska – Associate Professor, PhD in technical sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Information Systems Department, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4284-4936>, e-mail: koretskal@khmnu.edu.ua.

Косякевич Дмитро Петрович – аспірант кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4806-4189>, kosykdimon@gmail.com.

Dmytro Kosyakevych – PhD Student (Postgraduate Student) at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4806-4189>, e-mail: kosykdimon@gmail.com.

Котов Борис Іванович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії і системотехніки, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>, email: eetsapk@pdatu.edu.ua.

Borys Kotov – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering and Systems Engineering, Institution of Higher Education "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-3025>, email: eetsapk@pdatu.edu.ua.

Крохмаль Владислав Олександрович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4019-7465>, e-mail: vladyslav.krokhmal@pdau.edu.ua.

Vladyslav Krokhmal – Higher education applicant at the third (educational and scientific) level of higher education, specialty "Industrial Machinery Engineering", Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4019-7465>, e-mail: vladyslav.krokhmal@pdau.edu.ua.

Кудринський Ростислав Борисович – старший дослідник, кандидат технічних наук, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва, Національна академія аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7742-7617>

Rostyslav Kudrynetskyi – Senior Researcher, PhD in Engineering, Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-7742-7617>

Кузьмич Альвіан Ярославович – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3102-0840>, email: akuzmich75@gmail.com

Alvian Kuzmich – senior researcher, candidate of technical sciences, senior research fellow of the department of mechanical and technological problems of harvesting and post-harvest processing of grain and oilseed crops, Institute of Mechanics and Automation of Agro-industrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3102-0840>, email: akuzmich75@gmail.com

Кульова Дар'я Олександрівна – доктор філософії, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6727-5357>, e-mail: d.coolava@gmail.com.

Daria Kulova – PhD in Technical Sciences (Transport Technologies), Senior Lecturer at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-6727-5357>, e-mail: d.coolava@gmail.com.

Ладизенський Едуард Дмитрович – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю «Транспортні технології», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0004-8992-9402> e-mail: ladizenskiy@gmail.com.

Eduard Ladyzhenskiy – PhD student in Transport Technologies, State Higher Educational Institution “Priazov National Technical University”, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0004-8992-9402> e-mail: ladizenskiy@gmail.com.

Лепенко Тарас Григорович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Агроінженерії та автомобільного транспорту», Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8055-6698>, e-mail: taras.lapenko@pdau.edu.ua.

Taras Lapenko – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Agroengineering and Automobile Transport, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8055-6698>, e-mail: taras.lapenko@pdau.edu.ua.

Левкович Михайло Генадійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6793-8736>, e-mail: levkovmin@gmail.com.

Mykhailo Levkovich - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6793-8736>, e-mail: levkovmin@gmail.com.

Лепеть Євген Іванович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0482-538X>, e-mail: sadjem1990@gmail.com.

Yevhen Lepet – PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Dnipro state agrarian and economic university, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0482-538X>, e-mail: sadjem1990@gmail.com.

Лешенко Сергій Миколайович – доцент, кандидат технічних наук, декан агротехнічного факультету, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9339-4691>, e-mail: serafsgm@ukr.net, leshchenkosm@kntu.kr.ua.

Serhii Leshchenko – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Dean of the Faculty of Agronomy, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9339-4691>, e-mail: serafsgm@ukr.net, leshchenkosm@kntu.kr.ua.

Лисенко Сергій Володимирович – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедри ЕРМ Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Serhii Lysenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of ERM, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-0845-7817>, e-mail: sv07091976@gmail.com.

Лисенко Сергій Миколайович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-8747>, e-mail: sirogyk@ukr.net.

Sergii Lysenko – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Computer Engineering and Information Systems Department, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-8747>, e-mail: lysenkos@khmnu.edu.ua.

Лівіцький Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, асистент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,

Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-4463>, e-mail: Livitskyi885@gmail.com.

Oleksandr Livitskyi – PhD (Candidate of Technical Sciences), Assistant Lecturer at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-4463>, e-mail: Livitskyi885@gmail.com.

Лісецький Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри надійності техніки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0009-0002-2664-3664>, e-mail: forestvitaliy@gmail.com.

Vitalii Lisetskyi – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Equipment Reliability, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0002-2664-3664>, e-mail: forestvitaliy@gmail.com.

Лузан Олена Романівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7678-0635>, e-mail: luzanolena@gmail.com.

Olena Luzan – PhD of technical sciences (Candidate of Technical Sciences), Assistant of Agricultural Engineering Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7678-0635>, e-mail: luzanolena@gmail.com.

Лузан Петро Григорович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-999X>, e-mail: luzanpg@gmail.com.

Luzan Petro – Associate Professor, PhD of technical sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Agricultural Engineering Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-999X>, e-mail: luzanpg@gmail.com.

Лук'яненко Олександр Геннадійович – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6642-2300>, e-mail: alukanenko246@gmail.com.

Alexander Luk'yanenko – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Materials Science Foundations of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6642-2300>, e-mail: alukanenko246@gmail.com.

Ляшук Олег Леонтійович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Oleg Lyashuk – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-8568>, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Манько Єгор Валерійович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2413>, e-mail: evm0996496486@gmail.com.

Yehor Manko – PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2413>, e-mail: evm0996496486@gmail.com.

Маркович Сергій Іванович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2360>, e-mail: marko60@ukr.net.

Sergii Markovych – associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2360>, e-mail: marko60@ukr.net.

Матвієнко Олександр Олександрович – здобувач наукового ступеня доктора наук, доцент, кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5408-8293>, e-mail: richdad.ua@gmail.com.

Oleksandr Matviienko – Doctoral Student, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5408-8293>, e-mail: richdad.ua@gmail.com.

Мельник Валентина Іванівна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри надійності техніки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0009-0008-0269-2326>, e-mail: melnik@nubip.edu.ua.

Valentyna Melnyk – PhD in Economics Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Equipment Reliability, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0008-0269-2326>, e-mail: melnik@nubip.edu.ua.

Мельник Віталій Анатолійович – аспірант відділу механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2383-9572>, email: Vitalii.Melnyk@claas.com.

Vitaly Melnyk – postgraduate student of the Department of Mechanical and Technological Problems of Harvesting and Post-Harvest Processing of Grain and Oilseed Crops, Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2383-9572>, email: Vitalii.Melnyk@claas.com.

Мельнікова Юлія Ігорівна – аспірант кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній, м.Харків, старший викладач кафедри «Управління на транспорті», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>, e-mail: Melnikova.yu.i@nmu.one.

Yuliia Melnikova – PhD student Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, Senior Lecturer of Transport Management Department, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>, e-mail: Melnikova.yu.i@nmu.one.

Молоштан Дмитро Васильович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-8541>, e-mail: moloshtandima@gmail.com.

Dmytro Moloshtan - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Transport Technologies, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-8541>, e-mail: moloshtandima@gmail.com.

Музилюв Дмитро Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8540-6987>, e-mail: murza_1@ukr.net.

Dmitriy Muzylyov - Associate Professor, PhD in Transport System (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8540-6987>, e-mail: murza_1@ukr.net.

Мутель Наталія Миколаївна - викладач спецдисциплін, Кропивницький будівельний фаховий коледж, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3995-2752>, e-mail: mutelnatalia@gmail.com.

Nataliia Mutel - special subjects' teacher, Kropyvnytskyi Construction Vocational College, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3995-2752>, e-mail: mutelnatalia@gmail.com.

Недільський Дмитро Сергійович – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5031-3953>, e-mail: dimanedelya9642@gmail.com.

Dmytro Nedelsky – a graduate of the third (educational and scientific) level of higher education, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5031-3953>, e-mail: dimanedelya9642@gmail.com.

Никитюк Андрій Георгійович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Тернопільський національний технічний

університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9408-228X>, e-mail: knowledgebasis@gmail.com.

Andriy Nikityuk – PhD student in Industrial mechanical engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9408-228X>, e-mail: buchynskiybuchynskiy.v@gmail.com.

Нічепорук Андрій Олександрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7230-9475>, e-mail: andrey.nicheporuk@gmail.com.

Andrii Nicheporuk – Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Computer engineering and information systems department, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-7230-9475>, e-mail: andrey.nicheporuk@gmail.com.

Новицький Андрій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри надійності техніки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7789-8531>, e-mail: novytskyi@nubip.edu.ua.

Andriy Novitskyi – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Equipment Reliability, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-7789-8531>, e-mail: novytskyi@nubip.edu.ua.

Новицький Павло Сергійович – аспірант кафедри комп'ютеризованих систем автоматики, Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національного університету «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7300-5262>, email: pavlo.s.novitskyi@lpnu.ua.

Pavlo Novitskyi – PhD student of the Department of Computerized Automation Systems, Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7300-5262>, email: pavlo.s.novitskyi@lpnu.ua.

Новицький Юрій Андрійович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1115-1747>, e-mail: Novickii_yurka@ukr.net.

Yuri Novitskyi - PhD student in Industry Engineering, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1115-1747>, e-mail: Novickii_yurka@ukr.net.

Олійніченко Любов Сергіївна – доцент, кандидат техн. наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9351-6265>, e-mail: loga_lubov@ukr.net.

Lubov Oliynichenko – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9351-6265>, e-mail: loga_lubov@ukr.net.

Остапчук Юлія Олександрівна – аспірант кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>, e-mail: juli.biluk97@gmail.com.

Ostapchuk Yuliia – graduate student of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7826-364X>, e-mail: juli.biluk97@gmail.com.

Орда Олександр Миколайович – аспірант кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9066-5407>, e-mail: anturrium1@gmail.com.

Orda Oleksandr – PhD student of the Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9066-5407>, e-mail: anturrium1@gmail.com.

Павленко Олексій Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4237-4310>, e-mail: ttpov@ukr.net.

Olexiy Pavlenko - Associate Professor, PhD in Transport System (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Transportation Technologies Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4237-4310>, e-mail: ttpov@ukr.net.

Папінко Андрій Іванович – кандидат економічних наук, викладач кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8515-9376>, e-mail: a.papinko@wunu.edu.ua.

Andrii Papinko – PhD (Candidate of Economic Sciences), lecturer of the department of transport and logistics, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8515-9376>, e-mail: a.papinko@wunu.edu.ua.

Пашинський Віктор Антонович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6399>, e-mail: pva.kntu@gmail.com.

Victor Pashynskiy - Professor, Doctor of Science (DSc), Professor of the Department of Building, Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6399>, e-mail: pva.kntu@gmail.com.

Пашинський Микола Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-523X>, e-mail: mykola.pashynskiy@gmail.com.

Mykola Pashynskiy - Associate Professor, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor of the Department of Building, Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-523X>, e-mail: mykola.pashynskiy@gmail.com.

Петленко Володимир Павлович – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-4006-3202>, e-mail: Tpetlenko@ukr.net.

Volodymyr Petlenko – PhD student in Automobile Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-4006-3202>, e-mail: Tpetlenko@ukr.net.

Петренко Дмитро Іванович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральнотехнічний національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8123>, e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com.

Dmytro Petrenko – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3151-8123>, e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com.

Плекан Уляна Михайлівна – кандидат економічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-6355>, e-mail: Vnv123@ukr.net.

Plekan Uliana – Associate Professor, Candidate in Economic Sciences, Associate Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2533-6355>, e-mail: Vnv123@ukr.net.

Попадюк Ігор Семенович – молодший науковий співробітник відділу механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур, Інститут механіки та автоматизації агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5138-9499>, email: i-popadyuk@ukr.net.

Ihor Popadyuk – Junior Researcher, Department of Mechanical and Technological Problems of Harvesting and Post-Harvest Processing of Grain and Oilseed Crops, Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5138-9499>, email: i-popadyuk@ukr.net.

Потаман Наталя Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9545-5002>, e-mail: n.potaman@khadi.kharkov.ua.

Potaman Natalia – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9545-5002>, e-mail: n.potaman@khadi.kharkov.ua.

Пузир Руслан Григорович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>, e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Ruslan Puzyr – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Tractors, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>, e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Рожко Наталія Ярославівна – професор, доктор економічних наук, професор кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1400-9503>, e-mail: natalirozhko@ukr.net

Nataliya Rozhko – Professor, Doctor of economic sciences, Professor at the Department of Automobile, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1400-9503> e-mail: natalirozhko@ukr.net

Розум Руслан Іванович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7812-8248>, e-mail: rozoom_ruslan@ukr.net.

Ruslan Rozum – Associate Professor, PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Transport and Logistics, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7812-8248>, e-mail: rozoom_ruslan@ukr.net.

Савенко Богдан Олегович – доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький Національний Університет, Хмельницький, Україна, ORCID: 0000-0001-5647-9979, e-mail: savenko_bohdan@ukr.net.

Bohdan Savenko – Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Information Systems, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: 0000-0001-5647-9979, e-mail: savenko_bohdan@ukr.net.

Савенко Олег Станіславович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних системи, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>, e-mail: savenko_oleg_st@ukr.net.

Oleg Savenko – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Engineering and Information Systems, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>, e-mail: savenko_oleg_st@ukr.net.

Сало Василь Михайлович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2263-6002>, e-mail: salovm@ukr.net.

Vasyl Salo – Professor, DSc in Technics (Doctor of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2263-6002>, e-mail: salovm@ukr.net.

Сокальська Юлія Олександрівна – аспірант кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4043-6251>, e-mail: juliya_8383@ukr.net.

Sokalska Yuliia – graduate student of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4043-6251>, e-mail: juliya_8383@ukr.net.

Соловей Сергій Романович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, ORCID: 0009-0007-3944-6447, e-mail: serhii.solovei@knu.ua.

Serhii Solovey – PhD Student in Computer Engineering, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, ORCID: 0009–0007–3944–6447, e-mail: serhii.solovei@knu.ua.

Сташків Микола Ярославович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7325-8016>, e-mail: stam77@ukr.net.

Mykola Stashkiv - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Agricultural Machinery, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7325-8016>, e-mail: stam77@ukr.net.

Степаненко Сергій Петрович – старший науковий співробітник, доктор технічних наук, завідувач відділу механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8331-4632>, email: Stepanenko_s@ukr.net.

Serhii Stepanenko – Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanical and Technological Problems of Harvesting and Post-Harvest Processing of Grain and Oilseed Crops, Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8331-4632>, email: Stepanenko_s@ukr.net.

Степаняк Михайло Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем автоматики, Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1859-4495>, e-mail: mykhailo.v.stepaniak@lpnu.ua.

Mykhailo Stepanyak – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Computerized Automation Systems, Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1859-4495>, e-mail: mykhailo.v.stepaniak@lpnu.ua.

Студент Михайло Михайлович – професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5992-5898>, e-mail: student.phmi@gmail.com.

Mykhailo Student – Professor, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of Materials Science Foundations of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: orcid.org/0000-0002-5992-5898, e-mail: student.phmi@gmail.com.

Студент Олександра Зиновіївна – професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5638-2744>, e-mail: oleksandrastudent1@gmail.com.

Oleksandra Student – Professor, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Department of Diagnostics of Corrosion-Hydrogen Degradation of Materials, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5638-2744>, e-mail: oleksandrastudent1@gmail.com.

Тесленко Олена Володимирівна - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0001-3177-9462 e-mail: olena.vl.teslenko@gmail.com, (095) 3015602

Olena Teslenko PHD student in "Industrial Mechanical Engineering", Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine ORCID: 0009-0001-3177-9462 e-mail: olena.vl.teslenko@gmail.com, (095) 3015602

Тихий Андрій Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5323-4415>, e-mail: tykhyiaa@kntu.kr.ua.

Andrii Tykhyi - Associate Professor, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor of the Department of Building, Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5323-4415>, e-mail: tykhyiaa@kntu.kr.ua.

Угрин Дмитро Ілліч - професор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4858-4511>, e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua.

Dmytro Uhryn – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer Sciences, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4858-4511>, e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua.

Уколов Євгеній Олександрович - здобувач вищої освіти на другому (освітньо-професійному) рівні вищої освіти за спеціальністю «Транспортні технології», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3091-5086>, e-mail: ukolovevgen1975@ukr.net.

Yevgeniy Ukolov - a higher education student at the second (Master's, educational-professional) level in the specialty "Transport Technologies", Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3091-5086>, e-mail: ukolovevgen1975@ukr.net.

Ушенко Юрій Олександрович - професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1767-1882>, e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua.

Yuriy Usenko – Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Computer Science, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1767-1882>, e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua.

Філімоніхін Геннадій Борисович – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2819-0569>, e-mail: filimonikhin@ukr.net.

Gennadiy Filimonikhin – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2819-0569>, e-mail: filimonikhin@ukr.net.

Філімоніхіна Ірина Іванівна – доцент, кандидат фіз.-математ. наук, доцент кафедри вищої математики і фізики, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1384-6027>, e-mail: fii.kr.ua@gmail.com.

Irina Filimonikhina – Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1384-6027>, e-mail: fii.kr.ua@gmail.com.

Цьонь Олег Петрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-4697>, e-mail: tsonoleg@gmail.com.

Oleg Tson – Associate Professor, Candidate in Technical Sciences, Associate Professor of Automobiles Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-4697>, e-mail: tsonoleg@gmail.com.

Черниш Андрій Анатолійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9711-827X>, e-mail: chernyshkrnu@gmail.com.

Andrii Chernysh - Associate Professor, PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Automobiles and Tractors, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9711-827X>, e-mail: chernyshkrnu@gmail.com.

Черній Олександр Анатолійович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому рівні) вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», старший викладач кафедри інжинірингу технічних систем, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0691-5829>, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.

Olexandr Chernii – PhD student in Industrial mechanical engineering, Senior Lecturer Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0691-5829>, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.

Чирун Любомир Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інформаційних систем і мереж», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9448-1751>, e-mail: lyubomyr.v.chyrun@lpnu.ua.

Lyubomyr Chyrun – PhD in Information Technology (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9448-1751>, e-mail: lyubomyr.v.chyrun@lpnu.ua.

Чорба Радім Валерійович – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9879-4375>, e-mail: radim.chorba@gmail.com.

Radim Chorba – PhD student of the Department of Software Engineering. Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9879-4375>, radim.chorba@gmail.com.

Чумак Віталій Миколайович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com.

Vitalii Chumak – PhD student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1913-9371>, e-mail: vitaly.chumak33@gmail.com

Швидкий Олександр Васильович – науковий співробітник, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2669-1126>, e-mail: Shvidkiyalexandr@ukr.net.

Oleksandr Shvydkiy – scientific worker, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2669-1126>, e-mail: Shvidkiyalexandr@ukr.net.

Ювженко Олександр Володимирович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Автомобільний транспорт», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: 40101001@gmail.com.

Oleksandr Yuvzenko - PhD student in Road Transport, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: 40101001@gmail.com.

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. Постановка проблеми.
2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.
3. Постановка завдання (мета статті).
4. Виклад основного матеріалу.
5. Висновки і перспективи подальших досліджень.

Схема організації матеріалу статті:

1. Тематика*
2. УДК
3. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
4. Місце роботи, місто, країна. e-mail
5. Назва статті.
6. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури.
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.
11. Інформація про авторів.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Turnitin

Адреса для надсилання: zbirnyk_tech@kntu.kr.ua

*** – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 208 Агроінженерія, 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами)**

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 13(44)

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка О.П. Доренський

Тиражування О. Г. Каліч

Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»

Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.

25006, м. Кропивницький, вул. Шевченка, 25

тел./факс 24-35-53

Підписано до друку 16.03.2026р. Формат 60х84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 61,25
Тираж 300 прим. Зам. № 0895