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 14(45)

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 14(45)

Kropyvnytskyi • 2026

УДК 62:631.3

Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2026. Вип. 14(45), 474 с.

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-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 27 квітня 2026 року № 8.

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

Редакційна колегія: Віктор АУЛІН, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора); Сергій ЛИСЕНКО, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар); Олексій СМІРНОВ, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора); Андрій БАБІЙ, д-р техн. наук, проф.; Ірина БЕРЕЗЮК, канд. техн. наук, доц.; Варума АРІФА, Dr PhD (Нігер); 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 ДАРІЄНКО, 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 ПЛЄШКОВ, канд. техн. наук, проф.; Олександр РОССОЛОВ, д-р техн. наук, доц.; Сергій РУБАН, канд. техн. наук, доц.; Василь САЛО, 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 медіа: **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**

© Центральноукраїнський національний технічний університет, 2026

ЗМІСТ

Галузеве машинобудування

В. З. Гудь, А. Никитюк, А. Є. Боровік, А. О. Головатий
Експериментальна установка для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами 11-21

М. О.Годунко, В. А.Мажара, В. К. Щербина, Р. А. Кравченко
Дослідження залежності сил затиску в захватному пристрої робота від його конструктивних параметрів та межі міцності деталі 22-31

А. Є. Дячун, В. Ю. Грасовник
Теоретичні дослідження силових параметрів навивання стрічкових гвинтових заготовок 32-40

П. М. Єрьомін, А. М. Кириченко, А. І. Гречка, В. В. Свяцький
Підвищення точності розмірів деталей з технічних пластиків, виготовлених на 3D-принтерах методом наплавлення 41-52

А. М. Красота, І. В. Шепеленко, М. В. Красота, Р. А. Осін
Визначення оптимальних параметрів ФАБО кулачків розподільних валів 52-65

О. В. Щербак, І. Г. Кириченко, С. Л. Хачатурян
Розробка макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи на основі mems-imu модулів для експериментальних досліджень шарнірно-з'єднаних машин 66-76

А. В. Бабій, І. В. Вовк
Дослідження енергетичних показників при подрібненні рослин бильними робочими органами 77-86

В. А. Дейкун, Д. Ю. Артеменко, Р. В. Москальченко
Обгрунтування конструкції лапи просапного культиватора із змінним струнним лезом 87-98

А. М. Тригуба, О. І. Фількін, М. П. Коциловський, Н. Я. Коваль
Обгрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту 99-115

О. Л. Ляшук, Ю. В. Омелянський
Дослідження динамічних характеристик гвинтового скребкового трубчастого транспортера-змішувача при транспортуванні сипких матеріалів у криволінійних трасах 116-124

І. А. Валявський, О. В. Лисенко
Підвищення ефективності сонячної енергогенерації за допомогою механізмів паралельної структури 125-130

Комп'ютерна інженерія

І. С. Стецюренко, А. В. Петрашенко
Спосіб оптимізації енергоживлення IoT-системи моніторингу кліматичних показників 131-136

Прикладна механіка

О. С. Мусієнко, О. М. Сулима,О. І. Моргун, Р. В. Черемшук
Скінченно-елементний аналіз впливу геометричних параметрів ніжки ревізійного колінного імплантата на напружений стан великогомілкової кістки 137-145

Матеріалознавство

І. М. Погрелюк, С. М. Лаврись, О. М. Даниляк, О. В. Ткачук, Г. Г. Веселівська, Р. В. Проскурняк
Вплив термічної обробки на структуру і властивості титанового сплаву ВТ6, отриманого 3D друком 146-154

В. М. Ломакін, В. В. Пукалов, Л. А. Молокост
Методологічні аспекти моделювання та розрахунку теплових процесів у багатомісних кокілях 155-163

А. В. Рутковський, О. Г. Трапезон, С. І. Маркович, О. В. Бевз
Дослідження втомної міцності титанових сплавів, модифікованих вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі, при високочастотному навантаженні 163-171

О. В. Кузик, М.В. Босий, В.В. Слонь, С.І. Шматько, В. М. Кропівний, Д.О. Атрощенко
Закономірності структурно-фазових перетворень та зниження твердості легованої штампової сталі при ізотермічній обробці 172-184

Ю. Г. Ковальов, С. Г. Ковальов, І. Р. Євменьєв
Машинне навчання як інструмент уточнення моделей дифузійного спікання кераміки Al_2O_3 185-193

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

С. І. Осадчий, В. С. Мажаров, Ю. Б. Ситник, М. І. Романович
Лінійна модель алгоритму зворотної кінематики платформи Стюарта 194-204

Д. В. Трушаков, О. П. Гоголюк, С. Й. Рендзіняк, О.А. Козловський
Створення спрощеної системи кодування інформації 205-212

Будівництво та цивільна інженерія

А. С. Лапченко
Підбір параметрів послідовно-паралельної електродетонаторної мережі при проходженні тунелів 213-219

В. А. Настоящий, В. А. Пашинський, О. В. Лізунков
Практичний досвід проєктування системи захисту від блискавки для будівлі ліцею 220-227

І. О. Скриннік, М. О. Федотова, В.В. Дарієнко, В. В. Яцун
Застосування швидкотвердіючих цементних складових в бетонах
при зведенні будівель та споруд на об'єктах в будівництві 227-233

Stanislav Dzhyrma, Mykola Pashynskyi, Serhii Perun
Technological Solutions for Increasing the Energy Efficiency of Windows
in new Construction and Housing Stock Reconstruction..... 234-244

Агроінженерія

С. П. Степаненко
Удосконалення процесу оптичного сортування дрібнонасіннєвих культур..... 245-256

О. І. Кепко, І. О. Лісовий
Автоматизація режимів освітлення для підвищення надійності
та ефективності птахівництва 257-267

Автомобільний транспорт

С. Ф. Посонський, О. П. Бабак, А. А. Вичавка
Вплив відкладень на характеристики розпилення паливних форсунок
та ефективність їх ультразвукового очищення на стенді AUTOOL CT160 268-280

О. М. Маковкін, І. К. Вальчук
Метрологічне та технологічне забезпечення якості при електроіскровому
легуванні поверхонь деталей автомобільних двигунів 280-292

А. А. Сергійчук, Є. М. Козаченко
Правове регулювання безпеки транспорту та роль випробувальних
лабораторій у системі технічного регулювання..... 293-299

Л. А. Тарандушка, І. П. Тарандушка
Вплив трансформації транспортної інфраструктури на екологічну безпеку
міського середовища в умовах сталого розвитку 299-304

О. П. Захарчук
Теоретичне дослідження експлуатаційних характеристик пасажирського
автобуса з оптимізацією передаточних відношень коробки передач 305-313

Транспортні технології (за видами)

Т. В. Гайкова
Інноваційна складова управління ланцюгами постачання автомобільного
транспорту на основі інтеграції маркетингових та логістичних технологій..... 314-321

А. А. Кочина, І. С. Наглюк, Л. С. Абрамова, С. А. Сахно
Оцінювання результатів розрахунку моделі транспортного попиту
на пересування пасажирів 322-331

Р. І. Петрусенко, Н. О. Семченко
Підвищення безпеки руху на нерегульованих пішохідних переходах 331-338

Ів. Б. Гевко, М. Д. П'єнтак, В. О. Тесля, Б. Р. Гевко, Р. В. Хорошун, Т. Д. Навроцька, Іг. Б. Гевко
Аналіз та перспективи розвитку автотранспортних перевезень в Тернопільській області 339-352

Н. Л. Костьян
Методологія адаптивного розвитку морфологічної моделі міської транспортної системи для динамічного синтезу проєктних рішень 353-361

О. С. Хачатурян
Методологічні аспекти моделювання та оцінювання регіональних вантажопотоків у термінальних системах 362-374

Д. В. Голуб, Н. О. Замкова, Д. П. Чорна
Удосконалення підходу техніко-економічної оцінки ефективності експлуатації автобусів на маршрутах міста з урахуванням їх стану працездатності 375-383

Д. О. Кульова, А. В. Гриньків
Виявлення та аналіз перешкод у застосуванні мультимодальних технологій в логістиці вантажних перевезень 383-397

К. В. Доля
Збільшення привабливості транспорту загального користування 398-407

А. В. Йовченко
Дослідження пристрою пасивної безпеки, що використовується для безпеки транспортних процесів під час логістичних перевезень 408-415

К. М. Березька, О. С. Шевчук, П.В. Панасюк, І. С. Мурований
Математичне моделювання транспортної конфліктності для оцінювання небезпеки для проектних рішень на вулично-дорожній мережі міст 416-424

С. В. Цимбал, В. С. Глиняний
Сучасні методи покращення організації пасажирського транспорту на міських та приміських маршрутах 425-435

О. А. Кислун, В. В. Аулін, Ю. М. Пархоменко, С. В. Лисенко
Підвищення ефективності використання площ технологічних зон та оптимізація процесів і характеристик складської логістики сільськогосподарських підприємств 435-451

Галузеве машинобудування

Е.Б. Алієв, Р.Г. Пономаренко
Результати попередніх досліджень Y-подібного змішувача кормових матеріалів 452-460

Інформація про авторів 461

CONTENT

Industral Machinery Engineering

Victor Gud, Andriy Nikityuk, Artem Borovik, Artem Holovatyi
Experimental Setup for Studying the Efficiency of Mixing Bulk Materials
By Screw Working Bodies with Additional Elements 11-21

Maksym Hodunko, Vitalii Mazhara, Volodymyr Shcherbyna, Roman Kravchenko
Study of the Influence of Structural Parameters of Robot Gripping Devices
on the Total Clamping Forces of Parts Considering the Ultimate Strength of the Part 22-31

Andrii Diachun, Vasyl Grasovnyk
Theoretical Investigation of the Force Parameters in Winding Strip Helical Blanks 32-40

Pavlo Yeromin, Andrii Kyrychenko, Andrii Hrechka, Sviatskyi Volodymyr
Improving the Dimensional Accuracy of Engineering Plastic Parts Manufactured
by Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing 41-52

Artem Krasota, Ihor Shepelenko, Mykhailo Krasota, Ruslan Osin
Determining the Optimal Parameters of Camshaft Cams FAN 52-65

Oleh Shcherbak, Ihor Kyrychenko, Serhiy Khachaturyan
Development of a Mock-up Hardware and Software Prototype of an Information
and Measurement System Based on MEMS-IMU Modules for Experimental
Research of Articulated Machines 66-76

Andrii Babii, Ivan Vovk
Research of Energy Parameters in Plant Shredding Using Flail Working Bodies..... 77-86

Viktor Deikun, Dmytro Artemenko, Roman Moskalchenko
Justification of the desigN of the Paw of a Row-Row Cultivator with
a Replaceable String Blade 87-98

Anatoliy Tryhuba, Orest Filkin, Maryan Kotsylovskyi, Nazar Koval
Substantiation of Structural and Technological Parameters of Agricultural
Production Equipment Based on Cyber-Physical System Data and
Computational Intelligence Methods 99-115

Oleg Lyashuk, Yuriy Omelyansky
Study of Dynamic Characteristics of a Screw Scraper Tubular Conveyor-Mixer
When Transporting Bulk Materials in Curved Routes..... 116-124

Ivan Valiavskyi, Oleksandr Lysenko
Improving the Efficiency of Solar Energy Generation Using Parallel Structure
Mechanisms..... 125-130

Computer Engineering

Illia Stetsiurenko, Andrii Petrashenko
Method of Optimization of Energy Supply of Iot System for Monitoring
Climatic Indicators 131-136

Applied Mechanics

Olha Musiienko, Oleksii Sulyma, Oleksii Morhun, Roman Cheremshuk
Finite Element Analysis of the Influence of Revision Knee Implant Stem Geometry on the Stress State of the Tibial Bone 137-145

Material Science

Iryna Pohrelyuk, Serhii Lavrys, Olena-Mariia Danyliak, Oleh Tkachuk, Halyna Veselivs'ka, Roman Proskurnyak
The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of a 3D-Printed VT6 Titanium Alloy 146-154

Viktor Lomakin, Viktor Pukalov, Lyudmyla Molokost
Methodological Aspects of Modeling and Calculation of Thermal Processes in Multi-Seat Chill Molds 155-163

Anatoly Rutkovskiy, Oleksandr Trapezon, Sergiy Markovych, Oleg Bevz
Study of the Fatigue Strength of Titanium aLloys Modified by Vacuum Ion Nitriding in the Pulse Mode Under High-Frequency Loading 163-171

Olexandr Kuzyk, Mykola Bosyi, Viktor Slon, Ludmyla Molokost, Serhii Shmatko, Volodymyr Kropivnyi, Dmytro Atroshchenko
Regularities of Structural-Phase Transformations and Hardness Reduction of Alloyed Tool Steel During Isothermal Treatment 172-184

Yurii Kovalov, Serhii Kovalov, Illia Yevmenyev
Machine Learning as a Tool for Refining Diffusion Sintering Models of Al_2O_3 Ceramics 185-193

Automation and Computer-Integrated Technologies

Serhii Osadchyi, Volodymyr Mazharov, Yurii Sytnyk, Mykola Romanovych
A Stewart Platform Inverse Kinematics Algorithm Linear Model 194-204

Dmytro Trushakov, Oksana Hoholyuk, Serhiy Rendzinyak, Oleksandr Kozlovskyi
Creation of a Simplified Information Coding System 205-212

Construction and Civil Engineering

Artem Lapchenko
Parameters of a Series-Parallel Electrodetonator Network When Passing Tunnels 213-219

Vladyslav Nastoyashchiy, Victor Pashynskyi, Oleksandr Lizunkov
Practical Experience in Designing a Lightning Protection System for a Lyceum Building 220-227

Ivan Skrynnik, Marianna Fedotova, Viktor Darienko, Volodymyr Yatsun
The use of Rapid-Hardening Cement Components in Concrete During the Construction of Buildings and Structures at Construction Sites 227-233

Stanislav Dzhyrma, Mykola Pashynskyi, Serhii Perun
Technological Solutions for Increasing the Energy Efficiency of Windows in new Construction and Housing Stock Reconstruction 234-244

Agroengineering

Serhii Stepanenko
Improvement of the Optical Sorting Process for Small-Seed Crops 245-256

Oleg Kepko, Ivan Lisovyi
Automation of Lighting Modes to Improve the Reliability and Efficiency of Poultry Farming 257-267

Automobile Transport

Sergiy Posonskiy, Oleg Babak, Anatolij Vychavka
The Influence of Deposits on the Fuel Injectors' Atomization Characteristics and the Efficiency of Their Ultrasonic Cleaning on the AUTOOL CT160 Stand 268-280

Oleg Makovkin, Igor Valchuk
Metrological and Technological Quality Assurance in Electrospark Alloying of Automotive Engine Parts Surfaces 280-292

Andrii Serhiichuk, Yevhen Kozachenko
Legal Regulation of Transport Safety and the Role of Testing Laboratories in the System of Technical Regulation 293-299

Liudmyla Tarandushka, Ivan Tarandushka
Impact of Transport Infrastructure Transformation on the Environmental Safety of the Urban Environment in the Conditions of Sustainable Development 299-304

Olena Zakharcuk
Theoretical Study of the Operational Characteristics of a Passenger Bus with Optimization of Gearbox Ratios 305-313

Transport Technologies (by Types)

Tetiana Haikova
An Innovative Component of Road Transport Supply Chain Management Based on the Integration of Marketing and Logistics Technologies 314-321

Anastasia Kochina, Ivan Nahliuk, Liudmyla Abramova, Serhii Sakhno
Evaluation of the Results of Passenger Trip Demand Model Calculation 322-331

Ruslan Petrusenko, Nataliia Semchenko
Enhancing Road Safety at Uncontrolled Crosswalks 331-338

Ivan Hevko, Mariia Pientak, Volodymyr Teslia, Bohdan Hevko, Roman Khoroshun, Tetyana Navrotskaya, Igor Hevko
Analysis and Development Outlook for Road Transportation Services in Ternopil Region 339-352

Nataliia Kostian
Methodology of Adaptive Development of Morphological Model of Urban Transport System for Dynamic Synthesis of deSign Solutions 353-361

Olena Khachaturyan
Methodological Aspects of Modeling and Assessing Regional Cargo Flows in Terminal Systems 362-374

Dmytro Holub, Nataliia Zamkova, Diana Chorna
Improvement of the Approach to the Technical and Economic Evaluation of Vehicle Operation Efficiency on Urban Routes Considering their Operational Condition 375-383

Daria Kulova, Andrii Hrynkiv
Identification and Analysis of Barriers to the Implementation of Multimodal Technologies in Freight Transport Logistics 383-397

Kostiantyn Dolia
Increasing the Attractiveness of Public Transport 398-407

Alla Yovchenko
Research of a Passive Safety Device to Increase the Reliability and Safety of Transport Processes During Logistics Transportation 408-415

Kateryna Berezka, Oksana Shevchuk, Valentyna Panasyuk, Igor Murovanyi
Mathematical Modeling of Traffic Conflicts for Assessing the Risk of Design Decisions on the Street and Road Network of Cities 416-424

Serhii Tsymbal, Viktor Glynianyi
Modern Methods of Improving the Organization of Passenger Transport on Urban and subuRban Routes 425-435

Oleh Kyslun, Victor Aulin, Yurii Parkhomenko, Serhii Lysenko
Increasing the Efficiency of Technological zoNe Space Utilization and Optimizing the Processes and Characteristics of Agricultural Enterprise Warehouse Logistics 435-451

Elchyn Aliiev, Ruslan Ponomarenko
Results of Preliminary Studies of a Y-Shaped Feed Material Mixer 452-460

Information about authors 461

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.86 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).11-21

В. З. Гудь[1], доц., д-р техн. наук, **А. Г. Никитюк**[1], **А. Є. Боровік**[2], **А. О. Головатий**[3]
[1]*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: vic_g@ukr.net*
[2]*Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна*
[3]*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

Експериментальна установка для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами

У статті представлено розроблену та виготовлену конструкцію експериментальної установки для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами. Розроблена установка для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами включає трисекційний бункер, який дозволяє проводити дослідження неоднорідності змішування двох- та трьохкомпонентних сумішей, і має можливість регулювати швидкість просипання окремих компонентів. Також експериментальна установка надає можливість зміни кута нахилу вітки гвинтового конвеєра в межах від 0 до 60 град., частоту обертання гвинтового робочого органу в межах від 0 до 1400 об/хв., а також дослідження якості змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами оснащених додатковими елементами, зокрема Г-подібними елементами висотою 10, 20 та 30 мм. Конструкція експериментальної установки оснащена перетворювачем частоти Altivar 71, з допомогою якого надано можливість керування частотою обертання шнека оснащеного змішувальними елементами та збору необхідних дослідних даних в ПК. Керування частотним перетворювачем Altivar 71 відбувається з ПК за використання програмного забезпечення PowerSuite. Використання експериментальної установки для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами оснащеної частотним перетворювачем Altivar 71 дозволяє досліджувати продуктивність процесу одночасного транспортування-змішування сипких матеріалів, витрати потужності приводу, обертовий момент на валу електродвигуна установки, а також після проведених вимірів, коефіцієнт неоднорідності отриманих сумішей.

експериментальна установка, дослідження, перетворювач частоти, параметри, процес, змішування, шнек, гвинтовий робочий орган, додаткові елементи

Постановка проблеми. Гомогенізація сипких середовищ є фундаментальним технологічним процесом у харчовій, хімічній, будівельній та аграрній галузях промисловості. Сучасним вектором підвищення техніко-економічної ефективності даного процесу є інтеграція операцій перемішування та переміщення шляхом впровадження гвинтових конвеєрів-змішувачів. Зазначене обладнання виконує подвійну функцію: забезпечення заданого вектора переміщення вантажу та інтенсифікацію міжкомпонентної дифузії. У даному обладнання гвинтові робочі органи (ГРО) широко застосовуються як автономні агрегати або елементи автоматизованих ліній для маніпуляцій із сипкими, в'язкими та штучними матеріалами. Режими експлуатації ГРО передбачають як суміщення транспортно-технологічних циклів, так і реалізацію виключно процесу гомогенізації. Розробка та оптимізація конструктивних

© В. З. Гудь, А. Г. Никитюк, А. Є. Боровік, А. О. Головатий, 2026

параметрів ГРО, що забезпечують високий ступінь однорідності суміші за мінімальних енерговитрат, вимагає застосування системного аналізу та обов'язкової верифікації результатів шляхом експериментальних досліджень.

Модернізація гвинтових конвеєрів шляхом імплементації інноваційних конструктивних елементів спрямована на інтенсифікацію процесу гомогенізації сипких середовищ. Встановлення кореляції між модифікаціями робочих органів та якісними показниками змішування винятково аналітичними методами є утрудненим через високу складність математичного моделювання багатофазних систем, що не дозволяє досягти необхідної прогностичної точності. З огляду на це, пріоритетного значення набуває проведення натурних експериментальних досліджень із застосуванням спеціалізованих стендових установок. Проектування та апробація таких стендів дозволяють здійснити верифікацію теоретичних положень, а також встановити раціональні конструктивно-кінематичні параметри гвинтових робочих органів, оснащених додатковими елементами-інтенсифікаторами, для оптимізації суміщених процесів транспортування та змішування.

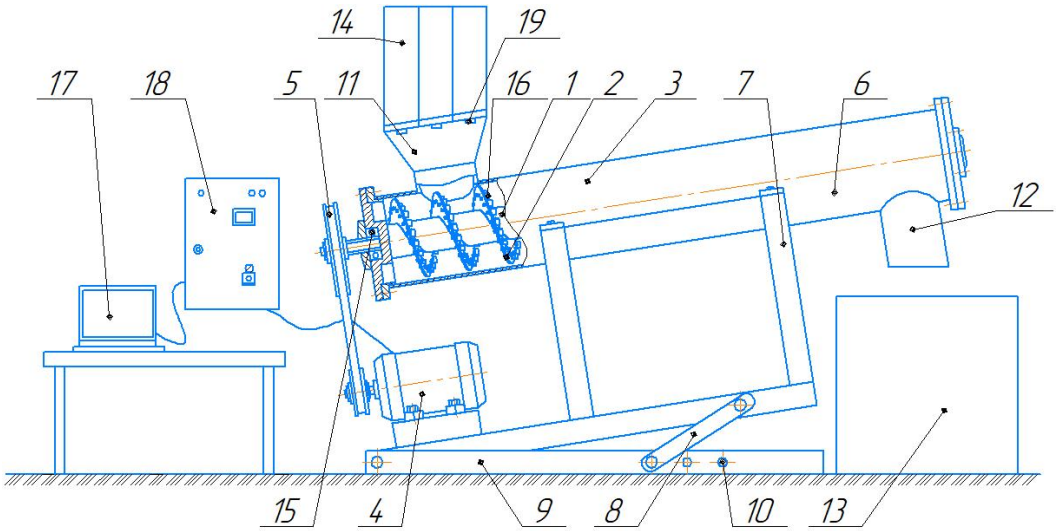
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням проектування та аналізу різноманітних модифікацій гвинтових змішувачів присвячено численні наукові праці. Значна частина досліджень спрямована як на розроблення та апробацію нових конструктивних рішень [3, 5, 13, 17, 20, 23–30], так і на теоретико-експериментальне вивчення особливостей їх функціонування [3, 5, 13, 17, 20, 23–30]. Зокрема, методологічні засади створення нових гвинтових робочих органів висвітлено у роботах Р. Рогатинського [15, 17, 19-22, 25, 26, 31, 32], І. Гевка [1-14, 16-32], О. Ляшука [10, 11], В. Васильківа [1] та інших дослідників. Натомість аналіз робочих процесів, математичне моделювання та визначення раціональних параметрів експлуатації змішувачів представлені у працях Б. Гевка [15], Р. Рогатинського [15, 17, 19-22, 25, 26, 31, 32], М. Пилипця [15, 16, 18], І. Гевка [2, 3, 7, 13, 14, 17, 19-22], О. Ляшука [24–30], Д. Дмитріва [14, 21, 22], О. Гурика [2, 7].

Незважаючи на значний обсяг напрацювань, специфіка вимог до процесу перемішування у різних галузях (аграрний сектор, фармація, будівництво, харчова промисловість) зумовлює необхідність подальшої модернізації обладнання. У цьому контексті актуальною науково-практичною задачею є розроблення та комплексне експериментальне дослідження гвинтових транспортерів-змішувачів, оснащених інтенсифікуючими додатковими елементами.

Метою роботи є опис конструкції розробленої та виготовленої експериментальної установки для дослідження і вибору раціональних параметрів процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами.

Виклад основного матеріалу. Гвинтові конвеєри класифікуються як багатофункціональне обладнання, що застосовується не лише для горизонтального та похилого транспортування штучних, кускових, сипких і в’язких вантажів, а й для реалізації супутніх технологічних процесів. Зокрема, конструктивні особливості робочих органів дозволяють використовувати дані механізми як гвинтові змішувачі, що забезпечують гомогенізацію багатокомпонентних сипких і в’язких середовищ безпосередньо в процесі їх переміщення. З метою створення конструкцій таких засобів, які б відповідали найвищим вимогам, необхідно проводити розроблення, виготовлення та дослідження їх експериментальних взірців, що дозволяє здійснювати вибір раціональних конструкцій і параметрів спеціальних гвинтових елементів. До таких спеціальних гвинтових елементів також відносяться конструкції гвинтових робочих органів з додатковими елементами, які забезпечують ефективне змішування окремих компонентів. Для експериментального дослідження останніх нами розроблено і виготовлено експериментальну установку, опис якої представлено далі.

На рис. 1 зображено експериментальну установку для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами, яка забезпечує фіксацію досліджуваних характеристик при виконанні експериментів, ефективне дозування точного об’ємного співвідношення змішувальних компонентів і можливість заміни гвинтових елементів в процесі дослідження. Зокрема на рис. 1. а зображено конструктивну схему установки, а на рис. 1. б її загальний вигляд.



а)



б)

Рисунок 1 - Конструкція експериментальної установки для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами:
а) конструктивна схема; б) загальний вигляд

Джерело: розроблено авторами

Експериментальна установку для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами виконана у вигляді вала 1 з гвинтом 2, які розміщені в кожусі 3 з можливістю кругового провертання і які з'єднано з електродвигуном 4 за допомогою пасової передачі 5. Нижню частину кожуха 6 жорстко з допомогою болтового з'єднання закріпляють на поворотній рамі 7, на якій, також, закріплено електродвигун 4. Поворотна рама 7 шарнірно із можливістю кутового провертання з однієї сторони, та фіксацією з іншої сторони за допомогою регулювальної опори 8, закріплена на базовій рамі 9. Для регулювання кута нахилу поворотної рами 7 у нижній частині базової рами 9 виконані отвори 10, в яких здійснюється фіксація регулювальної опори 8. Регулювальна опора 8 з іншої сторони з можливістю кругового обертання закріплена до нижньої частини поворотної рами 7. Вона надає можливість зміни кута нахилу кожуха 3 в межах від 0 до 60 град. Зі сторони розташування електродвигуна 4 у верхній знімній частині кожуха 3 закріплений завантажувальний бункер 11 (рис. 2). З іншої сторони кожуха 3 у його нижній частині розташований вивантажувальний патрубок 12, під яким встановлена місткість для відбору досліджуваного матеріалу 13. Над завантажувальним бункером 11 розташований додатковий бункер регульованої подачі компонентів 14, який жорстко закріплений до завантажувального бункера 11. Вал 1 встановлено в підшипникових опорах 15, які закріплені по обох боках кожуха 3. Також, вал 1 (рис. 3) включає жорстко закріплений гвинт 2, на якому в отворах закріплюються додаткові елементи 16 для інтенсифікації міжкомпонентної дифузії (рис. 4). Довжина вала 1 з гвинтом 2 перекриває відстань від завантажувального бункера 11 до вивантажувального патрубка 12.



Рисунок 2 – Завантажувальний бункер



Рисунок 3 – Гвинтовий робочий орган оснащений досліджуваними додатковими елементами в підшипниковій опорі

Джерело: розроблено авторами

Керування електродвигуном 4 здійснюється з персонального комп'ютера 17 через перетворювач частоти обертання двигуна 18 (рис. 5).



Рисунок 4 – Гвинтовий робочий орган з досліджуваними додатковими елементами



Рисунок 5 – Перетворювач частоти

Джерело: розроблено авторами

На гвинтовий робочий орган з додатковими елементами, який виготовлено для дослідження на розробленій установці (рис. 3 і рис. 4), отримано патент на корисну модель України за № 161908 (рис. 6), а на саму установку підготовлено заявку на винахід. Самі додаткові елементи 16 є різної величини, а саме з поличками 10, 20 та 30 мм, і можуть закріплятись на гвинту 2 під різним кутом. Основні конструктивні параметри досліджуваного гвинтового робочого органу з додатковими елементами є наступними: діаметр шнека – 96 мм (відповідно кожуха зовнішній – 106 мм і внутрішній – 100 мм); висота шнека – 25 мм; крок шнека – 62 мм; кількість витків на шнеку – 12,5; кількість додаткових Г-подібних елементів – 33.

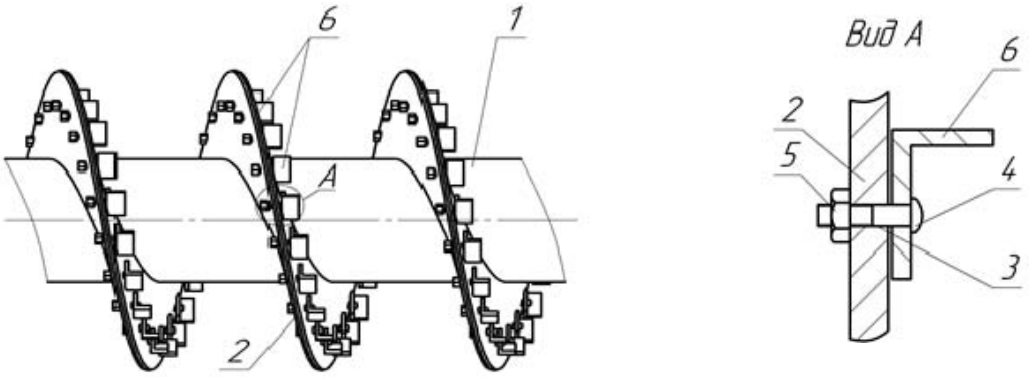


Рисунок 6 – Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів (пат. України № 161908):
1 - вал; 2 – гвинт; 3 - кріпильні отвори; 4 - кріпильні гвинти; 5 – гайки; 6 - елементи Г-подібної форми
Джерело: розроблено авторами

Для підвищення точності та достовірності результатів експериментальних досліджень з використанням експериментальної установки для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами до її складу введено перетворювач частоти обертання двигуна 18 марки ALTINAR-71. Керування параметрами електропривода здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Power Suite (версія 2.3.0). Використання вказаного програмного забезпечення на персональному комп'ютері 17 дозволяє в автоматизованому режимі встановлювати та регулювати частоту обертання вала електродвигуна 4. Система забезпечує плавне варіювання кутової швидкості в діапазоні 0–1480 об/хв. Програмно-апаратний комплекс дозволяє в реальному часі фіксувати енергетичні показники та величини обертальних моментів залежно від навантаження. Результати вимірювань експортуються у вигляді табличних даних та графічних залежностей для подальшого аналізу на моніторі персонального комп'ютера 17. Функціональні можливості робочого термінала перетворювача частоти обертання двигуна 18 забезпечують візуалізацію експлуатаційних характеристик, електричних величин, робочих параметрів та діагностику системних несправностей. Інтерфейс термінала дозволяє здійснювати конфігурування параметрів персонального комп'ютера 17, реалізувати локальне керування перетворювачем за допомогою клавіатури, а також забезпечує архівацію та відновлення налаштувань у енергонезалежній пам’яті.

Методика проведення експериментальних з використанням установки для дослідження характеристик гвинтових спіралей, оснащених додатковими елементами 16 для інтенсифікації міжкомпонентної дифузії полягає в наступному. Перед проведенням експериментальних досліджень транспортно-змішувальних характеристик відповідних гвинтових спіралей гвинт 2 поза межами установки оснащують відповідними додатковими елементами 16 для інтенсифікації міжкомпонентної дифузії (рис. 5). Далі вал 1 з гвинтом 2 оснащеним додатковими елементами 21 вставляють у кожух 3 і закріпляють у ньому в підшипникових опорах 15. Далі поворотну раму 7

провертають на необхідний кут відносно базової рами 9 і за допомогою регулювальної опори 8 фіксують на базовій рамі 9 в одному з отворів 10. Потім проводять завантаження додаткового бункера регульованої подачі компонентів 14 необхідними для дослідження компонентами.

Наступним етапом є запуск електродвигуна 4 в потрібному напрямку з потрібною частотою обертання через перетворювач частоти обертання двигуна 18 з персонального комп'ютера 17, що забезпечує передачу обертового руху через пасову передачу 5 на вал 1 з гвинтом 2. Після цього з додаткового бункера регульованої подачі компонентів 14 здійснюють гравітаційне вивантаження необхідних для дослідження компонентів у необхідній пропорції до завантажувального бункера 11 з допомогою шиберів вимірювання подачі компонентів 19 (рис. 7), якими його оснащено у його нижній вивантажувальній частині. Причому, до проведення експериментальних досліджень проводять заміри витікання окремих компонентів з окремих відсіків бункера регульованої подачі компонентів 14 при різних значеннях відкриття шиберів. Із завантажувального бункера 11 ці компоненти гвинтом 2, змішуючись, переміщаються по кожусі 3 до вивантажувального патрубка 12, з якого потрапляють у місткість для відбору досліджуваного матеріалу 13.

Після проведення комплексу експериментів проводять фіксацію даних про витрати енергії та величину обертового моменту, які поступають з перетворювача частоти обертання двигуна 18 у персональному комп'ютері 17, а також проводять відбір необхідних зразків (проб) змішаних компонентів з місткості для відбору досліджуваного матеріалу 13.



Рисунок 7 - Бункер регульованої подачі компонентів оснащений шиберами вимірювання подачі компонентів

Джерело: розроблено авторами

За необхідності процес повторюють стільки разів, скільки необхідно для досягнення заданої довжини транспортування. Також слід відмітити, що при проведенні з допомогою розробленої установки експериментальних досліджень транспортно-змішувальних характеристик гвинта 2, оснащеного відповідними додатковими елементами 16, гвинт 2 можна використовувати з різними конструктивними параметрами, такими, як крок, товщина витка, висота витка.

До переваг розробленої та виготовленої експериментальної установки для дослідження ефективності змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими елементами відноситься забезпечення фіксації досліджуваних характеристик при виконанні експериментів, ефективне дозування точного об'ємного співвідношення змішувальних компонентів і можливість заміни гвинтових елементів в процесі дослідження.

Висновок. В роботі представлено опис і характеристики розробленої та виготовленої конструкції експериментальної установки, призначеної для дослідження процесу одночасного транспортування та змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами з додатковими інтенсифікуючими елементами. Установка дозволяє обґрунтувати раціональні параметри функціонування обладнання та оцінити ефективність змішування багатокомпонентних сумішей. Вона включає трисекційний бункер, який дозволяє проводити дослідження неоднорідності змішування двох- та трикомпонентних сумішей, і має можливість регулювати швидкість просипання окремих компонентів. Також експериментальна установка надає можливість зміни кута нахилу вітки гвинтового конвеєра в межах від 0 до 60 град., частоту обертання гвинтового робочого органу в межах від 0 до 1400 об/хв., а також дослідження якості змішування сипких матеріалів гвинтовими робочими органами, оснащеними додатковими елементами, зокрема Г-подібними елементами висотою 10, 20 та 30 мм. Конструкція експериментальної установки оснащена перетворювачем частоти Altivar 71, з допомогою якого надано можливість керування частотою обертання шнека оснащеного змішувальними елементами та збору необхідних дослідних даних в ПК. Керування частотним перетворювачем Altivar 71 відбувається з ПК за використання програмного забезпечення PowerSuite, що дозволяє досліджувати продуктивність процесу одночасного транспортування-змішування сипких матеріалів, витрати потужності приводу, обертовий момент на валу електродвигуна установки, а, також, після проведених вимірів, коефіцієнт неоднорідності отриманих сумішей.

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*. 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*. 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*. 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*. 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: зб. наук. стат*. 2001. Вип. 8. 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. Серія: Машиноприладобудування та транспорт.* 2012. Вип. 128/2012. 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.* 2014. № 18. С. 112 – 121.
11. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Пік А.І., Марчук Н.М., Марунич О.П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей.* 2020. Вип. 45. С. 35-44.
12. Гевко Ів., Довбуш Т., Цьонь О., Довбуш А., Станько А. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх досліджень. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. стат.* 2021. Вип. 47. С. 63-72.
13. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження./ Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З. та ін. 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: зб. наук. стат.* 2007. Вип. 16. 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. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження./ Рогатинський Р.М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л., та ін. 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: зб. наук. стат.* 1999. Вип. 5. 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: зб. наук. стат.* 2000. Вип. 6. 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: зб. наук. стат.* 2020. Вип. 45. 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 torsorial vibrations of a screw conveyer 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., Rogatinska 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 Conveyer 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 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 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.

References

1. Vasylkiv, V.V., Hevko, I.B., & Babaryka, S.F. (2009). Synthesis of new designs of screw working bodies of machines for applying solid organic fertilizers. *Bulletin of the Dnipropetrovsk State Agrarian University*, 2, 170-173 [in Ukrainian].
2. Hevko, I.B., & Guryk, O.Ya. (2002). 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*, 442, 90–93 [in Ukrainian].
3. Hevko, I.B. (2011). Modeling of the nature of the load on the screw working bodies. *Bulletin of TNTU*, Vol. 16, No. 1, 69-77 [in Ukrainian].
4. Hevko, I., Lyubachivskyi, R., & Dyachun, A. (2012). Synthesis of mixers with screw working bodies. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University: Agricultural engineering research,* 16, 237-246 [in Ukrainian].
5. Hevko, I.B. (1997). *Development and research of low-frequency devices for performing technological processes with flexible screw conveyors.* Extended abstract of candidate’s thesis. Lutsk [in Ukrainian].
6. Hevko, I.B. (2012). Structural synthesis of impulse safety couplings and screws by the method of morphological analysis. *Bulletin of TNTU*, 3(67), 121-134 [in Ukrainian].
7. Hevko, I.B., Vitrovyi, A.O.& Guryk, O.Ya. (2001). A dynamic model of the process of transporting loose materials by a screw conveyor. *Agricultural machines: Collection of scientific articles*, Issue 8, 72-82 [in Ukrainian].
8. Hevko, I.B., & Gud, V.Z. (2019). 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*, 2(33), 25-33 [in Ukrainian].
9. Hevko, I.B., Dyachun, A.E., & Lyubachivskyi, R.O. (2012). Structural synthesis of screw conveyors with advanced technological capabilities by the method of morphological analysis. *Bulletin of SevNTU: coll. of science Ave. Series: Mechanical engineering and transport* , 128/2012, 37-41 [in Ukrainian].
10. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., & Klendiy, V.M. (2014). Synthesis of screw conveyors with flexible working bodies. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University: Agricultural engineering research,* 18, 112 – 121 [in Ukrainian].
11. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Peak, A.I., Marchuk, N.M., & Marunych, O.P. (2020). Synthesis of screw conveyors-mixers. *Agricultural machines: Collection of scientific articles*, 45, 35-44 [in Ukrainian].
12. Hevko, Iv., Dovbush, T., Tsyon, O., Dovbush, A., & Stanko, A. (2021). Synthesis of helical working bodies with elastic surfaces and the results of their research. *Agricultural machines: Collection of scientific articles,* 47, 63-72 [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Gud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubynyak, T. S., Navrotska, T. D., & Kruglik, O. A. (2019). Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research. Ternopil: FOP Palyanitsa V. A. [in Ukrainian].
14. Dmytriv, D.V., Hevko, I.B., & Levenets, V.B. (2007). Reliability of screw-screw mixers. *Agricultural machines: Collection of scientific articles*, 16, 62-74 [in Ukrainian].
15. Hevko, B.M., Danylchenko, M.G., Rohatynskyi, R.M. et al. (1993). *Mechanisms with screw devices*. Lviv: Svit [in Ukrainian].

16. Pylypets, M.I., Hevko, I.B., & Vitrovyi, A.O. (2000). 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",* 412, 84–91 [in Ukrainian].
17. Rohatynskyi, R.M., Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Gud, V.Z., Dyachun, A.E., Melnychuk, A.L., & Slobodian, L.M. (2019). *Prospective screw conveyors: designs, calculation, research.* Ternopil: FOP Palyanytsia V. A. [in Ukrainian].
18. Pylypets, M.I., Hevko, I.B., & Vitrovyi, A.O. (1999). Optimization of the working body with sectional elements for flexible screw conveyors. *Agricultural machines: Collection of scientific articles*, 5, 207–217 [in Ukrainian].
19. Rohatynskyi, R.O., Hevko, I.B., & Rohatynska, L.R. (2013). Optimization of parameters of screw transport and technological systems. *Bulletin of TNTU*, 1 (69), 116–125 [in Ukrainian].
20. Rohatynskyi, R.M., Hevko, I.B., & Dyachun, A.E. (2014). *Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms.* Ternopil: Ivan Pulyuy TNTU [in Ukrainian].
21. Rohatynskyi, R.M., Hevko, I.B., & Dmytriv, D.V. (2000). Modeling the operation of a small-sized blade-screw mixer. *Agricultural machinery. Collection of scientific articles*, 6, 129-135 [in Ukrainian].
22. Rohatynskyi, R.M., Hevko, I.B., Dmytriv, D.V., Gud, V.Z., & Dmytriv, O.R. (2020). Modeling of mixing of components by screw conveyors-mixers. *Agricultural machinery. Collection of scientific articles*, 84-93 [in Ukrainian].
23. Hevko, I.B., Dyachun, A.Ye., Hud, V.Z., Rohatynska, L.R., & Klendiy, V.M. (2015). Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest*, Vol. 45, № 1, pp. 77-86.
24. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Leshchuk, R.Y., Rogatinska, L.R., & Melnychuk, A.L. (2016). Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest*, Vol. 48, № 1, pp. 35-42.
25. Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyer 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. Hud, V., Rogatynskyy, R., Hevko, Iv., Lyashuk, O., Pic, A., & Huryk, O.. (2020). Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. *INMATEH - Agricultural Engineering.* Polytechnic University of Bucharest, Vol. 60. № 1. pp. 29-36.
27. Lyashuk, O. L., Hevko, I. B., Hud, V. Z., Tkachenko, I. G., Hevko, O. V., Sokol, M. O., Tson, O. P. et. al. (2022). Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, Vol. 68, № 3, P. 499-510.
28. Hud, V., Hevko, I., Lyashuk, O., Hevko, O., Sokil, M., & Shust, I. (2020). Research of resonance vibrations of the system “Telescopic screw is a bulk medium” caused by torsional vibrations. Karaganda, № 2 (98), pp. 119-126.
29. Hevko, I., Lyashuk, O., Sokil, M., Slobodian,m L., Hud, V., & Vovk, Yu. (2019). Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader. Karaganda State University Publishing house, 2 (94), 73-81.
30. Hud, V., Lyashuk, O., Hevko, I., Ungureanu, N., Vlăduț, N.-V., Stashkiv, M., Hevko, O., & Pik, A. (2023). Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. *Agriculture*, Vol. 13, № 4. P. 870. (https://doi.org/10.3390/agriculture13040870).
31. Screw for mixing with mechanical fastening of elements : Patent 161908 Ukraine : IPC B21D 11/06 / R. M. Rohatynskyi, 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.

Victor Gud[1], Assoc. Prof., DSc., **Andriy Nikityuk[1], Artem Borovik[2]**, **Artem Holovatyi[3]**
[1]*Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine*
[2]*Azov State Technical University, Dnipro, Ukraine*
[3]*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Experimental Setup for Studying the Efficiency of Mixing Bulk Materials By Screw Working Bodies with Additional Elements

Homogenization of bulk media is a fundamental technological process in the food, chemical, construction and agricultural industries. The modern vector for increasing the technical and economic efficiency of this process is the integration of mixing and moving operations by introducing screw conveyors-mixers.

Modernization of screw conveyors by implementing innovative structural elements is aimed at intensifying the process of homogenization of bulk media. Establishing a correlation between modifications of working bodies and qualitative indicators of mixing exclusively by analytical methods is difficult due to the high complexity of mathematical modeling of multiphase systems, which does not allow achieving the necessary predictive accuracy. In view of this, conducting full-scale experimental studies using specialized bench installations is of priority. Designing and testing such stands allow for verification of theoretical provisions, as well as establishing rational structural and kinematic parameters of screw working bodies equipped with additional intensifier elements to optimize combined transportation and mixing processes.

The purpose of the work is to describe the design of the developed and manufactured experimental installation for research and selection of rational parameters of the process of simultaneous transportation and mixing of bulk materials by screw working bodies with additional elements.

The installation allows to substantiate the rational parameters of the equipment functioning and to assess the efficiency of mixing multicomponent mixtures. It includes a three-section hopper, which allows to conduct research on the heterogeneity of mixing of two- and three-component mixtures, and has the ability to regulate the speed of pouring of individual components. The experimental installation also provides the ability to change the angle of inclination of the screw conveyor branch in the range from 0 to 60 degrees, the speed of rotation of the screw working body in the range from 0 to 1400 rpm, as well as to study the quality of mixing of bulk materials by screw working bodies equipped with additional elements, in particular L-shaped elements with a height of 10, 20 and 30 mm. The main design parameters of the studied screw working body with additional elements are as follows: screw diameter – 96 mm (respectively, the outer casing – 106 mm and the inner casing – 100 mm); screw height – 25 mm; screw pitch – 62 mm; number of turns on the screw – 12.5; number of additional L-shaped elements – 33. The design of the experimental installation is equipped with an Altivar 71 frequency converter, which provides the ability to control the speed of rotation of the screw equipped with mixing elements and collect the necessary experimental data in a personal computer. The Altivar 71 frequency converter is controlled from a personal computer using the PowerSuite software, which allows you to study the productivity of the process of simultaneous transportation-mixing of bulk materials, drive power consumption, torque on the shaft of the installation's electric motor, and also, after measurements, the coefficient of heterogeneity of the mixtures obtained.

experimental setup, research, frequency converter, parameters, process, mixing, screw, screw working body, additional elements

Одержано (Received) 20.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 09.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026

УДК 007.52 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).22-31

М. О. Годунко, доц., канд. техн. наук, **В. А. Мажара,** доц., канд. техн. наук,
В. К. Щербина, Р. А. Кравченко
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: maksimgodunko83@gmail.com, majara@ukr.net, shcherbinavk@gmail.com, roman.kravchenko.84@ukr.net

Дослідження залежності сил затиску в захватному пристрої робота від його конструктивних параметрів та межі міцності деталі

У статті запропоновано удосконалений підхід до визначення сумарних сил затиску призматичних захватних пристроїв роботів. Акцент зроблено на врахуванні конструктивних особливостей (кут призми, ексцентриситет вершини, напрям дії сили інерції) та міцності тонкостінних виробів. Подано основні розрахункові співвідношення, їх аналітичне обґрунтування та відповідні графічні матеріали.
захватні пристрої, сили затиску, промислові роботи, тонкостінні деталі, допустимі напруження

Постановка проблеми. У сучасних автоматизованих виробничих комплексах забезпечення точності й надійності утримування заготовок (деталей) є визначальним чинником стабільності технологічних процесів. Промислові роботи дедалі частіше інтегруються в гнучкі виробничі системи, колаборативні середовища та високошвидкісні лінії, де захватний пристрій повинен не лише надійно фіксувати деталь під час транспортування й обробки, а й гарантувати збереження її геометричної точності та поверхневих характеристик. Особливої актуальності це набуває при роботі з тонкостінними, легкосплавними, композитними або прецизійними деталями, чутливими до локальних контактних напружень. Надмірне підвищення сили затиску може спричинити перевищення допустимих еквівалентних напружень, виникнення пластичних деформацій, мікротріщин, залишкових напружень або втрату точності позиціювання. У високоточних галузях, таких як авіабудування, медицина, мікромеханіка, навіть незначні деформації можуть призвести до браку або зниження ресурсу виробу. У зв’язку з цим постає необхідність науково обґрунтованого визначення оптимальної сили затиску, яка забезпечує баланс між надійністю фіксації та збереженням цілісності деталі. Такий розрахунок має враховувати конструктивні параметри захватного пристрою, умови контакту, коефіцієнти тертя, динамічні навантаження, інерційні сили під час руху робота, а також фізико-механічні властивості матеріалу заготовки. Використання аналітичних моделей у поєднанні з цифровим моделюванням і сенсорними системами контролю сил затиску дозволяє підвищити точність прогнозування та адаптивність роботизованих систем у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом усього періоду розвитку промислової робототехніки проблема визначення, прогнозування та оптимізації сил затиску захватних пристроїв залишається однією з ключових, оскільки саме захват є ланкою безпосередньої взаємодії робота з деталлю. Надійність утримання об’єкта, точність позиціювання, відсутність проковзування та недопущення пошкодження поверхні чи деформації деталі значною мірою залежать від правильно обраної сили

© М. О. Годунко, В. А. Мажара, В. К. Щербина, Р. А. Кравченко, 2026

затиску, конструкції губок, геометрії контактних елементів і характеру керування приводом. У вітчизняній науковій школі вагомий внесок у розроблення методів силового розрахунку захватних пристроїв та дослідження впливу їх конструктивних параметрів на умови утримання деталей зроблено у працях М. О. Годунка [1] та І. І. Павленка [2, 3, 4], де розглянуто особливості роботи призматичних захватів, розрахунок сил затиску для різних схем навантаження, а також вплив кута призм, сил інерції та умов контакту на сумарні сили затиску.

Серед іноземних дослідників фундаментальне значення мають роботи Gareth J. Monkman, Stefan Hesse, Ralf Steinmann і Henrik Schunk [5, 6], у яких систематизовано теоретичні та прикладні основи техніки захоплення, наведено класифікацію механічних, вакуумних та інших типів захватів, розглянуто принципи побудови губок, кінематики та силової взаємодії захвату з об'єктом. Їхня праця «*Robot Grippers*» є однією з базових у сфері промислових захватних систем і заклала важливе підґрунтя для подальших досліджень у напрямі силового аналізу та проєктування роботизованих захватів. Важливий теоретичний внесок у розвиток наукових уявлень про захоплення та маніпулювання об'єктами зробили Antonio Bicchi та Vijay Kumar [7]. У своїх роботах вони узагальнили підходи до аналізу контактної взаємодії, стабільності захоплення, розподілу сил у точках контакту та проблем поєднання точного, делікатного й водночас надійного маніпулювання. Ці положення мають особливе значення для силового аналізу захватних пристроїв, оскільки дозволяють розглядати захоплення не лише як кінематичну, а і як контактно-силову задачу. У подальших дослідженнях істотну увагу приділено питанням узагальнення конструкцій захватів і вибору їх типу залежно від властивостей об'єкта. Зокрема, K. Таі [8] та співавтори у своєму огляді показали, що сучасні роботизовані захвати розвиваються у напрямі підвищення адаптивності, повторюваності, швидкодії та здатності працювати з об'єктами різної форми, жорсткості й чутливості до пошкодження. У цій роботі також наголошено на важливості інтеграції датчиків, зокрема силових, тактильних і візуальних, для підвищення якості захоплення та зниження ризику пошкодження крихких або делікатних об'єктів. Окремий напрям становлять дослідження, присвячені методам вибору та проєктування захватних пристроїв під конкретні виробничі умови. Gualtiero Fantoni [9] та співавтори запропонували підхід до підтримки вибору захватів на основі аналізу принципів захоплення, стратегій звільнення об'єкта та умов автоматизованого складання, що є важливим для інженерного обґрунтування раціональної конструкції захвату ще на етапі проєктування. Такі підходи безпосередньо пов'язані з вибором параметрів, що визначають величину необхідної сили затиску та допустимі контактні напруження. У сучасній робототехніці дедалі більшого поширення набувають адаптивні та м'які захвати, орієнтовані на безпечне маніпулювання крихкими, тонкостінними або неоднорідними об'єктами. У роботі Josie Hughes [10] та співавторів показано, що soft-robotics (м'які робототехнічні системи) підхід базується на використанні податливих матеріалів і структур, які дають змогу зменшити локальні контактні напруження та підвищити адаптивність захвату до геометрії об'єкта. Подібні рішення особливо актуальні в тих випадках, коли традиційний жорсткий захват може призвести до локального перевантаження поверхні деталі. Важливий внесок у розвиток сучасних підходів до проєктування захватних пристроїв зроблено у роботі Zhang B., Xie Y., Zhou J., Wang K., Zhang Z. [11], де представлено комплексний огляд сучасних роботизованих захватів, стратегій захоплення та керування, а також їх застосування в сільськогосподарських роботах. У дослідженні систематизовано основні типи захватних пристроїв (механічні, вакуумні, магнітні, м'які), проаналізовано їх переваги та обмеження залежно від фізико-механічних властивостей об'єктів. Особливу увагу приділено проблемі маніпулювання об'єктами складної форми, змінної жорсткості та підвищеної чутливості до пошкодження, що є характерним, зокрема, для аграрної

продукції. Подальший розвиток цієї тематики відображено в оглядовій праці Yahia A. AboZaid, Mahmoud T. Aboelrayat, Irene S. Fahim та Ahmed G. Radwan [12], де soft robotic grippers (м'які захватні пристрої) розглядаються як перспективний клас захватних систем для роботи з делікатними об'єктами в медицині, промисловості, сільському господарстві та підводних застосуваннях. Автори підкреслюють, що саме здатність таких систем зменшувати жорсткість контакту, адаптуватися до форми об'єкта та поєднувати захоплення з сенсорикою робить їх важливими для задач, у яких критичним є обмеження контактного тиску. Водночас для деталей із малою жорсткістю та тонкими стінками важливими є не лише конструкція губок, а й питання деформації заготовки під дією контактних сил. У цьому контексті заслуговують на увагу дослідження Andreas Schütz [13] та співавторів, у яких зазначено, що для тонкостінних деталей метод скінченних елементів широко застосовується для оптимізації положення опорних і контактних елементів, а також контактних сил з метою мінімізації деформацій і підвищення точності обробки. Такий підхід є особливо цінним для подальшого розвитку методик розрахунку сил затиску в роботизованих системах, орієнтованих на роботу з маложорсткими деталями.

Аналіз літературних джерел показує, що сучасні дослідження у сфері захватних пристроїв роботів розвиваються за кількома взаємопов'язаними напрямами: удосконалення аналітичних моделей силового розрахунку; розвиток контактно-силових теорій захоплення; використання сенсорів сили, тактильних і візуальних систем для адаптивного керування; створення м'яких і комбінованих захватів для делікатних об'єктів; а також застосування числового моделювання для прогнозування деформацій та обґрунтування безпечних режимів затиску. Проте, незважаючи на значну кількість наукових праць, питання визначення раціональних сил затиску з одночасним урахуванням конструктивних параметрів призматичних захватів, напрямку інерційних навантажень і допустимої міцності тонкостінних деталей потребує подальшого дослідження, що й зумовлює актуальність цієї роботи. Особливо це стосується випадків маніпулювання тонкостінними та маложорсткими деталями, для яких характерна підвищена чутливість до локальних контактних навантажень і деформацій. Існуючі підходи здебільшого або орієнтовані на спрощені моделі контактної взаємодії, або не враховують комплексного впливу геометричних параметрів захватного пристрою (довжини важелів, відстані між осями обертання, кута призм, їх просторового розміщення), напрямку дії сил інерції, а також умов взаємодії між поверхнями контакту.

Постановка завдання. Метою даної роботи є встановлення аналітичних залежностей, що описують вплив основних конструктивних і кінематичних параметрів призматичних захватних пристроїв на величину сумарних сил затиску, а також визначення умов забезпечення надійного утримання деталі без перевищення допустимих контактних напружень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) проаналізувати конструктивні схеми захватних пристроїв із призматичними губками та визначити основні параметри, що впливають на формування сил затиску; 2) розробити розрахункову модель визначення сумарних сил затиску з урахуванням геометрії захвату та напрямку дії зовнішніх сил (зокрема сили інерції); 3) дослідити вплив кута призм, кута їх розміщення та інших геометричних параметрів на величину сил затиску; 4) встановити залежності між параметрами захватного пристрою та умовами надійного утримання деталей; 5) визначити раціональні області значень конструктивних параметрів, які забезпечують мінімізацію сил затиску при збереженні стійкості захоплення; 6) сформулювати рекомендації щодо проєктування захватних пристроїв для роботи з маложорсткими та тонкостінними деталями.

Викладення основного матеріалу. Розв'язання поставленої задачі базується на припущенні, що результуючі сили, прикладені до кожної затискної призми, проходять

одночасно через геометричний центр призми та центр мас (або центр симетрії) захоплюваної деталі [1, 2]. Таке припущення дозволяє мінімізувати виникнення додаткових згинальних моментів і перекосів у системі «захват–деталь», забезпечуючи більш рівномірний розподіл контактних напружень. Обраний підхід є раціональним з інженерної точки зору, оскільки сили, визначені у зазначених характерних точках, зручно трансформуються та передаються до привідного двигуна захватного механізму через проміжні ланки - важільні системи, гвинтові пари, зубчасті або клинові передачі. Це спрощує кінематичний та силовий аналіз, підвищує точність розрахунку навантажень на елементи приводу та дозволяє коректно оцінити втрати в механічних передачах. Відповідно до прийнятих допущень формується розрахункова схема для вертикально орієнтованої конструкції захватного пристрою (рис. 1), у якій враховано напрям дії сили тяжіння (ваги), інерційних складових та реакцій у контактних зонах. Така схема є базовою для подальшого аналітичного визначення сил затиску, умов рівноваги та перевірки міцності деталі й елементів механізму.

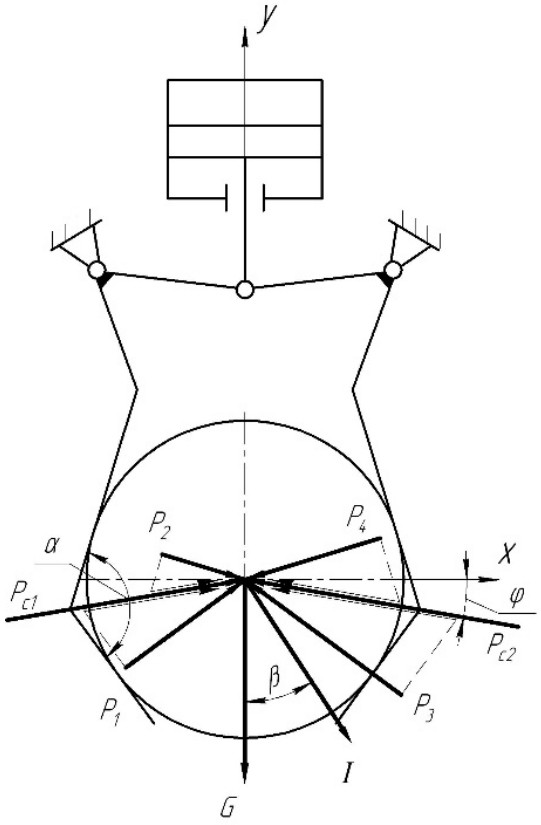


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення сумарних сил затиску (φ < 0)
Джерело: розроблено авторами на основі [1]

Для спрощення подальшого аналізу сили затиску (P_1, P_2, P_3, P_4) приводяться до центра утримуваної деталі [4]. Після цього виконують векторне проєктування кожної з цих сил на вісь симетрії відповідної затискної призми. За прийнятих умов сумарну силу затиску, що діє на ліву призму, визначають як:

$$P_{c1} = P_1 / \sin \alpha/2 + P_2 / \sin \alpha/2 = (P_1 + P_2)/\sin \alpha/2, \quad (1)$$

де P_{c1} - сумарна сила затиску, створена лівою призмою; P_1, P_2 - складові сили від важелів (або штовхачів); α - кут між гранями призми. Аналогічно визначимо сумарну силу затиску для правої призми:

$$P_{c2} = (P_3 + P_4)/\sin \alpha/2 , \quad (2)$$

де P_{c2} - сумарна сила, створена лівою призмою; P_3, P_4 - окремі сили від важелів або штовхачів; α - кут між гранями призми.

Загальна сумарна сила затиску системи:

$$P_c = P_{c1} + P_{c2} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)/\sin \alpha/2. \quad (3)$$

Це базове рівняння, яке показує, що при фіксованих значеннях сил зменшення кута α (звуження призми) приводить до зростання сумарної сили P_c.

Підставивши у наведені вище рівняння значення сили затиску, визначені в попередніх публікаціях і такі, що відповідають прийнятій розрахунковій схемі [2], отримаємо:

$$P_{c1} = \frac{G + I\cos\beta}{2[\cos(\alpha/2 - \varphi) + f \cdot \sin(\alpha/2 - \varphi)] \cdot \sin\alpha/2}; \quad (4)$$

$$P_{c2} = \frac{G + I\cos\beta}{2[\cos(\alpha/2 - \varphi) + f \cdot \sin(\alpha/2 - \varphi)] \cdot \sin\alpha/2} + \frac{I\sin\beta \cdot \cos(\alpha/2 + \varphi)}{\sin\alpha \cdot \sin\alpha/2} + \frac{I\sin\beta \cdot \cos(\alpha/2 - \varphi)}{\sin\alpha \cdot \sin\alpha/2}$$

При співпадінні сили інерції I з вагою деталі G (при β = 0) сумарні сили затиску визначаються:

$$P_{c1} = \frac{G + I}{2(\cos\alpha/2 + f \cdot \sin\alpha/2) \cdot \sin\alpha/2}; \quad (5)$$

$$P_{c2} = \frac{G + I}{2(\cos\alpha/2 + f \cdot \sin\alpha/2) \cdot \sin\alpha/2}. \quad (6)$$

Загальна сумарна сила затиску за цих умов буде:

$$P_c = P_{c1} + P_{c2} = \frac{G + I}{(\cos\alpha/2 + f \cdot \sin\alpha/2) \cdot \sin\alpha/2}. \quad (7)$$

Під час роботи промислового робота із захватним пристроєм деталь утримується завдяки силам затиску, які створюються за допомогою механічних або пневматичних елементів. Однак ці сили мають подвійне призначення. З одного боку, вони повинні бути достатніми для надійного утримання деталі без проковзування, з іншого - не перевищувати допустимого рівня, щоб не пошкодити поверхню або не викликати пластичну деформацію. Тому головне завдання конструктора - знайти оптимальний баланс між силою утримання та допустимими контактними напруженнями.

У випадку затиску тонкостінних або гнучких деталей, останні мають малу жорсткість і низьку здатність протистояти локальним напруженням. Якщо тиск перевищує межу міцності матеріалу. Відповідно можуть з'явитися: вм'ятини; залишкові деформації; тріщини або мікроруйнування на поверхні. Якщо площа контакту між губкою і деталлю $A_{конт}$ мала, тиск ($p = P_c / A_{конт}$) різко зростає навіть при відносно невеликій силі (P_c).

При захватуванні деталей із «м'яких» матеріалів (алюміній, полімери), які мають низьке допустиме напруження, перевищення відповідних показників навіть у межах 10–20% може призвести до постійних деформацій. Особливо це потрібно враховувати при динамічних навантаженнях, коли при русі маніпулятора виникають інерційні сили (I), які додаються до основної сили затиску, тим самим перевищуючи безпечний рівень тиску у місці контакту.

Безпечний режим визначається нерівністю:

$$\rho = \frac{P_c}{A_{конт}} \leq \frac{\sigma_{доп}}{k}, \quad (8)$$

де ρ - фактичний контактний тиск; $\sigma_{доп}$ - допустиме напруження для матеріалу деталі; k - коефіцієнт запасу міцності (рекомендовано 1,5–2,0 для тонкостінних деталей).

Якщо умова не виконується, то необхідно: збільшити площу контакту (ширші губки або еластичні накладки); зменшити силу затиску; змінити кут α призми для рівномірнішого розподілу тиску. Передбачаючи різні ситуації наперед, можливо використати деякі методи зниження ризику пошкодження. Перший метод, це використання м'яких або гнучких губок. Матеріали губок можуть бути такі: гума, поліуретан, фторопласт. Вони рівномірно розподіляють тиск і компенсують мікронерівності поверхні. Другим методом є збільшення контактної площі. За рахунок цього зменшуються локальні напруження, особливо для деталей із малими товщинами стінок. Також можливо регулювати сили затиску. Регулювання здійснюється застосуванням сервоприводів із контролем моменту або пневмосистем із редукційними клапанами для точного налаштування сили. Якщо захватні пристрої мають датчики сили у губках, то це дає змогу в режимі реального часу контролювати силу затиску й уникати перевищення критичного тиску. Крім контролю сил і напружень у реальному часі, можливо також виконувати прогнозовані розрахунки на етапі проєктування за рахунок моделювання (CAE-аналіз). Використання такого типу аналізу дозволяє ще на етапі проєктування визначити, де саме виникають пікові напруження при контакті губки й деталі.

На основі отриманих рівнянь виконано дослідження впливу конструктивних параметрів захватного пристрою, умов затискання та напрямків переміщення утримуваних деталей на величину необхідних зусиль затиску [4]. Як приклад наведено результати для вертикально орієнтованого захватного пристрою за умови зміщення вершин призм відносно його осі (φ > 0). Вплив кута затискних призм (α) проілюстровано відповідними кривими на рис. 2, а вплив кута напрямку сили інерції (β) - на рис. 3. Вихідні дані для побудови зазначених кривих подано в табл. 1.

Таблиця 1 - Вихідні параметри для побудови графічних залежностей сили затиску (P) від кута призми (α) та напрямку прикладення сили інерції (β).

№ кривої	Сили затиску	Умови затиску							
		для P(α)				для P(β)			
		φ	I	β	*f*	φ	I	α	*f*
1	P_{c1}	10°	G	90°	0,1	10°	G	120°	0,1
2	P_{c2}								
3	P_c								
4	P_{c1}	10°	G	0°	0,1	10°	0.5G	120°	0,1
5	P_{c2}								
6	P_c								

Джерело: розроблено авторами

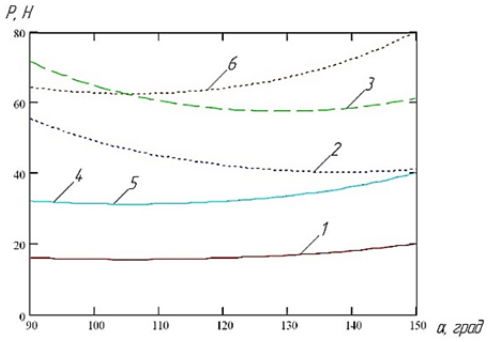


Рисунок 2 – Графіки впливу кута затискних призм (α) на сили затиску (Р)

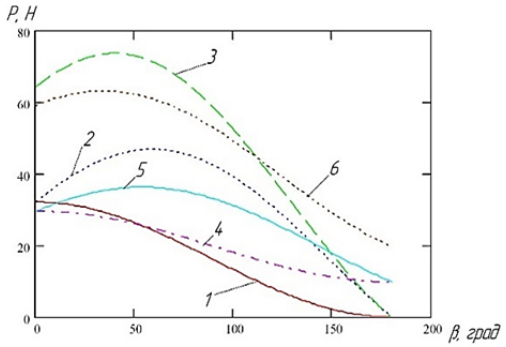


Рисунок 3 – Графіки впливу напрямку сили інерції (β) на сили затиску (Р)

Джерело: розроблено авторами

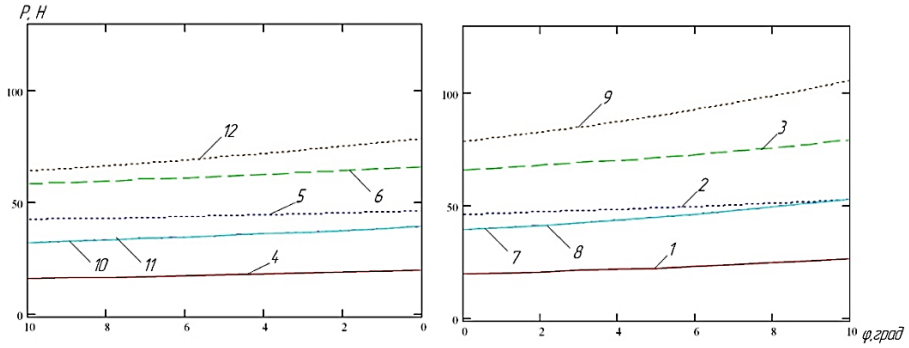
Як видно з рис. 2, зі збільшенням кута затискних призм спостерігається зростання сумарних сил затиску. Це пояснюється зміною умов контакту між губками захвату та деталлю, що призводить до збільшення нормальних реакцій у точках контакту. Отримана залежність свідчить про доцільність обмеження кута призм у певному діапазоні для забезпечення раціонального режиму затиску. Дослідження впливу кута зміщення вершин призм (φ) на величину сумарних сил затиску (рис.4) проведено на основі вихідних даних, наведених у табл. 2.

Таблиця 2 - Вихідні параметри, використані для побудови графічних залежностей сили затиску від кута розміщення затискних призм (φ).

№ крив. на графіку	Зміщення вершин затискних призм	Сили затиску	Умови затиску для Р(φ)			
			β	I	α	*f*
1	в сторону захватного пристрою	P_{c1}	90°	G	120°	0,1
2		P_{c2}				
3		P_c				
4	в сторону від захватного пристрою	P_{c1}				
5		P_{c2}				
6		P_c				
7	в сторону захватного пристрою	P_{c1}	0°	G	120°	0,1
8		P_{c2}				
9		P_c				
10	в сторону від захватного пристрою	P_{c1}				
11		P_{c2}				
12		P_c				

Джерело: розроблено авторами

Згідно з рис. 4, зміна кута розміщення вершин призм істотно впливає на величину сумарних сил затиску. Зокрема, при зміщенні вершин призм у бік захватного пристрою (φ > 0) спостерігається зростання сумарних сил затиску, що пояснюється збільшенням складових нормальних реакцій у точках контакту та відповідним підвищенням сил тертя. У разі зміщення вершин призм у протилежний бік (φ < 0) відбувається зменшення сил затиску, що може призвести до погіршення умов утримання деталі та підвищення ймовірності її проковзування.



а) б)

а) - вершина призми зміщена в сторону від захватного пристрою; б) - вершина призми зміщена в сторону захватного пристрою.

Рисунок 4 – Графіки впливу зміщення вершини призми (φ) на сили затиску (Р)

Джерело: розроблено авторами

Отримана залежність свідчить про те, що кут розміщення призм є важливим параметром, який необхідно враховувати при проєктуванні захватних пристроїв. Раціональний вибір цього параметра дозволяє забезпечити баланс між достатньою силою затиску та недопущенням перевантаження деталі, що є особливо важливим при роботі з тонкостінними та маложорсткими заготовками.

Проведений аналіз впливу конструктивних параметрів захватного пристрою показав, що геометрія затискних елементів, їх просторове розміщення та напрямок дії сили інерції суттєво впливають на величину сумарних сил затиску. Встановлено характер залежностей між основними параметрами та умовами утримання деталі, що дозволяє обґрунтувати раціональні значення конструктивних характеристик захвату.

Отримані результати підтверджують необхідність комплексного врахування як геометричних, так і динамічних факторів при розрахунку сил затиску, особливо для тонкостінних і маложорстких деталей. Це створює передумови для підвищення надійності захоплення та зменшення ризику пошкодження об’єктів у процесі роботизованого маніпулювання.

Висновки:

1. На основі аналізу конструктивних схем захватних пристроїв із призматичними губками встановлено, що визначальними параметрами, які впливають на формування сил затиску, є довжина затискних важелів, відстань між осями обертання, кут розкриття призм, а також кут їх просторового розміщення відносно деталі.

2. Розроблено розрахункову модель визначення сумарних сил затиску, яка враховує геометричні параметри захватного пристрою, схему прикладання сил та напрямок дії інерційних навантажень, що дозволяє більш точно оцінювати умови утримання деталі у порівнянні з існуючими спрощеними підходами.

3. Встановлено, що зі збільшенням кута затискних призм у межах приблизно 100°–120° досягається найбільш раціональне співвідношення між величиною сили затиску та стабільністю утримання деталі, що підтверджує доцільність використання таких значень у практиці проєктування.

4. Досліджено вплив просторового розміщення призм і показано, що зміщення вершин призм у бік захватного пристрою призводить до зростання сумарних сил затиску, тоді як зміщення у протилежний бік зменшує їх, що необхідно враховувати при оптимізації конструкції.

5. Встановлено залежність сумарних сил затиску від напрямку дії інерційних сил: у діапазоні кутів 30°–60° їх вплив є найбільш суттєвим, що обумовлює необхідність урахування динамічних факторів при роботі роботизованих систем.

6. Визначено умови надійного утримання деталей, за яких забезпечується баланс між достатньою силою затиску та недопущенням перевищення допустимих контактних напружень, що є критичним для тонкостінних і маложорстких заготовок.

7. Встановлено раціональні області значень конструктивних параметрів захватного пристрою, які дозволяють мінімізувати сили затиску при збереженні стійкості захоплення, що сприяє підвищенню енергоефективності та зменшенню ризику пошкодження деталей.

8. Сформульовано практичні рекомендації щодо проєктування захватних пристроїв промислових роботів, які можуть бути використані при створенні нових конструкцій або модернізації існуючих систем, зокрема для роботи з деталями складної форми та зниженої жорсткості.

Список літератури

1. Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою / М. О. Годунко та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2023. Вип. 7 (38), ч.II. С. 27-33.
2. Павленко І. І., Годунко М. О**.** Розрахунок не зрівноважено утримуваних деталей захватними пристроями роботів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2019. Вип.1 (32). С. 202-210.
3. Павленко І. І., Годунко М. О. Визначення розрахункових сил затиску в захватних пристроях промислових роботів: *Міжнародний науково-технічний журнал Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. Том 85, №1. С. 85-92.
4. Павленко І. І., Годунко М. О. Аналіз впливу конструктивних параметрів захватних пристроїв роботів на сумарні сили затиску деталей: Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2008. Вип. 21. С. 168-172.
5. Hesse S. Greifertechnik: effektoren fur roboter und automaten. Carl Hanser Verland Munchen, unveranderter Nachdruck der 1. Auflage von 2011. P. 280.
6. Monkman G. J., Hesse S., Steinmann R., Schunk H. *Robot Grippers*. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. 463 p.
7. Bicchi A., Kumar V. Robotic grasping and manipulation. In: *Control Problems in Robotics and Automation*. Berlin: Springer, 2002. P. 55–74.
8. Tai K., El-Sayed A.-R., Shahriari M., Biglarbegian M., Mahmud S. State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*. 2016. Vol. 5, No. 2. Article 11.
9. Fantoni G., Capiferri S., Tilli J. Method for supporting the selection of robot grippers. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 21. P. 330–335.
10. Hughes J., Culha U., Giardina F., Guenther F., Rosendo A., Iida F. Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016. Vol. 3. Article 69.
11. Zhang B., Xie Y., Zhou J., Wang K., Zhang Z. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, and their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 177. Article 105694.
12. AboZaid Y. A., Aboelrayat M. T., Fahim I. S., Radwan A. G. Soft robotic grippers: Technologies, materials, and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024. Vol. 372. Article 115380.
13. Schütz A., et al. Robot machining of thin-walled workpieces with automatically reconfigurable fixturing systems. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 120. P. 1065–1070.

References

1. Hodunko, M.O., Kyslun, O.A., Mazhara, V.A. et.al. (2023). Development of a Methodology for Force Calculation of a Vertically Oriented Gripping Device. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*: *Collection of Scientific Papers,* 7 (38) , 27-33 [in Ukrainian].
2. Pavlenko, I.I. & Hodunko, M.O. (2019). Calculation of Unbalanced Parts Held by Robot Gripping Devices. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1 (32) , 202–210 [in Ukrainian].
3. Pavlenko, I.I. & Hodunko, M.O. (2019). Determination of Calculated Clamping Forces in Gripping Devices of Industrial Robots. *Mechanics and Advanced Technologies*, International Scientific and Technical Journal. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Vol. 85, No. 1, pp. 85–92 [in Ukrainian].
4. Pavlenko I.I. & Hodunko M.O. (2008). Analysis of the Influence of Structural Parameters of Robot Gripping Devices on the Total Clamping Forces of Parts. *Collection of Scientific Papers of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Industrial Engineering, Automation*, 21, 168–172 [in Ukrainian].

5. Hesse, S. Greifertechnik: effektoren fur roboter und automaten. Carl Hanser Verland Munchen, unveranderter Nachdruck der 1. Auflage von 2011. 280.
6. Monkman, G.J., Hesse, S., Steinmann, R., Schunk, H. (2007). *Robot Grippers*. Weinheim: Wiley-VCH.
7. Bicchi, A., & Kumar, V. (2002). Robotic grasping and manipulation. In: *Control Problems in Robotics and Automation* (pp. 55–74). Springer, Berlin.
8. Tai, K., El-Sayed, A.-R., Shahriari, M., Biglarbegian, M., & Mahmud, S. (2016). State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*, 5(2), 11.
9. Fantoni, G., Capiferri, S., & Tilli, J. (2014). Method for supporting the selection of robot grippers. *Procedia CIRP*, 21, 330–335.
10. Hughes, J., Culha, U., Giardina, F., Guenther, F., Rosendo, A., & Iida, F. (2016). Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 69.
11. Zhang, B., Xie, Y., Zhou, J., Wang, K., Zhang, Z. (2020). State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, and their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105694.
12. AboZaid, Y.A., Aboelrayat, M.T., Fahim, I.S., & Radwan, A.G. (2024). Soft robotic grippers: Technologies, materials, and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 372, 115380.
13. Schütz, A., et al. (2023). Robot machining of thin-walled workpieces with automatically reconfigurable fixturing systems. *Procedia CIRP*, 120, 1065–1070.

Maksym Hodunko, PhD tech. sci., **Vitalii Mazhara**, PhD tech. sci., **Volodymyr Shcherbyna**, **Roman Kravchenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of the Influence of Structural Parameters of Robot Gripping Devices on the Total Clamping Forces of Parts Considering the Ultimate Strength of the Part

The increasing integration of industrial robots into modern automated and flexible manufacturing systems requires highly reliable and precise gripping mechanisms capable of handling parts without causing damage. This is particularly critical for thin-walled, lightweight, and precision components, which are highly sensitive to local contact stresses. The present study focuses on improving the methodology for determining total clamping forces in prismatic robot grippers, taking into account both structural parameters of the gripping device and the ultimate strength of the handled part .

The paper proposes an enhanced analytical approach based on a rational force transmission model, where resultant forces are assumed to pass through both the geometric center of the gripping prism and the center of mass of the workpiece. This assumption minimizes additional bending moments and ensures a more uniform distribution of contact stresses. The developed mathematical model incorporates key influencing factors such as the prism angle (α), displacement of prism vertices (φ), direction of inertial forces (β), friction conditions, and dynamic loads arising during robot motion.

Analytical expressions for determining the total clamping force are derived, demonstrating that a decrease in the prism angle leads to a significant increase in the resultant clamping force. Additionally, it is shown that shifting the prism vertices toward the gripper increases the clamping force, while the direction and magnitude of inertial forces substantially affect gripping conditions, especially during dynamic operations. The study also highlights the critical importance of maintaining contact pressure below allowable material stress limits, particularly for thin-walled components, where even minor overloads can result in plastic deformation, microcracks, or loss of dimensional accuracy.

The research includes parametric analysis supported by graphical dependencies illustrating the influence of structural and operational parameters on clamping forces. Based on the obtained results, recommended ranges of design parameters for vertically oriented grippers operating under combined motion conditions are established. It is shown that optimal performance can be achieved by selecting appropriate prism geometry, controlling clamping force, increasing contact area, and implementing compliant gripping surfaces.

Furthermore, the study emphasizes the role of modern technologies such as force sensors, adaptive control systems, and CAE-based simulation tools in ensuring real-time monitoring and adjustment of gripping forces. These approaches enable enhanced reliability, reduced defect rates, and improved safety in robotic manufacturing processes.

Overall, the proposed methodology contributes to achieving a balanced compromise between secure part fixation and prevention of structural damage, thereby improving the efficiency, stability, and adaptability of industrial robotic systems in advanced manufacturing environments.

robot grippers, clamping force, industrial robots, allowable stresses, contact pressure, adaptive control

Одержано (Received) 27.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 621.82 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).32-40

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

Теоретичні дослідження силових параметрів навивання стрічкових гвинтових заготовок

Представлено конструкцію оснащення для формування навивних стрічкових гвинтових заготовок, перевагами якого є підвищення якості формування навивних стрічкових гвинтових заготовок, що включає зменшення ймовірності утворення гофр у зоні стискання матеріалу стрічки та забезпечення можливості формування витків із кроком, що є більшим за товщину стрічки. На основі розробленої розрахункової схеми проведено теоретичні дослідження силових параметрів операції навивання стрічкових гвинтових заготовок на оправу для проектування спеціального технологічного оснащення, виведено аналітичні залежності, що дозволяють прогнозувати силові параметри процесу залежно від конструктивних параметрів необхідних стрічкових гвинтових заготовок. На основі представлених рівнянь можна проектувати необхідне технологічне оснащення для навивання стрічкових гвинтових заготовок. При цьому встановлено умови для зменшення моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки, а отже, і зменшення необхідної потужності виконання вказаного процесу. Побудовано графіки залежності моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки та сили навивання стрічки на оправу від конструктивних параметрів стрічки, при цьому встановлено, що збільшення товщини та ширини стрічки призводить до суттєвого квадратичного зростання моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки та сили навивання стрічки на оправу, що необхідно враховувати при проектуванні технологічного оснащення ти виборі обладнання.

стрічкова гвинтова заготовка, навивання, згин, крутний момент, оснащення, сили процесу, конструктивні параметри

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку машинобудування в умовах ринкових відносин зумовлюють необхідність розроблення та впровадження ефективних методів підвищення експлуатаційних і технологічних показників деталей машин і засобів технологічного оснащення. Реалізація таких підходів забезпечує підвищення якості продукції, а також формування гнучких виробничих систем, здатних до швидкого переналагодження на виготовлення виробів різних типорозмірів відповідно до кон'юнктури ринку. Для сучасного машинобудування, як вітчизняного, так і світового, характерним є суттєве розширення номенклатури деталей різних конструктивних груп, зокрема гвинтового типу. Важливе місце серед них посідають стрічкові гвинтові заготовки, що підтверджується стійкою тенденцією до зростання обсягів їх виробництва та сфер використання. Такі заготовки широко застосовуються у харчовій, хімічній і переробній галузях, а також у сільськогосподарському машинобудуванні та інших секторах промисловості.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, що орієнтовані на підвищення ефективності та якості технологічних процесів виготовлення гвинтових елементів, залишається ряд проблемних завдань, що виникають під час їх практичного впровадження. Це зумовлює актуальність розроблення і впровадження більш ефективних, ресурсозберігаючих методів їх виготовлення.

© А. Є. Дячун, В. Ю. Грасовник, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика проєктування технологічного оснащення та інструментів, встановлення параметрів методів формоутворення гвинтових елементів різноманітних типорозмірів охоплена у значній кількості наукових публікацій, серед яких варто відмітити роботи Гевка Б.М. [1, 21], Рогатинського Р.М. [8, 12, 13, 15], Ляшука О.Л. [6–8, 11], Пилипця М.І. [1-3], Васильківа В.В. [2–5], Гевка І.Б. [6–20], у яких представлено теоретичні дослідження технологічних процесів формоутворення гвинтових елементів, запропоновано оптимальні параметри технологічного оснащення, перевірено їх адекватність експериментальними методами та впровадженням у виробництво.

Закономірності зміни силових параметрів та напружено-деформованого стану процесів формоутворення гвинтових елементів методами пластичного гнуття із застосуванням циліндричних оправок досліджено у в роботах [1, 4, 6, 8].

Одними із технологічних підходів формоутворення гвинтових елементів є методи навивання металевої стрічки на оправку, форма якої відповідає необхідній формі гвинтових елементів. При цьому зовнішні силові фактори процесу утворюються внаслідок обертання оправки та взаємодії стрічки із формувальним роликом [3, 4, 11]. Основна увага у відповідних дослідженнях зосереджена на розробленні технологічного оснащення та оптимізації його конструктивних параметрів [9, 10, 14, 19]. Недоліком багатьох пристроїв для навивання профільних гвинтових заготовок одним роликом є зниження якості гвинтових елементів за рахунок зростання ймовірності утворення гофр у зоні стискання матеріалу стрічки а також відсутня можливість формування витків із кроком, що є більшим за товщину стрічки. У роботі [22] представлено конструкції нового технологічного оснащення для формоутворення гвинтових елементів на токарному верстаті, що потребують додаткового теоретичного та експериментального дослідження.

Метою роботи є теоретичні дослідження силових параметрів операції навивання стрічкових гвинтових заготовок на оправу для проектування спеціального технологічного оснащення.

Виклад основного матеріалу. Розроблене спеціальне технологічне оснащення на базі пристроїв, представлених у роботі [22] для навивання стрічкових гвинтових заготовок (рис. 1, 2) працює таким. Стрічкову заготовку 10 встановлюють у паз 7 оправки 1 та фіксують за допомогою затискного механізму 9 при її розміщенні у нижній частині оправки з контактом кромки стрічки із зовнішньою циліндричною поверхнею оправки 1. Після цього патрон 4 разом з оправкою 1 і закріпленою заготовкою здійснює поворот у напрямку формувального ролика 13 до досягнення вертикального положення стрічки 10. При цьому з боку ролика кут нахилу стрічки відповідає куту встановлення формувального ролика 13. Наступним етапом за допомогою поперечної подачі верстата здійснюють підведення формувального ролика 13 до стрічки 10 із введенням заготовки у паз 15 ролика та одночасно у паз 18 державки 17, забезпечуючи притискання стрічки до поверхні оправки 1 без виникнення пластичної деформації. Після позиціонування елементів вмикають подачу формувального ролика 13, величина якої відповідає заданому кроку витків гвинтової заготовки 8, а також обертальний рух патрона 4 разом з оправкою 1. У результаті реалізується процес навивання стрічкової заготовки 10 на оправку 1 з утворенням гвинтової заготовки 8. По завершенні процесу формоутворення гвинтова заготовка 8 виходить із паза 15 формувального ролика 13. Далі здійснюють відведення заднього центра 5 верстата, розтискання заготовки та зняття сформованої стрічкової гвинтової заготовки 8.

До переваг пристрою відноситься підвищення якості формування навивних стрічкових гвинтових заготовок, що включає зменшення ймовірності утворення гофр у

зоні стискання матеріалу стрічки та забезпечення можливості формування витків із кроком, що є більшим за товщину стрічки.

Для проектування технологічного оснащення для формування навивних стрічкових гвинтових заготовок необхідно дослідити силові параметри цього процесу.

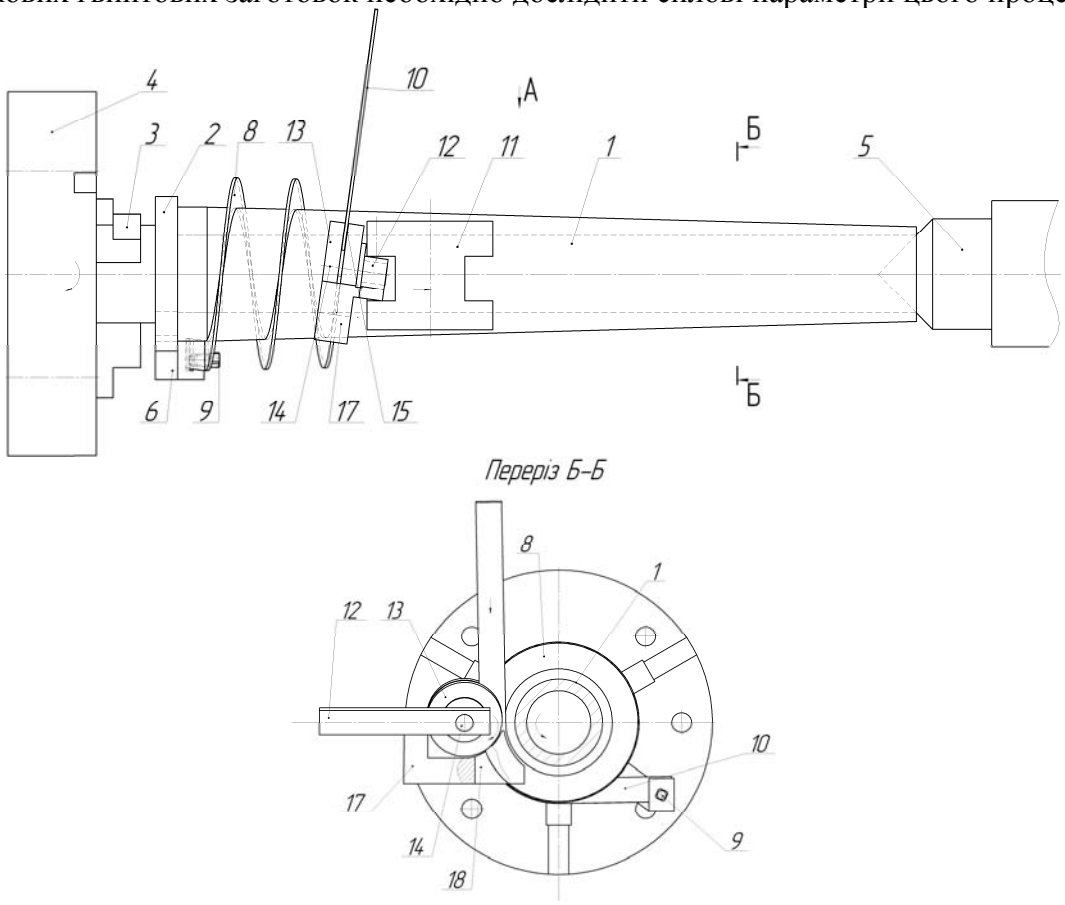


Рисунок 1 – Пристрій для навивання стрічкових гвинтових заготовок: 1 – оправа; 2 – оправка; 3 – кулачок; 4 – патрон; 5 – центр; 6 – державка; 8 - стрічкова гвинтова заготовка; 9 – механізм затиску; 10 – стрічка; 11 – різцетримач; 12 – державка; 13 – формувальний ролик; 14 – вісь; 15 - паз формувального ролика; 17 – державка; 18 - паз державки

Джерело: розроблено авторами

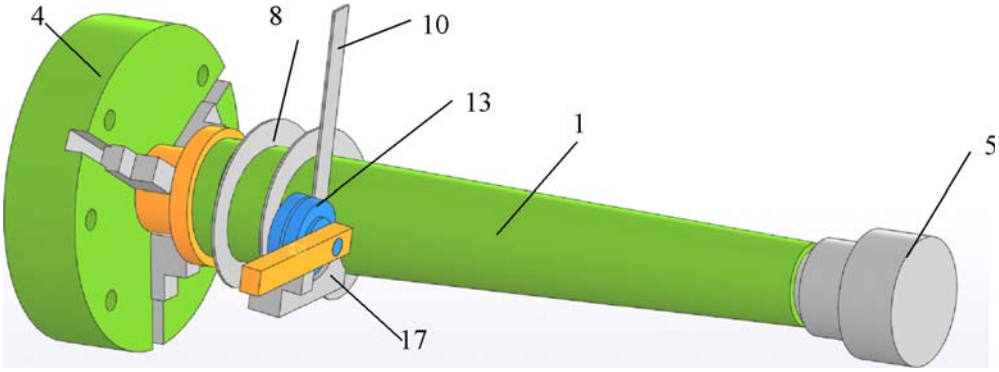


Рисунок 2 – Пристрій для навивання стрічкових гвинтових заготовок

Джерело: розроблено авторами

В наукових працях [1], [8] розглянуто навивання стрічкових гвинтових заготовок з малим кроком витків із застосуванням звичайних роликів без додаткових формувальних елементів. Наявність додаткової державки із пазом під роликом а також формування витків необхідного кроку підвищує якість процесу навивання і призводить до деякої зміни силових параметрів процесу. Розрахункову схему силових параметрів процесу формування навивних стрічкових гвинтових заготовок показано на рисунку 3. Рівняння рівноваги силових параметрів, що діють на гвинтовий елемент записано таким чином:

$$\left.\begin{array}{r} \text{по осі } y\text{: } F_{t1} + F_{t2}\cdot\cos\theta - N\cdot\cos\theta - F\cdot\sin\theta + F_{t3}\cdot\cos\beta + P_2\cdot\sin\alpha = 0\,; \\ \text{по осі } x\text{: } P + F_{t2}\cdot\sin\theta + N\cdot\sin\theta - F\cdot\cos\theta - F_{t3}\cdot\sin\beta = 0\,; \\ \text{сума моментів: } P\cdot l + F_{t1}\cdot R_w + F_{t2}\cdot R_0 - N\cdot R_c + F_{t3}\cdot R_c - M_o = 0\,, \end{array}\right\} \quad (1)$$

де F_{t1} - сила тертя між робочими поверхнями ролика та зовнішньою кромкою стрічкової заготовки; F_{t2} - сила тертя між стрічковою гвинтовою заготовкою та оправою; θ - кут зони згину стрічки на оправу; N - поздовжня сила; F – сила реакції оправи у зоні навивання стрічки на оправу; F_{t3} - сила тертя між стрічковою гвинтовою заготовкою та пазом додаткової державки; β - середній кут контакту між стрічковою гвинтовою заготовкою та пазом додаткової державки; P_2 – сила формування кроку витків; P – сила навивання стрічки на оправу; l - зміщення центру формувального ролика вверх відносно оправи; R_w – зовнішній радіус навивної стрічкової гвинтової заготовки; R_0 – зовнішній радіус оправи; R_c – середній радіус навивної стрічкової гвинтової заготовки; M_0 – момент навивання стрічкової гвинтової заготовки.

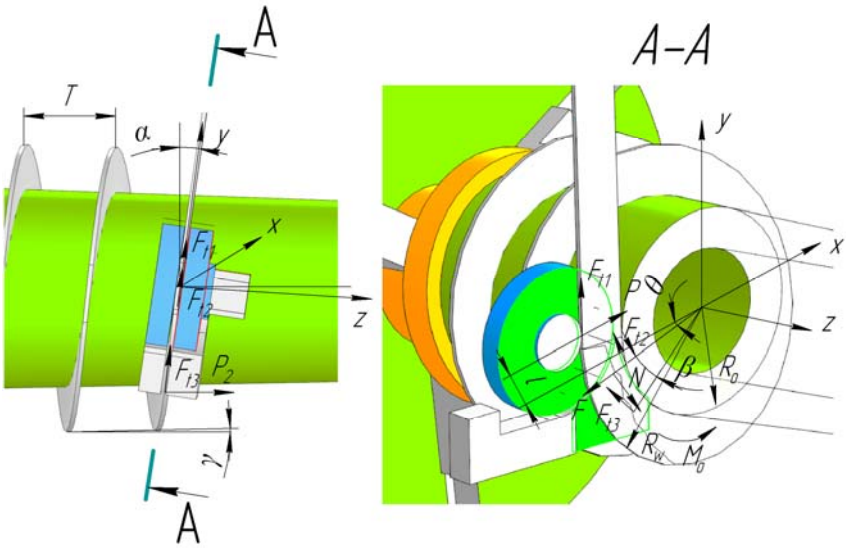


Рисунок 3 – Розрахункова схема силових параметрів процесу формування навивних стрічкових гвинтових заготовок спеціальним пристроєм

Джерело: розроблено авторами

Сили тертя визначено за залежностями:

$$F_{t1} = \mu_1 \cdot P\,; \quad (2)$$

$$F_{t2} = \mu_2 \cdot F\,; \quad (3)$$

$$F_{t3} = \mu_3 \cdot P_2\,, \quad (4)$$

де μ_1 - коефіцієнт тертя між робочими поверхнями ролика та зовнішньою кромкою стрічкової заготовки; μ_2 - коефіцієнт тертя між стрічковою гвинтовою заготовкою та оправою; μ_3 - коефіцієнт тертя між стрічковою гвинтовою заготовкою та пазом додаткової державки.

Із першого рівняння системи рівнянь (1), враховуючи рівняння (2) – (4), знайдено поздовжню силу:

$$N = \frac{\mu_1 \cdot P + F \cdot (\mu_2 \cdot \cos\theta - \sin\theta) + P_2 (\mu_3 \cos\beta + \sin\alpha)}{\cos\theta}. \quad (5)$$

Із другого рівняння системи рівнянь (1) знайдено силу реакції оправи у зоні навивання стрічки на оправу:

$$F = \frac{P \cdot (-\mu_1 \cdot \mathrm{tg}\,\theta - 1) - P_2 (\mu_3 \cos\beta + \sin\alpha)\mathrm{tg}\,\theta}{\mu_2 \cdot \sin\theta - \cos\theta - (\mu_2 \cdot \cos\theta - \sin\theta)\mathrm{tg}\,\theta}. \quad (6)$$

Із третього рівняння системи рівнянь (1) знайдено момент навивання стрічкової гвинтової заготовки

$$M_o = P(l + \mu_1 R_w + \mu_2 R_0) + (-N + P_2) \cdot R_c. \quad (7)$$

Сила навивання стрічки на оправу визначається залежністю:

$$P = \frac{M_b}{l}, \quad (8)$$

де M_b – момент згину стрічки на оправу.

В результаті експериментальних досліджень встановлено [22], що при розташуванні осі формувального ролика вище осі оправи значення кута θ зони згину стрічки на оправу є незначними, тому його для спрощення розрахунків можна прийняти рівним нулю, а рівняння (5) – (7) будуть мати вигляд:

$$P = F; \quad (9)$$

$$N = P(\mu_1 + \mu_2) + P_2 (\mu_3 \cos\beta + \sin\alpha); \quad (10)$$

$$M_o = P(l + \mu_1 R_w + \mu_2 R_0 - (\mu_1 + \mu_2) R_c) + P_2 R_c (\mu_3 \cos\beta + \sin\alpha - \mu_3). \quad (11)$$

Сила формування кроку витків:

$$P_2 = \frac{M_w}{R_c}, \quad (12)$$

де M_w – момент згину стрічки при формуванні кроку витків.

Момент згину стрічки на оправу [1]:

$$M_b = \frac{\beta_\sigma \sigma_{TO}}{3}\left[H\sqrt{\frac{\rho_o}{R_w}}\left({R_w}^2 + 2R_0\sqrt{R_0 \cdot R_w} - 3{\rho_н}^2 \right)\right] + \frac{\beta_\sigma \Pi}{9} H \frac{\sqrt{\rho_o}}{R_w} \times$$

$$\times 3\ln\left(\frac{R_w}{\rho_o}\right)\left({R_w}^2 - 3\rho_н^2\right) + 4\rho_н\sqrt{\rho_н R_w}\left(4 + 3\ln\frac{\rho_н}{\rho_o}\right) - 2\left[{R_w}^2 + 9\rho_н^2\right] - 2r\sqrt{R_w \cdot R_0}\left(3\ln\frac{R_0}{\rho_o} - 2\right), \quad (13)$$

де σ_{TO} - екстрапольована межа текучості матеріалу стрічкової гвинтової заготовки; Π - лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічкової гвинтової заготовки; β_σ - коефіцієнт,

який залежить від співвідношення головних напружень; H – товщина стрічки; ρ_o - радіус нейтрального шару деформації; $\rho_н$ - радіус нейтрального шару напружень.

Момент згину стрічки при формуванні кроку витків [12]:

$$M_w = \beta_\sigma B \cdot \left[\sigma_{T0} \cdot \frac{H^2}{4} + \Pi \cdot \left(\frac{R_1^2 + (R_1 - H)^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{R_1}{R_1 - H}} - \frac{R_1^2 - (R_1 - H)^2}{8} \right) \right], \qquad (14)$$

де B – ширина стрічки; R_1 – радіус кривизни витка.

На основі представлених рівнянь можна проектувати необхідне технологічне оснащення для навивання стрічкових гвинтових заготовок. При цьому, для зменшення моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки, а отже, і зменшення необхідної потужності виконання вказаного процесу, потрібно зменшувати коефіцієнти тертя μ_1 та μ_2, наприклад, використовуючи змащувальні речовини.

Використовуючи представлені вище рівняння, побудовано графіки залежності моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки (рис. 4) із сталі 08кп та сили навивання стрічки на оправу (рис. 5) від конструктивних параметрів стрічки.

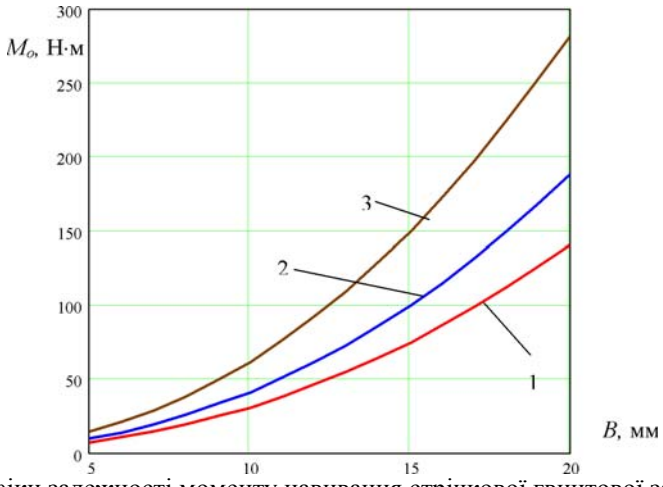


Рисунок 4 – Графіки залежності моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки від ширини стрічки: 1) H=1,5 мм; 2) H=2 мм; 3) H=2,5 мм

Джерело: розроблено авторами

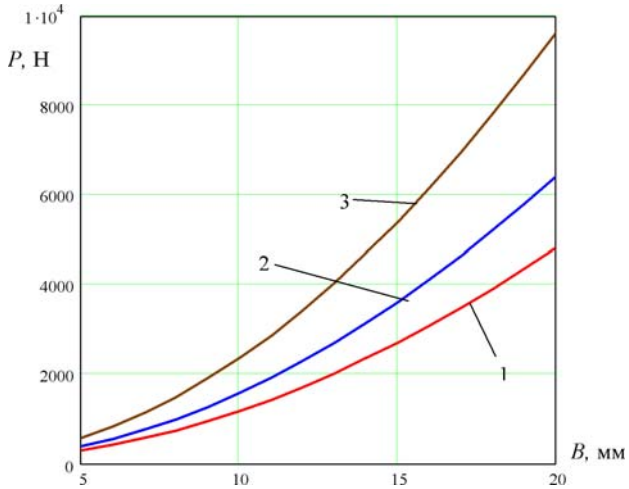


Рисунок 5 – Графіки залежності сили навивання стрічки на оправу від ширини стрічки: 1) H=1,5 мм; 2) H=2 мм; 3) H=2,5 мм

Джерело: розроблено авторами

На основі графіків рис. 4 та 5 встановлено, що збільшення товщини та ширини

стрічки призводить до суттєвого квадратичного зростання моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки та сили навивання стрічки на оправу, що необхідно враховувати при проектуванні технологічного оснащення ти виборі обладнання.

Висновки:

1. Представлено конструкцію оснащення для формування навивних стрічкових гвинтових заготовок, перевагами якого є підвищення якості формування навивних стрічкових гвинтових заготовок, що включає зменшення ймовірності утворення гофр у зоні стискання матеріалу стрічки та забезпечення можливості формування витків із кроком, що є більшим за товщину стрічки.

2. На основі розробленої розрахункової схеми проведено теоретичні дослідження силових параметрів операції навивання стрічкових гвинтових заготовок на оправу для проектування спеціального технологічного оснащення, виведено аналітичні залежності, що дозволяють прогнозувати силові параметри процесу залежно від конструктивних параметрів необхідних стрічкових гвинтових заготовок.

3. На основі представлених рівнянь можна проектувати необхідне технологічне оснащення для навивання стрічкових гвинтових заготовок. При цьому, для зменшення моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки, а отже, і зменшення необхідної потужності виконання вказаного процесу, потрібно зменшувати коефіцієнти тертя між робочими поверхнями ролика та зовнішньою кромкою стрічкової заготовки та між стрічковою гвинтовою заготовкою та пазом додаткової державки, наприклад, використовуючи змащувальні речовини.

4. Побудовано графіки залежності моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки із сталі 08кп та сили навивання стрічки на оправу від конструктивних параметрів стрічки, при цьому встановлено, що збільшення товщини та ширини стрічки призводить до суттєвого квадратичного зростання моменту навивання стрічкової гвинтової заготовки та сили навивання стрічки на оправу, що необхідно враховувати при проектуванні технологічного оснащення ти виборі обладнання.

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.
2. 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.
3. Vasylkiv 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.
4. 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.
5. Васильків В. В., Радик Л. Д., Гевко І. Б. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату. *Наукові нотатки*. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
6. Hevko 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Гупка А. Б., Третьяков О. Л. Технологічне проєктування та виготовлення гвинтових транспортно-технологічних робочих органів. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. 457 с.
12. Рогатинський Р. М., Гевко І. Б., Ляшук О. Л. та ін. Перспективні гвинтові конвеєри : монографія. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Гевко І. Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. 2011. Т. 16, № 1. С. 69–77.
18. Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Брикса А. О. та ін. Особливості конструкцій і проєктування лопатевих гвинтових змішувачів. *Центральноукраїнський науковий вісник*. Технічні науки. 2023. Вип. 8(39), ч. 2. С. 24–34.
19. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Комар Р. В. та ін. Технологічне проєктування способів виготовлення U-подібних гвинтових поверхонь. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. 2. С. 109–116.
20. 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.
21. 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.
22. Дячун, А. Є., Грасовник, В. Ю. Дослідження операції навивання стрічкових гвинтових робочих органів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2026. Вип. 13(44). С. 193–201.

References

1. Hevko, B. M., Pylypets, M. I., Vasylkiv, 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. [in Ukrainian].
2. Pylypets, M. I., Vasylkiv, 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].
3. Vasylkiv, 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.
4. Vasylkiv, 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].
5. Vasylkiv, 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].
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/1), 75–83 [in Ukrainian].

10. Hevko, I. B., Diachun, A. Ye., Dubyniak, T. S., Stibailo, O. Yu., & Zolotyi, R. Z. (2025). Research of operations of the technological process of manufacturing shredding knives on auger spirals. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 99–108 [in Ukrainian].
11. 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].
12. Rohatynskyi, R. M., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., et al. (2019). *Perspective screw conveyors*: monograph. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
13. Rohatynskyi, 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. Puliuia [in Ukrainian].
14. 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.
15. Rogatinskiy, 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..
16. 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].
17. Hevko, I. B. (2011). Modeling of load character on screw working bodies. *Visnyk TNTU*, 16(1), 69–77 [in Ukrainian].
18. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Bryksa, A. O., et al. (2023). Features of designs and design of blade screw mixers. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 8(39/2), 24–34 [in Ukrainian].
19. Hevko, I. B., Rohatynskyi, R. M., Komar, R. V., et al. (2025). Technological design of manufacturing methods for U-shaped screw surfaces. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42/2), 109–116 [in Ukrainian].
20. 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].
21. 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].
22. Dyachun, A. Y., & Grasovnyk, V. Y. (2026). The study of the winding operation of strip helical working elements. Central Ukrainian Scientific Bulletin Technical Sciences, (13(44), 193–201 [in Ukrainian].

Andrii Diachun, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,**Vasyl Grasovnyk**
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Theoretical Investigation of the Force Parameters in Winding Strip Helical Blanks

For modern mechanical engineering, both domestic and global, a significant expansion of the range of parts belonging to various structural groups, in particular of the screw type, is characteristic. An important place among them is occupied by strip helical blanks, as evidenced by a steady trend toward increasing production volumes and expanding application fields. Such blanks are widely used in the food, chemical, and processing industries, as well as in agricultural machinery manufacturing and other industrial sectors.The aim of this work is to conduct theoretical studies of the force parameters of the operation of winding strip helical blanks onto a mandrel for the design of specialized technological tooling.

A device design for manufacturing wound strip helical blanks is presented. Its advantages include improved quality of forming wound strip helical blanks due to the prevention of stability loss of the wound turns in the lower part of the mandrel, as well as expanded technological capabilities of the device by enabling the formation of turns with a pitch greater than the strip thickness. Based on the developed computational scheme, theoretical studies of the force parameters of the operation of winding strip helical blanks onto a mandrel for the design of specialized technological tooling have been carried out. Analytical relationships have been derived that make it possible to predict the force parameters of the process depending on the design parameters of the required strip helical blanks. On the basis of the presented equations, the required technological tooling for winding strip helical blanks can be designed. In this case, in order to reduce the winding torque of the strip helical blank, and consequently to decrease the power required to perform the process, it is necessary to reduce the coefficients of friction between the working surfaces of the roller and the outer edge of the strip blank, as well as between the strip helical blank and the groove of the auxiliary holder, for example, by using lubricants. Graphs of the dependence of the winding torque of a steel strip helical blank and the force of winding the strip onto the mandrel on the strip design parameters have been constructed.

It has been established that an increase in the strip thickness and width leads to a significant quadratic growth of both the winding torque of the strip helical blank and the force of winding the strip onto the mandrel, which must be taken into account when designing technological tooling and selecting equipment.l torque.

strip helical blanks, winding, deformation, torque, tooling, forces of the process, design parameters

Одержано (Received) 16.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 10.03.2026

УДК 681.6 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).41-52

П. М. Єрьомін, канд. техн. наук, **А. М. Кириченко**, проф., д-р техн. наук, **А. І. Гречка,** доц., канд. техн. наук, **В. В. Свяцький**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: p24124@gmail.com

Підвищення точності розмірів деталей з технічних пластиків, виготовлених на 3D-принтерах методом наплавлення

Досліджено сучасний стан використання адитивних FDM-технологій 3D-друку під час виготовлення охоплюємих та охоплюючих деталей із технічних пластиків. Обґрунтовано можливість підвищення геометричної точності виготовлення пластикових виробів шляхом застосування вдосконаленого процесу 3D-друку. Запропоновано покращену методику оцінювання якості виготовлених виробів, зокрема відповідності їх фактично отриманих геометричних параметрів заданим у спеціально розробленій 3D-моделі. Також розроблено рекомендації щодо вибору режимів 3D-друку та адаптованих технологічних підходів до виготовлення деталей із різних марок технічних пластиків.
FDM-технології, точність розмірів, технічний пластик, 3D-друк

Постановка проблеми. В конструкціях сучасних машин та механізмів невпинно зростає доля неметалевих деталей. Це дозволяє економити дефіцитні та коштовні метали, знизити вагу деталей, підвищити стійкість виробів до впливу оточуючого середовища та полегшити їх утилізацію після закінчення строку експлуатації. За останнє десятиріччя отримали дуже широке використання сучасні адитивні FDM-технології (від англійського Fused Deposition Modeling – моделювання методом осадження розплавленої нитки). Це стало можливим завдяки відкриттю ряду патентів за цією тематикою, а також можливості швидкого та ефективного створення в умовах одиничного або дрібносерійного виробництв різноманітних прототипів моделей, макетів та готових деталей. Друк виконується технічними пластиками, вартість яких значно менша, а механічні властивості в багатьох випадках майже не поступаються деталям із чорних або кольорових металів та сплавів.

За рахунок використання FDM-технології (рис.1) можливо досягти суттєвої економії витратних матеріалів. 3D-принтер під керуванням спеціалізованого програмного забезпечення пошарово накладає (друкує) розігрітий пластик саме там, де це необхідно, тим самим формуючи об’єм створюваної деталі.

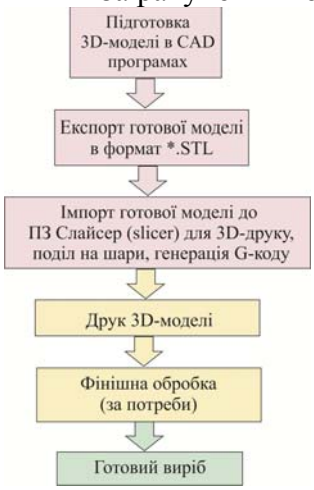


Рисунок 1 – Порядок створення готової деталі
Джерело: розроблено авторами

Найчастіше в якості витратних матеріалів для 3D-друку використовують пластики PLA, ABS, нейлон, полікарбонат PC, ПВС (PVA), полістирол (HIPS), а також новітні CoPET, PET та PETG. Ще одним важливим фактором є те, що в даний час Україна має значну потребу у власному виробництві пластикових деталей для військових та цивільних підприємств. Такі вироби можуть бути швидко запроектовані та виготовлені на 3D-принтерах. Все це дає змогу вважати метод пошарового наплавлення сучасною та прогресивною технологією, яка має великий потенціал до розвитку та вдосконалення.

© П. М. Єрьомін, А. М. Кириченко, А. І. Гречка, В. В. Свяцький, 2026

Однак, існуючий практичний досвід 3D-друку виявив ряд труднощів, які дотепер обмежують промислове використання FDM-технологій. Одним з них є питання забезпечення необхідної точності геометричних розмірів та форми готових виробів із технічних пластиків після завершення 3D-друку. Готову деталь необхідно встановити на призначене їй місце після мінімальної доробки, а краще взагалі без неї. В цьому випадку геометричні розміри та форма деталі повинні мінімально відрізнятись від розмірів 3D моделі або технічних креслень. Також необхідно забезпечити достатню жорсткість, міцність та шорсткість надрукованих деталей. Саме тому задача підвищення точності розмірів деталей з технічних пластиків, виготовлених на 3D-принтерах методом наплавлення є актуальною і потребує всебічного вивчення і подальшого розв'язання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі якості та точності друку деталей, виготовлених за FDM-технологією присвячено досить багато публікацій. Так, наприклад автори статті [1] піднімають питання оптимізації шорсткості поверхні, розмірної точності та часу друку деталей з пластику PETG, виготовлених методом FDM, з використанням статистичних методів та штучної нейронної мережі. У своїх висновках вони зазначають, що товщина наплавленого шару є критичним параметром, який найбільше впливає як на шорсткість поверхні, так і на час друку. Збільшення товщини шару та швидкості друку суттєво скорочує час виробництва, але негативно позначається на якості поверхні. Застосування для аналізу та оптимізації штучних нейронних мереж (ANN) продемонструвало значно вищу точність прогнозування порівняно зі статистичними методами. Розроблені моделі надають виробникам інструмент для інтелектуального налаштування FDM-процесів, дозволяючи отримувати високоякісні деталі з PETG при мінімальних витратах часу в промислових умовах.

В статті [2] проведений огляд сучасних досягнень у забезпеченні розмірної точності 3D-друку методом пошарового наплавлення (FDM). Цей комплексний огляд охоплює дослідження, опубліковані переважно в період з 2021 по 2024 роки та присвячений критично важливому аспекту технології FDM, а саме – розмірній точності виготовлених деталей для медицині, аерокосмічній та автомобільній промисловості. Основна увага в роботі приділена визначенню факторів, що впливають на точність (кут растра, повітряний зазор, ширина растра, орієнтація виробу та адгезія шарів пластику). У роботі зазначені основні причини розмірної похибки. Так, наприклад, основним чинником неточності деталей, виготовлених методом FDM, вказана усадка матеріалу під час його охолодження. Також на точність розмірів суттєво впливають неправильна синхронізація швидкості друку та екструзії. Окрім того, встановлено, що друк при підвищених температурах часто призводить до погіршення якості поверхні та найгірших показників розмірних допусків. В своїх дослідженнях автори наголошують, що деталі з пластику PLA зазвичай мають вищу точність, ніж деталі з ABS. Має значення навіть колір застосовуваного філаменту та умови навколишнього середовища. Наприклад, кондиціонування повітря в приміщенні може мати вплив на кінцеві розміри надрукованих деталей. Як й в публікації [1] рекомендується застосовувати інноваційні методи корекції з використанням ANN та алгоритмами машинного навчання для прогнозування та компенсації розмірних помилок ще на етапі підготовки до друку.

В матеріалах статті [3] досліджується розмірна точність та шорсткість поверхні елементів деталей, виготовлених на двох популярних 3D-принтерах моделі Mendel Max та Kossel Mini з відкритим вихідним кодом. Для перевірки можливостей цих принтерів, що використовують FDM-технологію, авторами було розроблено спеціальну тестову модель (benchmark), що включає критичні геометричні елементи: напівсфери, куб, циліндри та пази. Дослідники варіювали такі параметри, як матеріали PLA та ABS, товщину шару наплавлення в діапазоні від 0,178 до 0,254 мм, а також щільність

заповнення об’єму деталі 20% та 30%. Вимірювання розмірної точності проводилося за допомогою профільного проектора DS600, а шорсткості поверхні – тестером TR200.

Порівняння принтерів продемонструвало менші відхилення розмірів та кращу шорсткість поверхні надрукованих деталей у моделі Mendel Max у порівнянні з принтером Kossel Mini, попри їхню схожу цінову категорію. Також було відмічено, що використання філаменту PLA забезпечує кращу якість поверхні та вищу розмірну точність для обох машин, ніж використання ABS. Автори пояснюють це тим, що пластик ABS більше піддається температурному впливу та схильний до деформації під час друку. Найкращі результати якості та точності для обох пристроїв були зафіксовані при товщині шару 0,178 мм та щільності заповнення 20…30%. Відмічено, що параметри процесу найбільше впливають на точність плоских елементів (пазів) та шорсткість, тоді як для вертикальних елементів (циліндрів та кубів) чіткої закономірності відхилень від параметрів заповнення не виявлено. Дослідження підтверджують, що недорогі 3D-принтери з відкритим кодом здатні створювати складні геометричні елементи, але вимагають ретельного підбору параметрів для досягнення результатів, порівнянних з промисловим обладнанням.

В статті [4] досліджувався вплив орієнтації моделі (build orientation) на якість деталей, виготовлених методом FDM з промислового термопластику-полікарбонату (PC) на принтері FORTUS 360mc. Автори проаналізували п’ять різних варіантів просторового розташування моделей під час друку. Дослідження охоплювало як прості геометричні форми (площини та циліндри), так і складні поверхні довільної форми (free-form surfaces). Оцінка проводилася за двома основними критеріями – точність розмірів та форми. Вимірювання проводилися за допомогою координатно-вимірювальної машини (КВМ) та 3D-сканера. Шорсткість поверхні (Ra, Rz) вимірювалася як контактним так і оптичним методами. Автори зробили висновки щодо критичності орієнтації деталі на робочій платформі, яка має вирішальне значення для кінцевої якості. Навіть при ідентичних параметрах екструзії, зміна кута нахилу моделі суттєво змінює як шорсткість, так і геометричну точність.

Найкраща якість поверхні (тобто її мінімальна шорсткість) досягається на площинах, орієнтованих паралельно або перпендикулярно до напрямку нанесення шарів. Похилі та криволінійні поверхні демонструють вищу шорсткість через прояв ефекту «сходинок» (staircase effect). Для складних поверхонь вільних форм відхилення розмірів були значно більшими, ніж для простих геометричних примітивів. Найменші похибки форми зафіксовані при орієнтаціях, де вектори нормалі до поверхні були близькі до осі Z. Зазначено, що застосування полікарбонату вимагає суворого дотримання температурних режимів. Дослідження підтвердило, що промислове обладнання Fortus 360mc забезпечує високу повторюваність, проте помилка в орієнтації може нівелювати переваги матеріалу. Також автори довели, що для адитивного виробництва комбінація контактних методів вимірювання шорсткості з оптичним 3D-скануванням дає найбільш повну картину якості виробу.

Постановка завдання. На основі аналізу сучасного стану існуючих FDM-технологій друку:

– розробити вдосконалену методику дослідження якості надрукованих деталей, в плані відповідності реально отриманих геометричних розмірів заданим у 3D-моделі;

– встановити залежність лінійної усадки або розбивки у технічних пластиків типу ABS, PET-G, PCTG, та CoPET для прогнозування розмірної точності;

– на основі отриманих залежностей запропонувати заходи по розробці вдосконаленого алгоритму 3D-друку з використанням FDM-технології;

– розробити рекомендації по режимам друку та методам виготовлення деталей із пластика.

Виклад основного матеріалу. Запропонована методика дослідження якості надрукованих деталей в плані відповідності реально отриманих геометричних розмірів заданим у 3D-моделі полягає в наступному:

В якості еталонних зразків для друку та наступного вимірювання геометричних розмірів було обрано дві 3D-моделі (рис. 2 та 3), перша з яких складається із найбільш розповсюджених у машинобудуванні охоплюваних поверхонь (вали квадратного, круглого, шестигранного перерізу, а також прямокутного профілю), а друга – із пластини з отворами (охоплюючи поверхні) ідентичної форми та розмірів. В якості матеріалів для друку еталонних зразків було обрано технічні пластики типу PLA, ABS, PET-G, PCTG, CoPET та нейлон як такі, що мають найбільше розповсюдження.

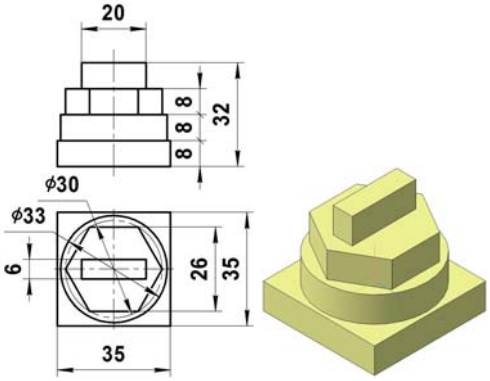


Рисунок 2 – Зразок з охоплюваними валами характерної форми

Джерело: розроблено авторами

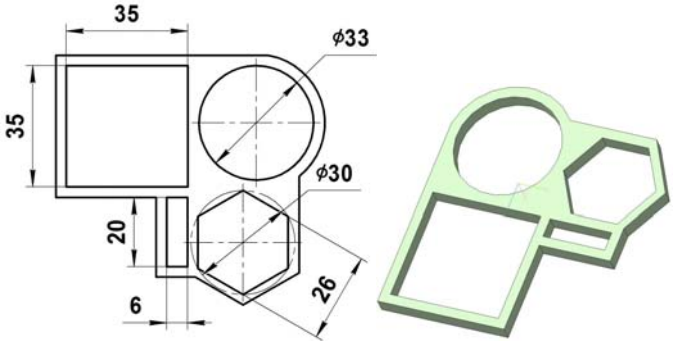


Рисунок 3 – Зразок з охоплюючими отворами характерної форми

Джерело: розроблено авторами

3D-моделі досліджуваних зразків деталі були спроектовані у форматі STL за допомогою програмного комплексу SolidWorks та надруковані у лабораторії 3D-друку кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки ЦНТУ, що обладнана 3D принтером власного виробництва DELTA-FDM (рис. 4). DELTA-FDM – це принтер середнього рівня, виконаний за схемою «дельта-робот» [5]. Він оснащений системою калібрування, відкритим робочим столом з підігрівом та системою охолодження екструдера. DELTA-FDM друкує моделі розмірами до 150 мм у діаметрі та до 125 мм висоти. Мінімальна товщина друкованого шару складає від 0,3 мм. Завдяки системі обдуву моделі під час друку та наявності механізму регулювання підтиску нитки філаменту, принтер може використовувати філамент ABS, PLA, CoPET, Nylon та PETG діаметром 1,75 мм. Друкуюча голівка підвішена на 6-ти діагоналях, шарнірно з'єднаних із трьома каретками, що роблять вертикальні переміщення вздовж напрямних з приводами від крокових двигунів. При цьому друкуюча голівка робить складний плоскопаралельний рух у просторі. Основна перевага цієї схеми полягає в тому, що під час друку модель нерухомо закріплена на столі, і друкуюча голівка піднімається уздовж вертикальної осі моделі, друкуючи пластиком шар за шаром. Також, завдяки зменшеній вазі голівки, швидкість друку вища, ніж у 3D-принтерів, виконаних за іншими схемами.

Далі 3D-моделі були експортовані в формат *.STL та перенесені в слайсер Repetier Host (рис. 5). Враховуючи геометричні особливості розроблених еталонних зразків, з метою забезпечення потрібної якості друку були встановлені такі основні параметри друку моделі в програмі Repetier-Host v.2.1.6: висота наплавленого шару – 0,3 мм; щільність заповнення зразка - 30%; швидкість друку - 50 мм/сек.; температура розігріву використаного філаменту від 210 до 235°С (в залежності від типу застосовуваного матеріалу); температура підігріву стола (за потреби) - 55°С. По закінченню друку зразків (рис. 6), вони ретельно оглядались з усіх боків на предмет наявності зовнішніх дефектів.

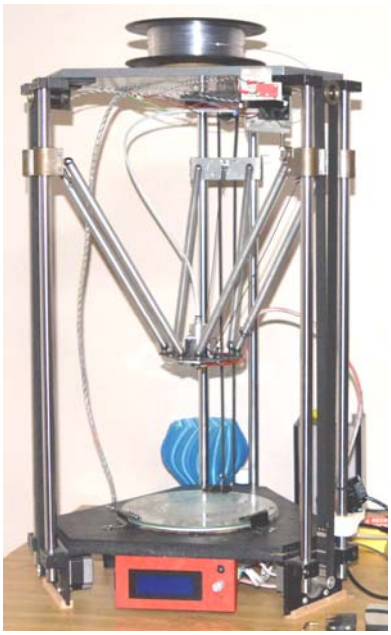


Рисунок 4 – 3D-принтер DELTA-FDM
Джерело: розроблено авторами

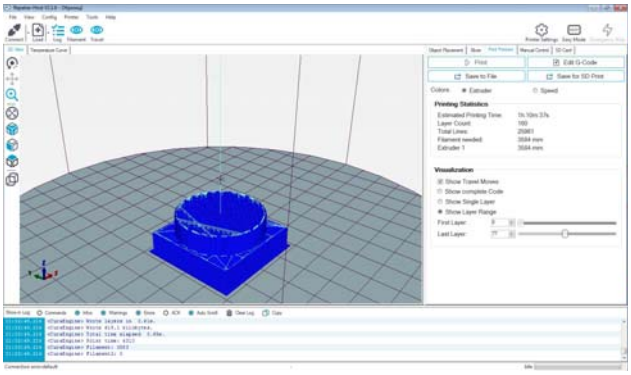


Рисунок 5 – Інтерфейс програмі Repetier-Host v.2.1.6
Джерело: розроблено авторами

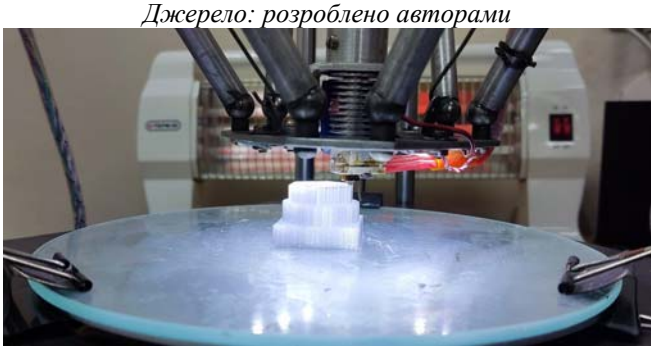


Рисунок 6 – Друк дослідних зразків на 3D-принтері DELTA-FDM
Джерело: розроблено авторами

За необхідності готові зразки (рис. 7) очищувались від пластикового облою та мілких дефектів друку, які можуть впливати на результати вимірювань. Характерні поверхні зразків вимірювались за допомогою повіреного цифрового штангенциркуля з ціною поділки 0,01 мм (рис. 8).

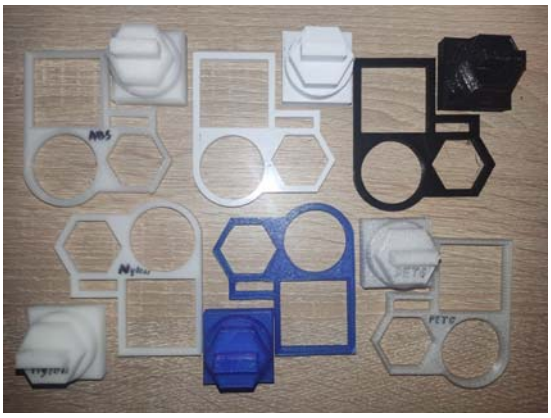


Рисунок 7 – Надруковані дослідні зразки з пластиків PLA, ABS, PET-G, PCTG та CoPET
Джерело: розроблено авторами



Рисунок 8 – Вимірювання розмірів характерних поверхонь дослідних зразків
Джерело: розроблено авторами

Результати вимірювань розмірів на отриманих зразках заносились у порівняльну таблицю, на основі якої були створені графіки у форматі EXCEL (рис. 9).

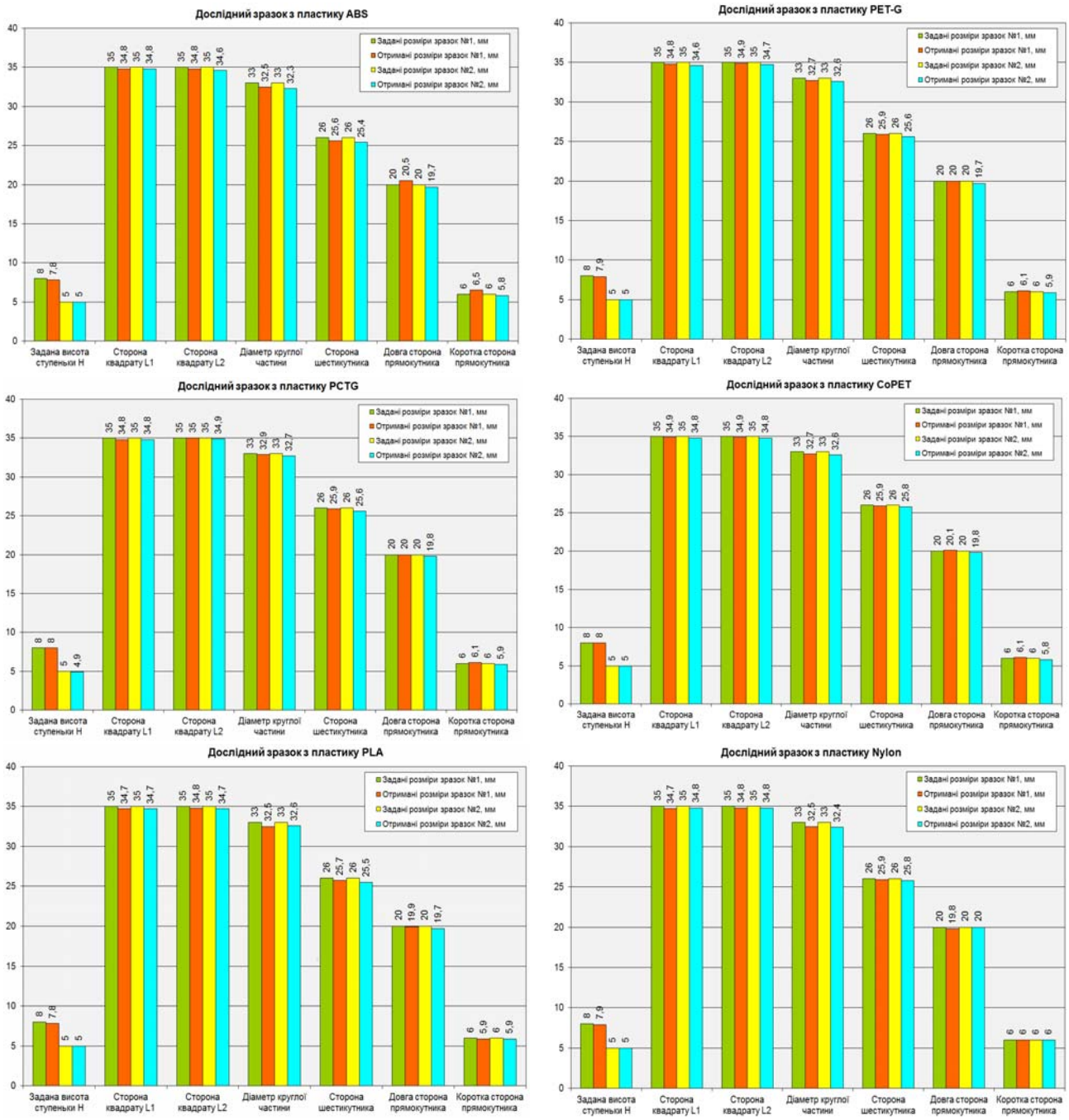


Рисунок 9 – Результати вимірювань дослідних зразків, виготовлених з пластиків ABS, PET-G, PCTG, CoPET, PLA та Nylon [6]

Джерело: розроблено авторами

Результати вимірювань надрукованих зразків з пластику ABS показали, що реальні розміри їх характерних поверхонь менші ніж задані на 1,5…2% (тобто надрукований зразок меншій ніж 3D-модель). Це пояснюється тим, що пластик ABS при охолодженні стискується. В деяких випадках можливе відставання основи моделі від поверхні стола принтера (рис. 10). Це явище може мати місце, якщо під час 3D-друку температура основі із підігрівом буде недостатня, або присутнє погане зчеплення матеріалу основи (нею може бути термоскло або відполірована металева пластина) із розплавленою ниткою першого надрукованого шару ABS. Для уникнення цього негативного явища температуру нагріву основи піднімають до 100…110°C, а її

поверхню покривають тонким шаром матеріалу з високою адгезією.

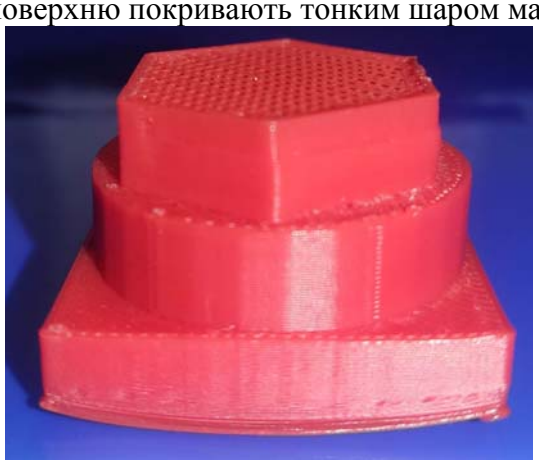


Рисунок 10 – Явище деформації прямокутної основи надрукованого зразка з ABS пластика
Джерело: розроблено авторами

Таким чином можна зробити висновок, що для забезпечення якомога більшого співпадіння розмірів надрукованої деталі з ABS пластику з її 3D-моделлю необхідно вводити поправочний коефіцієнт в сторону збільшення розмірів моделі, який підбирається дослідним шляхом.

У зразків, надрукованих з технічних пластиків марок PETG, PCTG та CoPET розміри характерних поверхонь відрізнялись від 3D-моделі в межах 0,5…1%, що є гарним результатом. Необхідно відмітити, що зовнішні поверхні деталей мають привабливий вигляд та майже не потребують додаткової обробки.

Ці пластики успішно застосовуються для виготовлення деталей де важливо мати гарний зовнішній вигляд одночасно з високою міцністю. При цьому на міцність деталей дуже великий вплив буде мати напрямок прикладення зусиль до деталі, так як під час застосування FDM-технології надруковані шари пластику мають обмежену адгезію поміж собою та можуть розшаруватись між собою під час великих механічних навантажень, прикладених вздовж них або якщо деталь працює на розрив.

Явище усадки надрукованих деталей пов’язане з фізичними-механічними властивостями пластику та швидкістю його застигання. У випадку, коли обдув друкованого зразка з PETG відбувається з двох сторін деталі ззовні, то процес застигання відбувається швидше, а усадка має меншу величину. Внутрішня сторона обдувається повітрям в меншому ступені, тому розпливання пластику буде вищим. Ступінь усадки деталей під час друку пластиком конкретної марки та партії/дати випуску необхідно встановити шляхом друку контрольного зразка та його ретельного вимірювання.

Для зразків 1-го типу усадка фіксується на всієї зовнішній поверхні, тобто реальні розміри на мм менші на величину 0,1…0,3, ніж задані у 3D-моделі. У випадку друку деталей, які будуть працювати з заданими зазорами або натягами не можна нехтувати цією погрішністю та обов’язково враховувати поправочний коефіцієнт при моделюванні деталі. Ще одним фактором, який потребує уваги є те, що шарувата структура деталей (рис. 11), яка утворюється під час друку буде завжди давати певну погрішність як під час вимірювань, так і в процесі приробляння поверхонь деталей одна до одної. Для зразків 2-го типу з отворами різної форми усередині усадка назовні складає до 0,1…0,15 мм, а у середині зразків має величину 0,1…0,2 мм тому її також враховуємо під час корегування розмірів 3D-моделі. В цілому можна зробити висновок, що пластики марок PETG, PCTG та CoPET мають високий показник співпадіння розмірів моделі та надрукованих зразків.

Під час друку зразків з нейлону цей матеріал показав себе таким, що потребує ретельної підготовки та додаткових налаштувань принтера. Схильність нейлону до абсорбування вологи вимагає його зберігання в сухих приміщеннях та застосування закритої камери друку. Робочий стіл принтера необхідно нагрівати до високих температур та уникати протягів у приміщенні. Вироби із нейлону мають підвищену здатність до розшарування надрукованого матеріалу, тому їх ціна буде вищою у порівнянні з іншими видами пластику за рахунок більшої собівартості друку.

Результати вимірювань розмірів характерних поверхонь зразку з пластика PLA показали, що він практично не дає усадки під час друку.

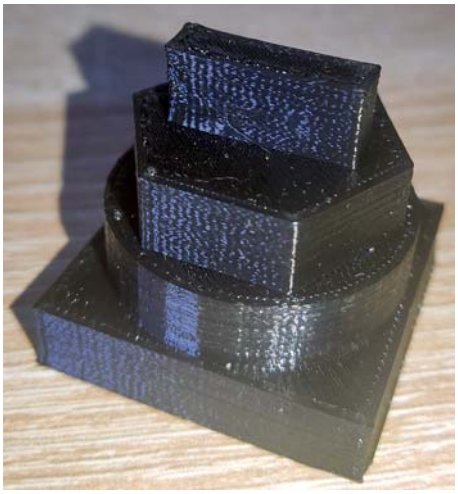


Рисунок 11 – Шарувата структура надрукованого зразка
Джерело: розроблено авторами

Також він не потребує підігріву робочого стола принтера та не боїться протягів під час друку, що значно зменшує вимоги до обладнання. Матеріал PLA менш токсичний, ніж ABS, тому вимоги з техніки безпеки під час друку цім матеріалом не такі суворі. Вироби з PLA мають тверду, міцну та «слизьку» поверхню, що дозволяє виготовляти з нього широку гамму моделей.

Однак, з часом цей біорозкладний матеріал під впливом навколишнього середовища (вітер, опади, ультрафіолетове випромінювання) починає руйнуватись, тому вироби з PLA не можуть застосовуватись там, де будуть великі фізичні навантаження на них або для довгострокового використання поза приміщень без спеціального захисного покриття.

Серед інших недоліків пластику PLA треба також відмітити, що він «пливе» під дією високих температур. Через висока твердість PLA його механічна обробка більш утруднена, тому якщо, наприклад, у надрукованій деталі буде потрібно просвердлити отвори та нарізати у них різьбу то буде кращім обрати інший технічний пластик.

Після аналізу переваги та недоліків пластика PLA, можливо рекомендувати його застосування для друку великогабаритних деталей з точними розмірами, а також фізичних моделей для прототипування, елементів декору та сувенірів, де не потрібен тривалий життєвий цикл виробу.

Через відносно невелику вартість сировини ABS є одним із самих розповсюджених технічних пластиків. Цей матеріал вдало поєднує у собі міцність та пружність, що дозволяє широко застосовувати ABS для виготовлення різноманітних виробів з тривалим строком служби. Успішність застосування цього пластику як на холоді так й в умовах високих температур дозволяє працювати виробам з нього ABS як у побутових, так й промислових пристроях та машинах. Пластик ABS гарно піддається різноманітній механічній обробці, що разом з можливістю хімічного згладжування поверхні надрукованої деталі у парах ацетону дозволяють робити з цього матеріалу як декоративні вироби складної форми так й корпуси, кронштейни та інші деталі з високою якістю поверхні.

Однак, ультрафіолетове випромінювання погано впливає на стійкість ABS (так, під дією сонячних променів пластик жовтіє), що обмежує застосування нефарбованих виробів на вулиці. ABS не любить протягів під час друку, а під час нагріву він виділяє у повітря токсичні речовини. Це значно обмежує застосування цього пластику в дешевих принтерах з відкритим корпусом без організації якісної вентиляції приміщень, де вони встановлені.

Внаслідок відносно високої усадку матеріал ABS схильний до розшарування надрукованого виробу та вимагає наявності робочого стола принтера з підігрівом до температур 100-110°C. Якщо цього не зробити, то у більшості випадків на початку 3D-друку можуть виникнути проблеми із прилипанням до поверхні стола перших шарів розігрітої пластикової нитки, внаслідок чого виріб відривається від стола й все потрібно буде починати заново.

Все вищенаведене обумовлює застосування пластику ABS для друку декоративних виробів із додаткової хімічною обробкою зовнішніх поверхонь, виготовлення деталей типу різноманітних валів, втулок, тяг та кронштейнів з

невеликою кількістю гострих кутів та граней. Пластик ABS дуже гарно показав себе для одиничного або дрібносерійного друку корпусів та інших подібних комплектуючих.

За асортиментом доступних кольорів та по іншим споживчім якостям технічні пластики PETG, PCTG та CoPET практично не поступаються ABS. Також важливо є те, що ці популярні матеріали набагато менш токсичні, ніж ABS, тому безпекові заходи для них менш суворі. Невелика величина усадки дозволяє створювати деталі із високим ступенем точності геометричних розмірів, а збалансовані фізико-механічні характеристики дозволяють друкувати з філаменту PETG, PCTG та CoPET такі відповідальні деталі, як вали та корпуси механічних редукторів, що працюють з невеликими навантаженнями, зубчасті колеса та шестерні, опори, кришки, кронштейни та тяги. Завдяки гарній адгезії між друкованими шарами пластику матеріали PETG, PCTG та CoPET дуже добре піддаються свердлінню, точінню, фрезеруванню, нарізанню різьби та ін. Завдяки гарному ковзанню та високій міцності на удар ці пластики є дуже перспективними матеріалами для виробництва найрізноманітних одиничних та дрібносерійних виробів.

Ще однією важливою перевагою пластиків PETG, PCTG та CoPET є їх висока стійкість до ультрафіолетового випромінювання, тому вироби із них успішно працюють поза приміщеннями без додаткових захисних покрить. Недоліком цих матеріалів є досить висока плинність під час друку. Це вимагає ретельного налаштування 3D-принтера та контролю його параметрів під час друку деталей. Висока температура друку може вивести із ладу плавкі фторопластові вставки в друкуючій голівці, та вимагає застосування спеціальних металевих термічних бар'єрів, із суцільного металу, які коштують доволі коштовні у порівнянні з традиційними друкуючими голівками. Температура розм'якшення і механічна міцність PETG, PCTG та CoPET нижче у порівнянні з ABS.

Враховуючи все вищенаведене, можливо рекомендувати пластики PETG, PCTG та CoPET в якості перспективного матеріалу для створення прототипів перспективних технічних виробів складної форми. Наприклад, з цього філаменту можливо виготовляти прототипи корпусів редукторів електропідсилювачів рульового керування, помірно навантажені кінематичні пари, елементи декору, а також вироби, що експлуатуються поза приміщеннями.

Завдяки високій стійкості нейлону до стирання та високих температур, його міцності, пружності, термостійкості, хімічній стабільності, низькому коефіцієнту ковзання цей матеріал є незамінним для друку різного типу шестерень та навантажених конструкційних деталей. Однак, незважаючи на низку переваг, нейлон має дуже високу усадку, потребує використання закритих камер для друку та складний для створення великих за розмірами виробів. Окрім необхідності застосування принтера, який потребує ретельного налаштування саме для друку нейлоном, потрібно ще дуже правильно зберігати та підготовлювати філамент (нейлонову нитку). Потрібно враховувати високу ступінь усадки нейлону та при створенні віртуальної моделі обов'язково корегувати її розміри з урахуванням коефіцієнту усадки. Найчастіше нейлон використовується для 3D-друку опорних підшипників, вкладишів, втулок ковзання та напрямних елементів деталей, які працюють в умовах високих температур та під впливом агресивних хімічних речовин.

За результатами проведених досліджень точності розмірів деталей, отриманих за допомогою FDM-технології було розроблено вдосконалений алгоритм 3D-друку з використанням технічних пластиків для одиничного та дрібносерійного виробництв, який представлено на рис. 12.

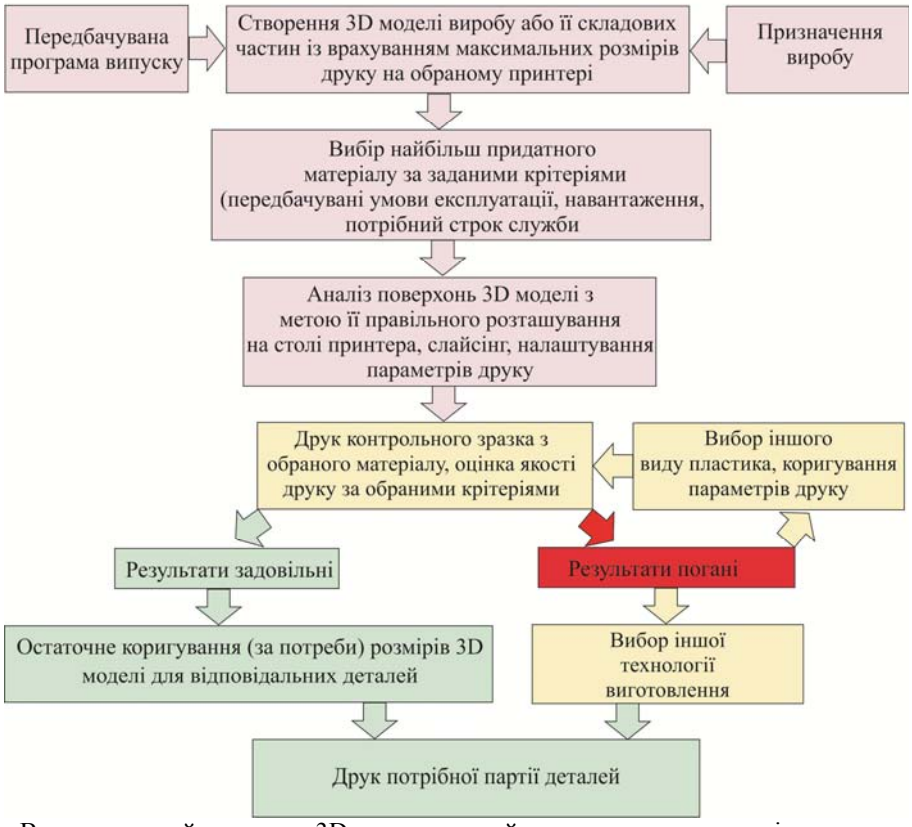


Рисунок 12 – Вдосконалений алгоритм 3D-друку деталей з використанням технічних пластиків
Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. 3D-друк за FDM-технологією є одним із найбільш економічних способів створення унікальних та малосерійних деталей або прототипів із технічних пластиків.

2. Час 3D-друку деталей за цією технологією цілком прийнятний в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, а існуючі технології доступні та відпрацьовані.

3. Наявний широкий асортимент технічних пластиків підходить як для створення фізичних моделей прототипів, так і для комерційного застосування.

4. Особливості 3D-друку за FDM-технологією обумовлюють нижчу розмірну точність та роздільну здатність у порівнянні з іншими технологіями, тому цей спосіб не рекомендується для друку моделей складної форми та з дрібними деталями.

5. Готовий виріб внаслідок особливостей FDM-технології після друку має видимі шарі матеріалу, тому в разі потреби гарного зовнішнього вигляду деталі буде необхідна додаткова обробка.

6. Адгезія надрукованих шарів пластику поміж собою робить деталі, отримані за допомогою FDM-технології анізотропними. Саме тому не бажане використання таких деталей у відповідальних вузлах, які працюють на розтяг.

7. З метою запобігання деформації деталі у вигляді загинання кутів плоскої основи на пластиках типу ABS, що мають значний відсоток усадки, необхідно уникати розташування великих плоских ділянок у горизонтальній площині, а в разі потреби передбачувати підтримки в місцях розташування гострих кутів (>45°) на моделі.

8. Під час друку деталей з отворами, їх розміри завжди будуть дещо меншими. Це пояснюється характером розподілу напружень у деталі, причому характер усадки по осях не лінійний. Так, по осі OZ усадка менша ніж по осях OX и OY. Це пояснюється

тим, що шари пластику по осі OZ накладаються на робочу поверхню стола принтера поза залежністю від усадки. Під час друку технічними пластиками у закритій камері при температурі стола в межах 100…110°C усадка по всіх осях майже не відрізняється. В такому випадку можливо використовувати один коефіцієнт об'ємної усадки для всіх осей.

Реальний досвід 3D-друку показує, що відсоток усадки для одного й того ж виду пластика, але з різних партій може відрізнятись. Саме тому для забезпечення високої точності та якості надрукованих виробів необхідно підбирати цей коефіцієнт шляхом друку контрольних зразків та вимірюванням отриманих моделей. В основному усадка деталей залежить від температури екструзії. Чим вище температура, тим більша буде усадка. В такому випадку необхідно знайти «золоту середину» поміж адгезією накладених шарів пластику та його усадкою. Також на усадку можуть впливати товщина накладеного шару пластика, діаметр використаного сопла, характер та відсоток заповнення об'єму деталі, товщина її стінок, габарити, швидкість друку, напрямок потоку повітря під час обдуву деталі додатковими вентиляторами тощо.

Список літератури

1. A. El Omari, A. Ouballouch, M. Nassraoui. Optimising surface roughness, dimensional accuracy and printing time of FDM PETG parts using statistical methods and artificial neural network, Archives of Materials Science and Engineering. 133/1. (2025). 5-17. DOI: https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2924
2. Azhar Equbal1, Ramesh Murmu, Veenit Kumar, Md. Asif Equbal. A recent review on advancements in dimensional accuracy in fused deposition modeling (FDM) 3D printing. AIMS Materials Science, 11(5): 950–990. Published: 17 October 2024. DOI: 10.3934/matersci.2024046
3. F. R. Ramli, M. S. M. Faudzie, M. A. Nazan1, M. R. Alkahari, M. N. Sudin, S. Mat and S. N. Khalil. DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE ROUGHNESS OF PART FEATURES MANUFACTURED BY OPEN SOURCE 3D PRINTER. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. VOL. 13, NO. 3, FEBRUARY 2018
4. Turek, P.; Bazan, A.; Bulicz, M. Effect of 3D Printing Orientation on the Accuracy and Surface Roughness of Polycarbonate Samples. *Machines 2025*, 13, 9. https://doi.org/10.3390/machines13010009
5. Кириченко А.М. Досвід створення та експлуатації технологічного обладнання паралельної структури, "Сучасні технології промислового комплексу", ХНТУ, Херсон, Україна, 2016. С. 54-55
6. Саят Мкртчян, Павло Єрьомін «Підвищення точності розмірів пластикових деталей, виготовлених методом 3D друку». Збірник тез LVIII науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти, присвяченої до дня науки-2024. С. 133-135.

References

1. El Omari, A., Ouballouch, A., & Nassraoui, M. (2025). Optimising surface roughness, dimensional accuracy and printing time of FDM PETG parts using statistical methods and artificial neural network, Archives of Materials Science and Engineering, 133/15-17. DOI: https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2924
2. Azhar, Equbal1, Ramesh, Murmu, Veenit, Kumar, & Md. Asif, Equbal. (2024). A recent review on advancements in dimensional accuracy in fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *AIMS Materials Science*, 11(5): 950–990. Published: 17 October 2024. DOI: https://doi.org/10.3934/matersci.2024046
3. Ramli, F. R., Faudzie, M. S. M., Nazan1, M. A., Alkahari, M. R., Sudin, M. N., Mat, S. & Khalil, S. N. (2018). DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE ROUGHNESS OF PART FEATURES MANUFACTURED BY OPEN SOURCE 3D PRINTER. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. VOL. 13, NO. 3, FEBRUARY 2018.
4. Turek, P., Bazan, A., & Bulicz, M. (2025). Effect of 3D Printing Orientation on the Accuracy and Surface Roughness of Polycarbonate Samples. *Machines 2025*, 13, 9. https://doi.org/10.3390/machines13010009
5. Kyrychenko, A. M. (2016). Experience in the Design and Operation of Parallel Structure Process Equipment. *Modern Technologies of the Industrial Complex* (pp. 54-55). Kherson National Technical University (KNTU), Kherson, Ukraine. [in Ukrainian].
6. Mkrtchian, S., & Yeromin, P. (2024). Improving the Dimensional Accuracy of Plastic Parts Manufactured by 3D Printing. Collection of Abstracts of the LVIII Scientific and Technical Conference of Higher Education Students Dedicated to Science Day 2024 (pp. 133-135). [in Ukrainian].

Pavlo Yeromin, PhD tech. sci**, Andrii Kyrychenko,** Prof., DSc., **Andrii Hrechka,** PhD tech. sci, Associate Professor, **Sviatskyi Volodymyr,** PhD tech. sci, Associate Professor**.**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Dimensional Accuracy of Engineering Plastic Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing

The current state of the use of additive FDM 3D printing technologies in the manufacturing of mating (interfacing) components made of engineering plastics has been investigated. The possibility of improving the geometric accuracy of plastic parts through the application of an enhanced 3D printing process has been substantiated. An improved methodology for evaluating the quality of manufactured parts is proposed, in particular with regard to the compliance of their actual geometric parameters with those specified in a specially developed 3D model. Additionally, recommendations have been developed for the selection of 3D printing parameters and for the adaptation of technological approaches to the fabrication of components from various grades of engineering plastics.

FDM technology, dimensional accuracy, engineering plastics, 3D printing

Одержано (Received) 01.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 01.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 09.04.2026

УДК 656.338.12 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).52-65

А. М. Красота, І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, **М. В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Р. А. Осін,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: krasotamv@ukr.net

Визначення оптимальних параметрів ФАБО кулачків розподільних валів

У статті представлені результати дослідження, спрямованого на покращення якості отримання антифрикційних покриттів під час використання фінішної антифрикційної безабразивної обробки кулачків розподільних валів автомобільних та тракторних двигунів. За критерії оптимізації було обрано умови якості антифрикційного покриття (суцільність, відносна шорсткість поверхні) та експлуатаційний показник – інтенсивність зношування зразка. Функціями відгуку були обрані режими ФАБО за визначеною схемою нанесення антифрикційних покриттів на робочу поверхню кулачків розподільних валів. Після проведення багатофакторного експерименту, на основі результатів, було отримано серію математичних моделей у вигляді рівнянь регресії. Аналіз математичних моделей дозволив визначити оптимальні змінні значення режимних параметрів ФАБО.

Результати наданого дослідження дозволили визначити оптимальні режими ФАБО, а саме: тиск інструменту, швидкість ковзання інструменту та подача інструменту.

При заданих оптимальних параметрах було отримано прогнозовані значення вихідних змінних: суцільності покриттів, інтенсивності зношування та відносної шорсткості.

Встановлено, що зі збільшенням тиску до 60 МПа спостерігається зменшення інтенсивності зношування, проте подальше збільшення тиску має тенденцію до її зростання. При заданих швидкостях приблизно 2,0 м/с спостерігається збільшення суцільності покриття до досягнення максимальних значень, подальше збільшення швидкості ковзання негативно впливає на суцільність покриття через недостатнє заповнення мікрорельєфу та погане формування антифрикційного покриття. Збільшення подачі у всьому діапазоні негативно впливає на відносну шорсткість, тому під час обробки слід підтримувати мінімальні значення подачі.

антифрикційне покриття, розподільний вал, довговічність, багатокритеріальна оптимізація, технологічний параметр, зносостійкість

© А. М. Красота, І. В. Шепеленко, М. В. Красота, Р. А. Осін, 2026

Постановка проблеми. Підвищення надійності та довговічності машин є однією з основних проблем сучасного машинобудування. Аналіз літературних джерел [1 - 4] показує, що головною причиною виходу з ладу машин є зношування деталей рухомих з'єднань під впливом сил тертя. Зважаючи на це, важливого значення отримує підвищення зносостійкості деталей технологічними методами, що визначають характеристики робочих поверхонь.

Розподільний вал автомобільного двигуна є однією з складних та дорогих деталей, що працює в умовах підвищених навантажень, а його робочі поверхні, такі як кулачки – працюють в умовах граничного мащення, отже піддаються інтенсивному зношуванню.

Серед технологічних методів підвищення зносостійкості поверхонь досить широко застосовується метод фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО). За даною технологією сталеві деталі для запобігання схоплюванню, покращення припрацювання та підвищення протизадирних властивостей покривають тонким шаром міді або її сплаву [5,6].

Моделювання умов роботи кулачків розподільних валів при наявності на їх робочих поверхнях антифрикційного покриття [7] дозволило стверджувати про ефективність такої технології.

Обґрунтування нової схеми ФАБО кулачків розподільних валів дало змогу запропонувати конструкцію пристрою для її здійснення [8].

При нанесенні захисних покриттів, в тому числі антифрикційних, обов'язково виникає необхідність у пошуку оптимальних технологічних параметрів процесу. При цьому як об'єкт оптимізації можуть прийматися компонування зносостійких шарів, їх максимальна товщина, технологічні параметри нанесення покриттів, їх властивості та ін. [9].

Якість антифрикційних покриттів, що отримуються в результаті ФАБО, значною мірою зумовлена режимами обробки, які визначають умови взаємодії інструмента з деталлю. У роботах [5, 6, 9, 10] досліджено вплив режимів ФАБО на суцільність та мікротведість покриттів; зносостійкість, шорсткість та геометрію поверхні. Однак отримані результати мають відношення тільки до конкретної схеми нанесення антифрикційних покриттів, і кожна нова технологія ФАБО вимагає проведення окремих досліджень щодо обрання режимів обробки.

Отже, встановлення оптимальних параметрів процесу ФАБО з урахуванням особливостей обраної схеми нанесення антифрикційних покриттів є актуальним та важливим завданням, що потребує проведення спеціальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомості щодо досліджень впливу технологічних параметрів ФАБО на якість отримуваних покриттів відображені у роботах [9-12 та ін.].

У наведених публікаціях під якістю антифрикційних покриттів розуміють їх рівномірність, маслоємність, шорсткість, товщину та зносостійкість поверхні [8].

Автори робіт [13-15] вважають шорсткість поверхні як головний критерій оцінювання якості антифрикційного покриття.

В роботах [16, 17] якість зносостійких покриттів, отриманих в результаті ФАБО, визначали їх товщиною. Однак, слід відзначити, що має місце суперечлива інформація щодо значень цього показника. Визначено значення початкової шорсткості та рельєфу поверхні, що забезпечує необхідні умови для процесів мікрорізання латунного інструменту мікровиступами профілю вихідної поверхні деталі, що обробляється, та підвищення інтенсифікації процесу нанесення покриття фрикційно-механічним методом.

Проте, в деяких випадках, наприклад, при обробці поверхонь нової деталі немає сенсу наносити покриття значної товщини, достатньо заповнити впадини мікрорельєфу та знизити таким чином коефіцієнт тертя поверхні та підвищити реальну площу контакту.

Також, в деяких роботах [11-16] немає однозначних рекомендацій щодо тиску інструменту на поверхню деталі, зустрічаються суттєві розбіжності від 0,1 МПа до 80 МПа. Такі значні відмінності у значеннях величини тиску, безумовно, потребують подальших уточнень, адже цей режимний параметр є одним з визначальних.

Лише в деяких роботах [6, 17] розглядаються такі параметри ФАБО як поздовжня подача інструменту та швидкість ковзання інструменту по поверхні. Однак ці параметри, на нашу думку, хоч і не є вирішальними, проте також суттєво впливають на якість антифрикційних покриттів. Зокрема, при обробці повинно забезпечуватися якісне заповнення западин мікрорельєфу антифрикційним матеріалом, а також часткове зминання виступів мікронерівностей. Також, в роботі [18] зазначено, що для протікання певних хімічних процесів у поверхнево-активному середовищі необхідно мати температуру близько 180-200 ºС, яку можна досягти при певних швидкостях ковзання інструменту.

Огляд літературних джерел засвідчив, що автори розглянутих робіт досягли необхідних характеристик покриттів використанням різних технологічних прийомів та поверхнево-активних середовищ. Тому, отримати оптимальні режими, які б задовольняли різноманітним технологіям та схемам ФАБО, є неможливим.

Постановка завдання. Метою даної роботи є аналіз впливу технологічних параметрів процесу ФАБО кулачків розподільних валів на якість антифрикційних покриттів та отримання їх раціональних значень.

Викладення основного матеріалу. Для визначення впливу основних факторів на зношування розподільних валів, виготовлених із сталі 18ХГТ, кулачки яких оброблялися фрикційно-механічним методом, було поставлено та проведено активний експеримент з використанням методів математичного планування [19].

Для попередніх досліджень використовували зразки, виготовлені із сталі 18ХГТ, що відповідає матеріалу деталі.

В якості вхідних параметрів розглянуто режими ФАБО при обраній схемі обробки кулачків [8]: тиск P, МПа, з яким інструмент діє на поверхню деталі; швидкість ковзання інструменту по поверхні, $V_к$, м/с; величина поздовжньої подачі інструменту s, мм/об. Розроблений склад технологічного середовища та параметр шорсткості підтримували постійним.

Вибір основного рівня та інтервалів варіювання проводився на основі попередніх експериментів. Рівні варіювання параметрів ФАБО наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання параметрів ФАБО

Параметр експерименту	Фактори		
	P, МПа	*Vк,* м/с	*s,* мм/об
Основний рівень	40,0	1,6	0,2
Інтервал варіювання	30,0	1,4	0,1
Верхній рівень (+1)	70,0	3,0	0,3
Нижній рівень (-1)	10,0	0,2	0,1

Джерело: розроблено авторами

При дослідженні розроблено та реалізовано повнофакторний експеримент типу 2^3. Систематичні помилки виключали, виконуючи досліди у випадковій послідовності відповідно до рандомізованої матриці експерименту [20-22].

Для виявлення впливу вказаних факторів на значення показників, що характеризують якість антифрикційного покриття, також його трибологічні характеристики реалізовували матрицю центрального композиційного плану 2^3+зіркові точки. При цьому, функціями відклику обрано:

1) суцільність покриття, яка оцінювалася співвідношенням S_n/S;

де S_n – площа поверхні антифрикційного покриття, мм^2;

S – площа поверхні, що піддається обробці, мм^2;

2) інтенсивність зношування пари тертя I, 10^{-4} г/м;

3) відносна шорсткість поверхні $R_a/R_{a\ вих.}$;

де R_a – величина шорсткості поверхні, що отримується після ФАБО;

$R_{a\ вих.}$ – величина шорсткості поверхні до здійснення обробки.

Значення, що були отримані при реалізації матриці планування експерименту показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту 2^3+зіркові точки

№ досліду	P, МПа	$Vк$, м/с	s, мм/об	S_n/S	I, 10^{-4} г/м	$R_a/R_{a\ вих}$
	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	10,00	0,20	0,10	0,32	4,60	0,90
2	10,00	0,20	0,30	0,28	5,00	1,03
3	10,00	3,00	0,10	0,47	4,20	0,75
4	10,00	3,00	0,30	0,43	4,60	0,88
5	70,00	0,20	0,10	0,82	2,10	0,42
6	70,00	0,20	0,30	0,78	2,50	0,55
7	70,00	3,00	0,10	0,97	1,70	0,27
8	70,00	3,00	0,30	0,93	2,10	0,40
9	40,00	1,60	0,20	0,97	0,70	0,50
10	9,00	1,60	0,20	0,49	3,30	0,94
11	100,00	1,60	0,20	0,97	2,90	0,40
12	40,00	0,35	0,20	0,79	1,48	0,60
13	40,00	4,20	0,20	0,73	1,90	0,49
14	40,00	1,60	0,18	0,95	0,68	0,49
15	40,00	1,60	0,42	0,72	2,60	0,53
16	40,00	1,60	0,20	0,97	0,70	0,50

Джерело: розроблено авторами

Для виконання аналізу експериментальних даних використовували програму STATISTICA версії 12.0 [21], що дало можливість отримати статистичні математичні моделі для суцільності покриття покриття S_n/S (Y_1), інтенсивності зношування I (Y_2) та відносної шорсткості поверхні $R_a/R_{a\ вих}$ (Y_3) при натуральних значеннях факторів.

$$Y_1(\mathrm{Sn/S}) = -0{,}07733 + 0{,}02124 \cdot \mathrm{x}_1 - 0{,}00015 \cdot \mathrm{x}_1^{\,2} + 0{,}25384 \cdot \mathrm{x}_2 - 0{,}6086 \cdot \mathrm{x}_2^{\,2} + \\ + 1{,}82244 \cdot \mathrm{x}_3 - 4{,}836 \cdot \mathrm{x}_3^{\,2}; \quad (1)$$

$$Y_2(I) = 7{,}4751 - 0{,}1589 \cdot x_1 + 0{,}0014 \cdot x_2^{\,2} - 1{,}2698 \cdot x_2 + 0{,}3276 \cdot x_2^{\,2} - \\ - 15{,}4557 \cdot x_3 + +41{,}09 \cdot x_3^{\,2}; \quad (2)$$

$$Y_3(R_a/\mathrm{R}_{\text{а вих}}) = 0{,}98425 - 0{,}01802 \cdot x_1 + 0{,}00012 \cdot x_1^{\,2} - 0{,}12256 \cdot x_2 + 0{,}02088 \cdot x_2^{\,2} + \\ + 1{,}38698 \cdot x_3 - 1{,}95982 \cdot x_3^{\,3}. \quad (3)$$

Адекватність отриманих моделей перевірялася системою STATISTICA в автоматичному режимі за критеріями Фішера, для перевірки однорідностей дисперсій використовується коефіцієнт Кохрена.

Значимість коефіцієнтів квадратного рівняння регресії перевіряли з використання розподіленням Парето.

Результати виконання факторного експерименту для оптимізації суцільності покриття (S_n/S) представлені на рис. 1.

Effect Estimates; Var.:S_n/S; R-sqr=,98511; Adj:,96279 (Spreadsheet150126)
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0023
DV: S_n/S

Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,938251	0,024698	37,98964	0,000000	0,877818	0,998683	0,938251	0,024698	0,877818	0,998683
(1)P, МПа(L)	0,532388	0,032743	16,25960	0,000003	0,452269	0,612507	0,266194	0,016371	0,226134	0,306253
P, МПа(Q)	-0,278318	0,028922	-9,62296	0,000072	-0,349088	-0,207548	-0,139159	0,014461	-0,174544	-0,103774
(2)Vк, м/с(L)	0,132375	0,030398	4,35472	0,004798	0,057993	0,206756	0,066187	0,015199	0,028997	0,103378
Vк, м/с(Q)	-0,213705	0,029143	-7,33285	0,000329	-0,285016	-0,142393	-0,106852	0,014572	-0,142508	-0,071197
(3)s, мм/об(L)	-0,059861	0,016663	-3,59244	0,011470	-0,100634	-0,019088	-0,029930	0,008332	-0,050317	-0,009544
s, мм/об(Q)	-0,034819	0,009108	-3,82312	0,008729	-0,057105	-0,012534	-0,017410	0,004554	-0,028552	-0,006267
1L by 2L	-0,000000	0,032095	-0,00000	1,000000	-0,078533	0,078533	-0,000000	0,016047	-0,039266	0,039266
1L by 3L	0,000000	0,020347	0,00000	1,000000	-0,049787	0,049787	0,000000	0,010173	-0,024893	0,024893
2L by 3L	-0,000000	0,019257	-0,00000	1,000000	-0,047120	0,047120	-0,000000	0,009628	-0,023560	0,023560

Рисунок 1 – Дані, отримані в ході реалізації центрального композиційного плану, що дозволили визначити вплив факторів на суцільність покриття S_n/S

Джерело: розроблено авторами

ANOVA; Var.:S_n/S; R-sqr=,98511; Adj:,96279 (Spreadsheet150126)
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0023
DV: S_n/S

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)P, МПа(L)	0,608049	1	0,608049	264,3747	0,000003
P, МПа(Q)	0,212979	1	0,212979	92,6013	0,000072
(2)Vк, м/с(L)	0,043615	1	0,043615	18,9636	0,004798
Vк, м/с(Q)	0,123670	1	0,123670	53,7707	0,000329
(3)s, мм/об(L)	0,029682	1	0,029682	12,9056	0,011470
s, мм/об(Q)	0,033617	1	0,033617	14,6163	0,008729
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
1L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
2L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Error	0,013800	6	0,002300		
Total SS	0,927076	15			

Рисунок 2 – Данні, отримані при визначенні статистичних показників в програмі STATISTICA 12 для аналізу впливу технологічних факторів на значення суцільності покриття S_n/S

Джерело: розроблено авторами

Виконавши дослідження Парето-карти та результатів, представлених на рис. 1 - 3 експерименту для суцільності покриття, можна дійти висновку, що максимальний вплив на суцільність покриття здійснюють тиск, швидкість та подача інструменту, а також їх квадратичні величини. Решта параметрів (добуток факторів) є незначимими.

Побудовані в результаті розрахунку поверхні відгуку та графічне зображення ліній рівного виходу, отримані для суцільності покриття представлені на рис. 4, а їх аналіз дає можливість зазначити, що максимальна суцільність забезпечується при наступних значеннях факторів: P= 40…80 МПа; $V_к$ =1,5…2,5 м/с; s=0,15…0,25 мм/об.

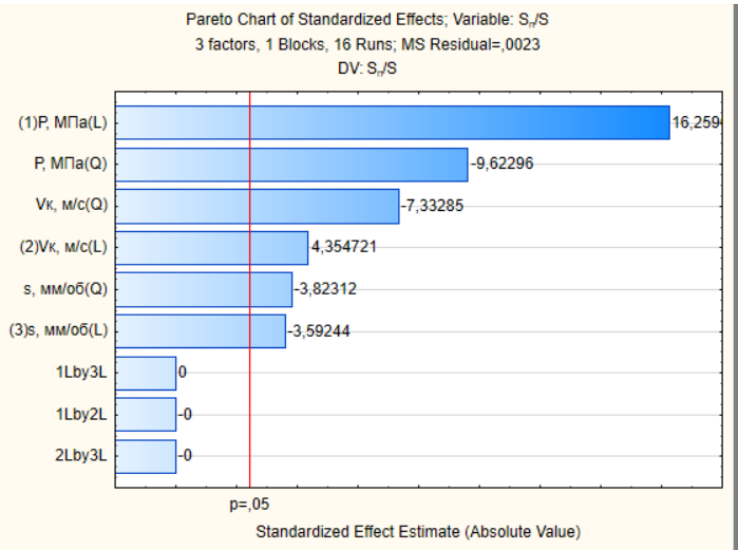
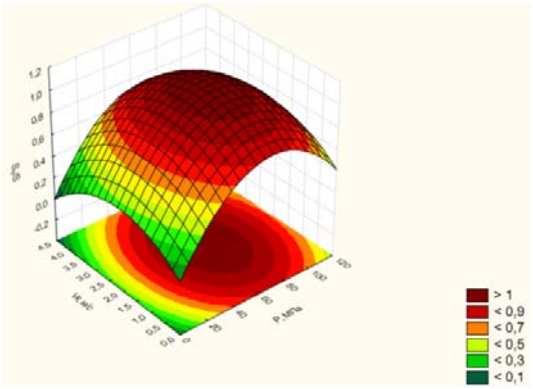
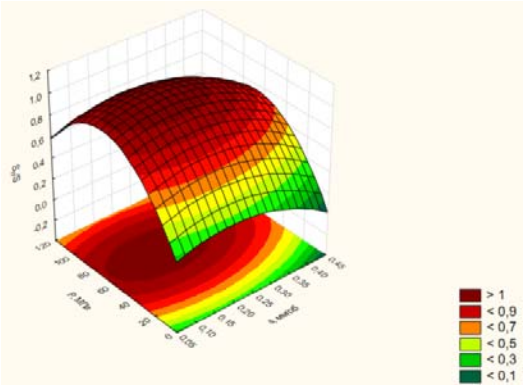


Рисунок 3 – Стандартизована Парето-карта для суцільності покриття $Y_1(S_n/S)$.

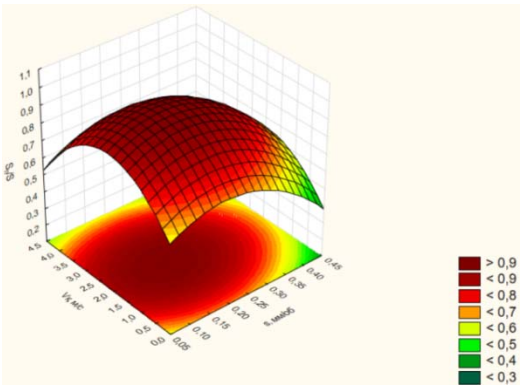
Джерело: розроблено авторами



а)



б)



в)

Рисунок 4 - Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_1(S_n/S)$:

а) $Y_1 = f(x_1x_2)$; б) $Y_1 = f(x_1x_3)$; в) $Y_1 = f(x_2x_3)$.

Джерело: розроблено авторами

Результати виконання факторного експерименту для оптимізації інтенсивності зношування ($Y_2(I)$) представлені на рис. 5.

Effect Estimates; Var.:I, x10^{-4} г/м; R-sqr=,95828; Adj:,89569 (Spreadsheet150126)
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,2145405
DV: I, x10^{-4} г/м

Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,86492	0,238533	3,62598	0,011018	0,28125	1,44859	0,86492	0,238533	0,28125	1,448588
(1)P, МПа(L)	-2,64345	0,316237	-8,35906	0,000159	-3,41725	-1,86964	-1,32172	0,158119	-1,70863	-0,934822
P, МПа(Q)	2,58477	0,279337	9,25324	0,000090	1,90126	3,26828	1,29238	0,139668	0,95063	1,634140
(2)Vк, м/с(L)	-0,45650	0,293589	-1,55491	0,170966	-1,17489	0,26188	-0,22825	0,146794	-0,58744	0,130941
Vк, м/с(Q)	1,15039	0,281473	4,08703	0,006451	0,46165	1,83913	0,57519	0,140736	0,23082	0,919563
(3)s, мм/об(L)	0,51209	0,160934	3,18201	0,019027	0,11830	0,90589	0,25605	0,080467	0,05915	0,452944
s, мм/об(Q)	0,29585	0,087962	3,36335	0,015167	0,08061	0,51108	0,14792	0,043981	0,04031	0,255542
1L by 2L	-0,00000	0,309976	-0,00000	1,000000	-0,75848	0,75848	-0,00000	0,154988	-0,37924	0,379241
1L by 3L	-0,00000	0,196513	-0,00000	1,000000	-0,48085	0,48085	-0,00000	0,098256	-0,24042	0,240425
2L by 3L	0,00000	0,185985	0,00000	1,000000	-0,45509	0,45509	0,00000	0,092993	-0,22754	0,227545

Рисунок 5 – Дані, отримані в ході реалізації центрального композиційного плану, що дозволили визначити вплив факторів на інтенсивність зношування *I*

Джерело: розроблено авторами

ANOVA; Var.:S_n/S; R-sqr=,98511; Adj:,96279 (Spreadsh
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0023
DV: S_n/S

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)P, МПа(L)	0,608049	1	0,608049	264,3747	0,000003
P, МПа(Q)	0,212979	1	0,212979	92,6013	0,000072
(2)Vк, м/с(L)	0,043615	1	0,043615	18,9636	0,004798
Vк, м/с(Q)	0,123670	1	0,123670	53,7707	0,000329
(3)s, мм/об(L)	0,029682	1	0,029682	12,9056	0,011470
s, мм/об(Q)	0,033617	1	0,033617	14,6163	0,008729
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
1L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
2L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Error	0,013800	6	0,002300		
Total SS	0,927076	15			

Рисунок 6 – Данні, отримані при визначенні статистичних показників в програмі STATISTICA 12 для аналізу впливу технологічних факторів на інтенсивність зношування покриття *I*

Джерело: розроблено авторами

Виконавши дослідження Парето-карти та результатів, представлених на рис. 5 - 7 експерименту для інтенсивності зношування покриття, можна дійти висновку, що максимальний вплив на інтенсивність зношування мають тиск, швидкість та подача інструменту, а також їх квадратичні величини. Решта параметрів (добуток факторів) є незначимими.

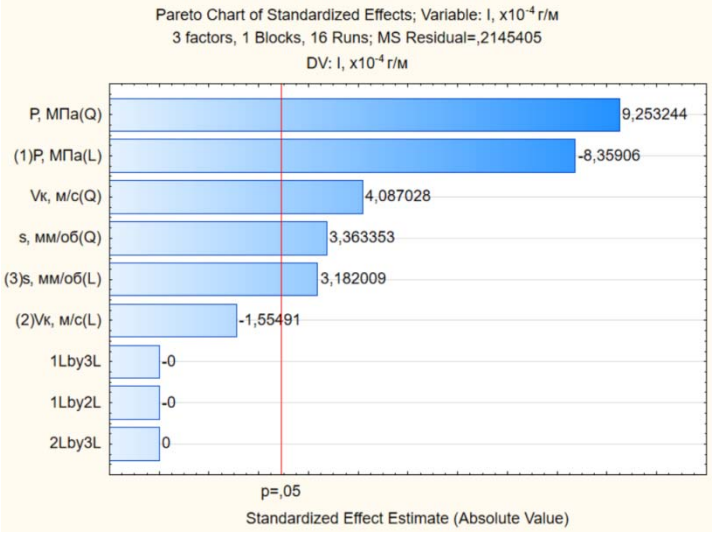
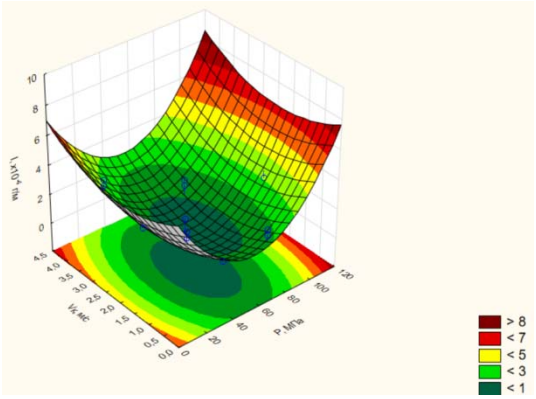


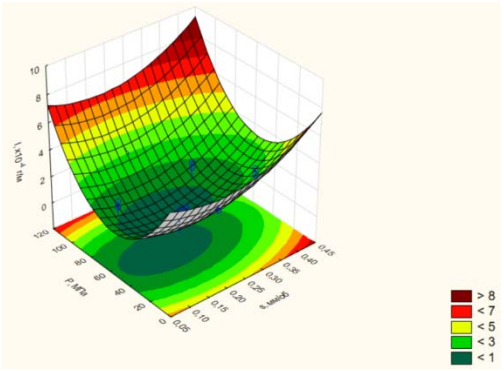
Рисунок 7 – Стандартизована Парето-карта для інтенсивності зношування покриття $Y_2(I)$.

Джерело: розроблено авторами

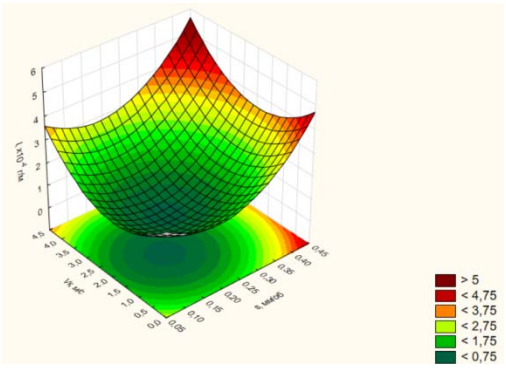
Побудовані в результаті розрахунку поверхні відгуку та графічне зображення ліній рівного виходу, отримані для інтенсивності зношування покриття представлені на рис. 8, а їх аналіз дає можливість встановити, що найменша інтенсивність зношування отримується при наступних значеннях факторів: P=40…60 МПа; $V_к$ =0,5…3,0 м/с; s=0,1…0,3 мм/об.



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_2(I)$:

а) $Y_2 = f(x_1x_2)$; б) $Y_2 = f(x_1x_3)$; в) $Y_2 = f(x_2x_3)$.

Джерело: розроблено авторами

Результати виконання факторного експерименту для оптимізації відносної шорсткості Y_3 ($R_a/R_{a\ вих}$) представлені на рис. 9.

Effect Estimates; Var.:$R_a/R_{a\ вих}$; R-sqr=,98942; Adj:,97354 (Spreadsheet150126)
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0013532
DV: $R_a/R_{a\ вих}$

Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,527324	0,018944	27,8356	0,000000	0,480969	0,573678	0,527324	0,018944	0,480969	0,573678
(1)P, МПа(L)	-0,509467	0,025115	-20,2850	0,000001	-0,570922	-0,448012	-0,254733	0,012558	-0,285461	-0,224006
P, МПа(Q)	0,214379	0,022185	9,6633	0,000070	0,160095	0,268663	0,107189	0,011092	0,080047	0,134331
(2)Vк, м/с(L)	-0,139422	0,023317	-5,9795	0,000982	-0,196476	-0,082368	-0,069711	0,011658	-0,098238	-0,041184
Vк, м/с(Q)	0,073315	0,022354	3,2797	0,016830	0,018616	0,128014	0,036658	0,011177	0,009308	0,064007
(3)s, мм/об(L)	0,053551	0,012781	4,1898	0,005751	0,022276	0,084826	0,026776	0,006391	0,011138	0,042413
s, мм/об(Q)	-0,014111	0,006986	-2,0199	0,089915	-0,031205	0,002983	-0,007055	0,003493	-0,015602	0,001492
1L by 2L	0,000000	0,024618	0,0000	1,000000	-0,060238	0,060238	0,000000	0,012309	-0,030119	0,030119
1L by 3L	0,000000	0,015607	0,0000	1,000000	-0,038189	0,038189	0,000000	0,007803	-0,019094	0,019094
2L by 3L	-0,000000	0,014771	-0,0000	1,000000	-0,036143	0,036143	-0,000000	0,007385	-0,018071	0,018071

Рисунок 9 – Дані, отримані в ході реалізації центрального композиційного плану, що дозволили визначити вплив факторів на відносну шорсткість $R_a/R_{a\ вих}$.

Джерело: розроблено авторами

ANOVA; Var.:$R_a/R_{a\ вих}$; R-sqr=,98942; Adj:,97354 (Spreа
3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=,0013532
DV: $R_a/R_{a\ вих}$

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)P, МПа(L)	0,556819	1	0,556819	411,4822	0,000001
P, МПа(Q)	0,126362	1	0,126362	93,3800	0,000070
(2)Vк, м/с(L)	0,048383	1	0,048383	35,7544	0,000982
Vк, м/с(Q)	0,014555	1	0,014555	10,7562	0,016830
(3)s, мм/об(L)	0,023755	1	0,023755	17,5544	0,005751
s, мм/об(Q)	0,005521	1	0,005521	4,0799	0,089915
1L by 2L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
1L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
2L by 3L	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Error	0,008119	6	0,001353		
Total SS	0,767261	15			

Рисунок 10 – Данні, отримані при визначенні статистичних показників в програмі STATISTICA 12 для аналізу впливу технологічних факторів на відносну шорсткість $R_a/R_{a\ вих}$.
Джерело: розроблено авторами

Виконавши дослідження Парето-карти та результатів, представлених на рис. 9 – 11, для інтенсивності зношування (рис. 9 – 11) можна дійти висновку, що максимальний вплив на відносну шорсткість здійснюють тиск, швидкість та подача інструменту, а також квадрати тиску та швидкості ковзання. Решта параметрів – квадрат подачі, а також добуток факторів є незначимими.

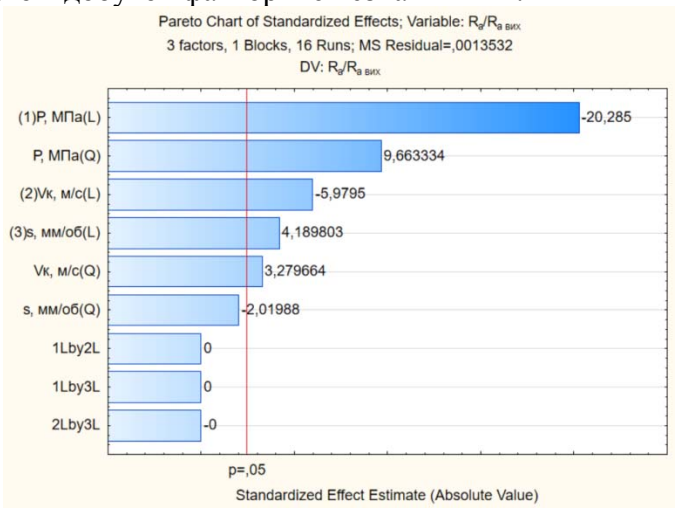
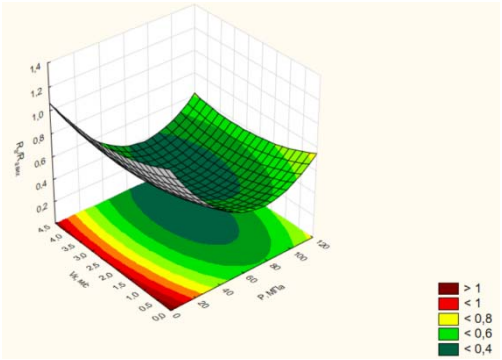
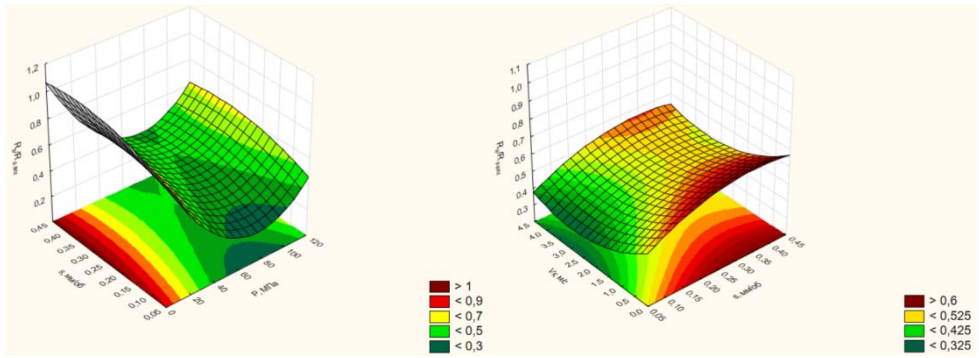


Рисунок 11 - Стандартизована Парето-карта для відносної шорсткості поверхні $Y_3(R_a/R_{a\ вих})$.
Джерело: розроблено авторами

Побудовані в результаті розрахунку поверхні відгуку та графічне зображення ліній рівного виходу, отримані для відносної шорсткості покриття наведені на рис. 12, а їх аналіз дає можливість стверджувати, що мінімальна відносна шорсткість забезпечується при наступних значеннях факторів: P=60…100 МПа; $V_к$ =1,5…4,0 м/с; s=0,05…0,1 мм/об.



а)



б)

в)

Рисунок 12 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_3(R_a/R_{a\ вих})$:

а) $Y_3 = f(x_1x_2)$; б) $Y_3 = f(x_1x_3)$; в) $Y_3 = f(x_2x_3)$

Джерело: розроблено авторами

Графічне представлення результатів за допомогою діаграм розсіювання у поєднанні з гістограмами (рис. 13), які були встановлені з використанням програми STATISTICA 12.0 дозволяють отримати графічну інтерпретацію раціональних значень кожного фактора, з визначенням реальних значень суцільності покриття, інтенсивності зношування, відносної шорсткості поверхні [19].

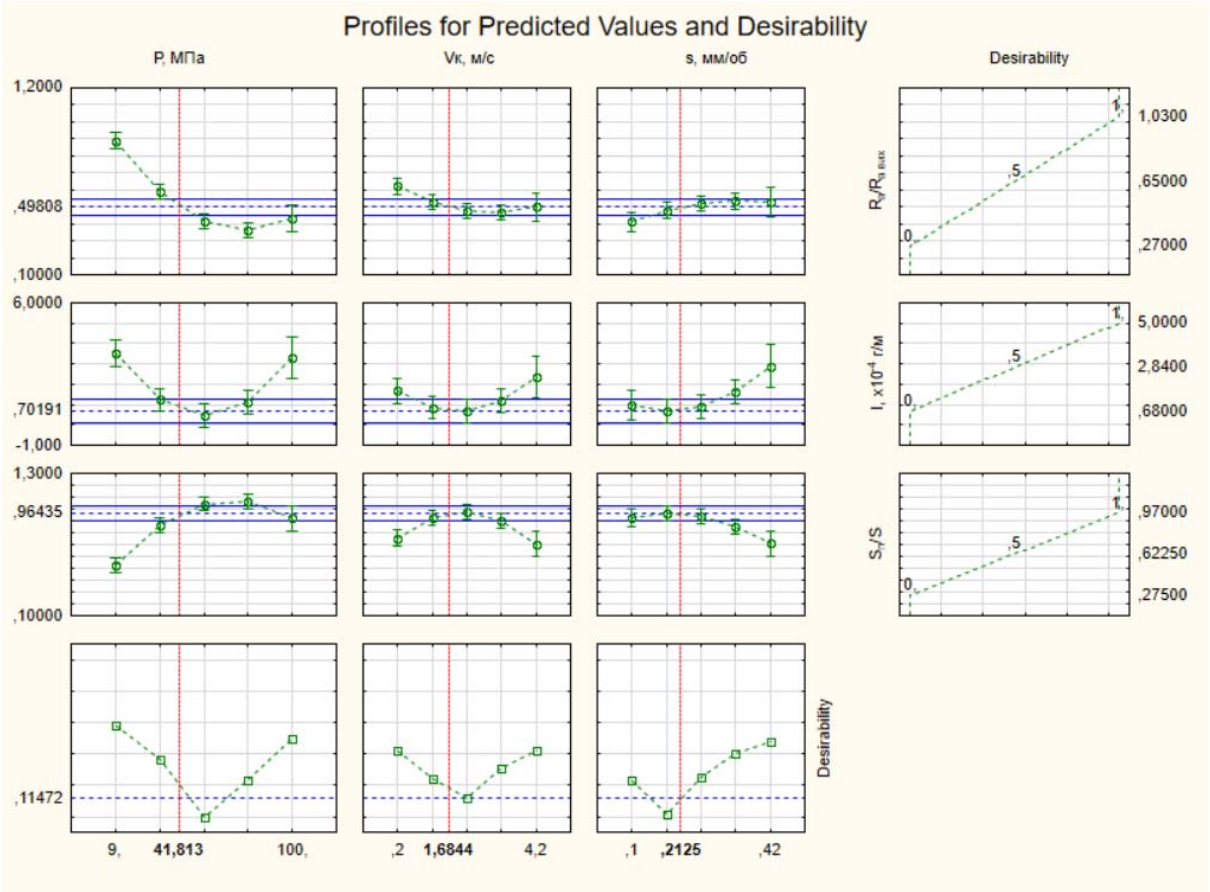


Рисунок 13 – Профілі для прогнозованих значень та бажаності критеріїв оптимізації, що характеризують вплив досліджуваних факторів на параметри покриттів, нанесених ФАБО

Джерело: розроблено авторами

Попередній аналіз отриманих результатів дає можливість визначити оптимальні режими, при яких інтенсивність зношування буде мінімальною: тиск інструмента – P=41,8 МПа; швидкість ковзання інструмента – $V_к$=1,68 м/с; подача інструмента – s=0,21 мм/об.

При вказаних оптимальних параметрах прогнозовані значення вихідних змінних складуть відповідно:

- суцільність покриття $S_n/S=0,92…0,96…1,0;$
- інтенсивність зношування I=0,67·10^{-4}…0,7·10^{-4}…0,73·10^{-4} г/м;
- відносна шорсткість $R_a/R_{a\ вих}=0,45…0,49…0,53.$

При вивченні експериментальних графіків розсіювання (рис. 13) отримуємо можливість з'ясувати характер зміни факторів та встановити їх взаємний вплив на три критерії оптимізації.

Так, при підвищенні тиску до 70 МПа досягається максимальне значення суцільності покриття та мінімальна відносна шорсткість. Подальше збільшення тиску майже не приводить до покращення вказаних параметрів. При підвищенні тиску до 60 МПа відбувається зниження інтенсивності зношування, однак при подальшому збільшенні тиску інтенсивність зношування має тенденцію до збільшення. Цей факт може бути пояснений роззміцненням (перенаклепу) поверхневих шарів та вириванням часток покриття внаслідок високої силової дії інструменту.

При значеннях швидкості ковзання близько 2,0 м/с відбувається збільшення суцільності покриття до максимальних значень, подальше збільшення швидкості ковзання негативно впливає на суцільність поверхні через недостатнє заповнення западин мікрорельєфу та неякісного утворення антифрикційного покриття.

При збільшенні швидкості ковзання інструменту до значень 2,0 м/с спостерігається зниження величини відносної шорсткості обробленої поверхні, що вказує на якісне заповнення западин антифрикційним матеріалом, а також зминання верхівок нерівностей поверхневого шару, при подальшому збільшенні швидкості значення відносної шорсткості майже не змінюються.

Також, при швидкостях до 2,0 м/с інтенсивність зношування поверхні спадає, при більших значеннях спостерігається її підвищення. Цей факт можливо пояснити гіршим формоутворенням покриття на високих швидкостях.

При величині подачі до значень 0,2 мм/об суцільність поверхні майже не змінюється, однак при більших значеннях спостерігається її зниження, що пояснюється недостатнім заповненням антифрикційним матеріалом западин нерівностей поверхні.

Також, при значеннях подачі до 0,2 мм/об інтенсивність зношування дещо знижується. Подальше збільшення величини подачі негативно впливає на інтенсивність зношування зразка через значне зниження якості покриття. Слід відмітити, що підвищення подачі у всьому діапазоні негативно позначається на відносній шорсткості, отже при обробці слід дотримуватися її мінімальних значень.

Висновки.

1. З метою отримання якісних покриттів, що формуються в результаті ФАБО, в роботі визначено критерії оптимізації, якими обрано показники, що характеризують якість нанесених антифрикційних покриттів, зокрема суцільність та відносну шорсткість поверхні, а також експлуатаційний показник – інтенсивність зношування поверхні. За параметри оптимізації прийнято основні режими ФАБО: тиск, швидкість ковзання та поздовжня подача інструменту. Експериментально визначено вплив технологічних параметрів процесу нанесення антифрикційних покриттів на їх якість.

2. Отримані математичні моделі, які встановлюють залежність параметрів якості антифрикційного покриття (суцільність, відносна шорсткість) та експлуатаційного показника покриття (інтенсивність зношування) від технологічних параметрів процесу

ФАБО, що дає можливість встановити вплив кожного з факторів на критерії, що підлягали оптимізації.

3. Встановлено оптимальні варіанти значень технологічних факторів, при яких отримуються якісні та експлуатаційні характеристики антифрикційних покриттів. Визначені раціональні значення режиму нанесення покриттів та геометричних параметрів вихідної поверхні.

Список літератури

1. Паніна В. В., Дашивець Г. І. Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигунів. *Праці ТДАТУ*. 2014. Т.1, № 4. С. 115-119.
2. Середа Б. П., Калініна Н. Є., Кругляк І. В. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія, Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2004. 230 с.
3. Савуляк В. І., Савуляк В. В.Зносостійкі покриття з градієнтними властивостями. *Вісник машинобудування і транспорту*. 2016. №1. С. 82 -88.
4. Косарчук В. В., Кульбовський І. І., Агарков О. В. Сучасні методи зміцнення і підвищення зносостійкості пар тертя. *Вісник Національного транспортного університету.* 2014. Вип. 31. С. 263-268.
5. Шепеленко І. В., Черкун В. В. Підвищення ефективності обробки цапф шестерень гідронасосів. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу 2021» (07 – 10 вересня 2021 р.),* Вип. 7. Херсон: ХНТУ, 2021. С.109–112.
6. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом. *Вісник Хмельницького національного університету.* 2018. №4. С. 39 – 43.
7. Шепеленко І. В., Красота А. М., Красота М. В. Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. І, С. 179-189. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189
8. Шепеленко І.В., Красота А.М., Гуцул В.І., Красота М.В. Обґрунтування конструкції пристрою для обробки кулачків розподільних валів фрикційно-механічним методом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. Вип. 11 (42), ч.ІІ. С.169–176. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.169-176
9. Пошук оптимальних параметрів фінішної антифрикційної безабразивної обробки гільз циліндрів автотракторних двигунів. / Шепеленко І.В., Черновол М.І., Лещенко С.М., Красота М.В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч. ІІ. С. 11–23. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.11-23.
10. Mykhailo Chernovol, Shepelenko Igor, Budar Mohamed R.F. Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2015. Вип. 45(1). С. 10–13. https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/212810.
11. Кубич В. І., Юдиценко О. В., Блощинська Н. В. Феноменологічний підхід до оцінки трибологічного стану з'єднань ЦПГ ДВЗ. *Двигуни внутрішнього згоряння.* 2016. № 2. С. 44–50. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.2.08
12. Shepelenko I. Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology.* 2021. 26(2/100). P. 50–57. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57
13. Shepelenko I. The study of surface roughness in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Problems of Tribology*. 2020. 25(1/95), 34–40. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40
14. Shepelenko I., Nemyrovskyi Y., Stepchyn Y., Mahopets S., Melnyk O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19.
15. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К. Підвищення якості антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022. Т. 6, № 1. С.24–30. https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655.
16. Shepelenko I., Cherkun V., Warouma A. Improvement of finishing antifriction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries. *Int J Agric Res Innov Technol*. 2014. № 4(1). P. 98–101. https://ageconsearch.umn.edu/record/305359/
17. Nemyrovskyi Y., Shepelenko I., Posviatenko E., Chernovol M., Zlatopolskiy F. Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and

finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*. 2022. №27(1/103). P. 14–25. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25
18. Krasota, A., Shepelenko, I., Krasota, M. (2025). Physical and chemical processes in the application of antifriction coatings by the friction-mechanical method. *Problems of Tribology*. 30(1/115), Pp. 66–73.
19. Статистичні методи обробки та аналізу експериментальних даних / Ю. В. Кулєшков та ін. ; ред. Ю. В. Кулєшков ; Кіровоградський держ. технічний ун-т. - Кіровоград : КДТУ, 2002. 133 с.
20. Черкун В.В. Оптимізація режимів ФАБВО . *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2006. Вип. 5, т.1. С. 184 - 186.
21. Фетісов В. С. Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA . Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. 114 с.
22. Маханець Л.Л., Вінничук О.Ю., Григорків М.В. Статистика. Чернівці : Чернівец. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2023. 161 с.

References

1. Panina, V.V., & Dashyvets, H.I. (2014). Increasing the wear resistance of engine cylinder liners. *Proceedings of the TSATU*, 1, 4, 115-119 [in Ukrainian].
2. Sereda, B.P., Kalinina, N.Ye., & Kruhliak, I.V. (2014). Surface hardening of materials . Zaporizhzhia: RVV ZDIA [in Ukrainian].
3. Savuliak, V.I. & Savuliak, V.V. (2016). Znosostiiki pokryttia z hradiientnymy vlastyvostiamy. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 1, 82 -88 [in Ukrainian].
4. Kosarchuk, V.V. Kulbovskyi, I.I., & Aharkov, O.V. (2014). Suchasni metody zmitsnennia i pidvyshchennia znosostiikosti par tertia. *Bulletin of the National Transport University*. 31, 263-268 [in Ukrainian].
5. Shepelenko, I.V., & Cherkun, V.V. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti obrobky tsapf shesteren hidronasosiv/ I.V. Shepelenko, *Materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tekhnolohii promyslovoho kompleksu - 2021»* (07 – 10 veresnia 2021 r.), Vol. 7. Kherson: KhNTU,. P.109–112 [in Ukrainian].
6. Kosiiuk, M.M., Kostiuk, S.A., & Kostiuk, M.A. (2018). Technological support for applying antifriction coating on incomplete spherical surfaces by friction-mechanical method. *Bulletin of Khmelnytsky National University,* 4, 39 – 43 [in Ukrainian].
7. Shepelenko I. V., Krasota A. M., & Krasota M. V. (2025). Zmina napruzheno-deformovanoho stanu robochoi poverkhni detali z antyfryktsiinym pokryttiam. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*: *Collection of Scientific Papers*. Vyp. 11(42), ch. I. P. 179-189. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189 [in Ukrainian].
8. Shepelenko I.V., Krasota A.M., Hutsul V.I., & Krasota M.V. (2025). Substantiation of the Design of a Device for Machining Camshaft Cams by the Friction-Mechanical Method. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*: *Collection of Scientific Papers,* №11 (42)_II, 169–176. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.169-176. [in Ukrainian].
9. Shepelenko, I. V., Chernovol, M. I., Leshchenko, S. M., Krasota, M. V., Nemyrovskyi, Ya. B., Shumliakivskyi, V. P. (2023). Search for optimal parameters for finishing antifriction non-abrasive treatment of cylinder liners of autotractor engines. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*: *Collection of Scientific Papers*, 8(39), II, 11–23 [in Ukrainian].
10. Mykhailo Chernovol, Shepelenko Igor, & Budar Mohamed R.F. (2015). Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *esign, Production and Exploitation of Agricultural Machines: National Interd. Sci.&Tech.l Coll.,* 45(1), 10–13. https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/212810. [in Ukrainian].
11. Kubych, V. I., Yudytsenko, O. V., & Bloshchynska, N. V. (2016). Phenomenological approach to assessing the tribological condition of CPG joints of internal combustion engines. *Internal combustion engines*, 2, 44–50. DOI: 10.20998/0419-8719.2016.2.08 [in Ukrainian].
12. Shepelenko, I. (2021). Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*, 26(2/100), 50–57. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57.
13. Shepelenko, I. (2020). The study of surface roughness in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Problems of Tribology*, 25(1/95), 34–40. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40.
14. Shepelenko, I., Nemyrovskyi, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., & Melnyk, O. (2024). *Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching.* In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19 . [in Switzerland]
15. Shepelenko, I.V., Nemyrovskyi, Ya.B., & Posviatenko, E.K. (2022). Improving the quality of antifriction coatings using plastic deformation. *Mechanics and Advanced Technologies*. T. 6, № 1. P.24–30.

https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655 [in Ukrainian].
16. Shepelenko, I., Cherkun, V., & Warouma, A. (2014). Improvement of finishing antifriction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries. *Int J Agric Res Innov Technol*. № 4(1). P. 98–101. https://ageconsearch.umn.edu/record/305359 [in Bangladesh].
17. Nemyrovskyi, Y., Shepelenko, I., Posviatenko, E., Chernovo,l M., & Zlatopolskiy, F. (2022). Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*, 27(1/103), P. 14–25. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25
18. Krasota, A., Shepelenko, I., & Krasota, M. (2025). Physical and chemical processes in the application of antifriction coatings by the friction-mechanical method. *Problems of Tribology,* 30(1/115), 66–73. [in Ukrainian].
19. Kulieshkov, Yu. V. et al. (2002). *Statystychni metody obrobky ta analizu eksperymentalnykh danykh*; Yu. V. Kulieshkov (Ed.); Kirovohradskyi derzh. tekhnichnyi un-t. Kirovohrad : KDTU [in Ukrainian].
20. Cherkun, V.V. (2006). Optymizatsiia rezhymiv FABVO/V.V. Cherkun . *Proceedings of the TSATU*, 5, 1, 184 – 186. [in Ukrainian].
21. Fetisov, V. S. (2018). Paket statystychnoho analizu danykh . Nizhyn : NDU im. M. Hoholia [in Ukrainian].
22. Makhanets, L.L., Vinnychuk, O.Yu., & Hryhorkiv, M.V.(2023). Statystyka. Chernivtsi : *Chernivets. nats. un-t im. Yu. Fedkovycha* [in Ukrainian].

Artem Krasota, **Ihor Shepelenko,** Prof., DSc., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., Phd tech. sci.**, Ruslan Osin**, Assoc. Prof., Phd tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determining the Optimal Parameters of Camshaft Cams FANT

The purpose of this work is to analyze the influence of technological process parameters of camshaft cams finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) on the quality of antifriction coating and to obtain their rational values.

The paper presents the research results, aimed at improving the quality of obtaining antifriction coatings during the utilization of finishing antifriction non-abrasive treatment of camshaft cams in automotive and tractor engines. For the criteria of optimization, the conditions of antifriction coating quality (continuity, relative surface roughness) and operational indicator – wear intensity of the sample were chosen. Response functions were the regimes of FANT under a defined scheme of applying the antifriction coatings to the working surface of the camshaft cams. After performing a multifactor experiment, based on the results, a series of mathematical models in the form of regression equations were obtained. The analysis of mathematical models allowed optimal variable values of regime parameters of FANT to be determined.

The results of the provided research yielded optimal regimes of FANT, namely the tool pressure, tool sliding velocity, and tool feed.

At the specified optimal parameters, predicted values of output variables: coatings continuity, wear intensity, and relative roughness were obtained.

Established that as the pressure increases to 60 MPa, there is a decreasing of wear intensity, however further pressure increasing has a tendency to wear intensity increasing. With specified velocities of approximately of 2,0 m/s, there is an increasing in coating continuity until it reaches maximum values, further increase of sliding velocity has a negative impact on the coating continuity due to insufficient filling of microrelief and poor formation of antifriction coating. Increasing the feed in the entire range has a negative impact on the relative roughness, therefore minimum feed values should be maintained during the treatment.

antifriction coating. camshaft, durability, multicriteria optimization, technological parameter, wear resistance

Одержано (Received) 26.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 004.9:621.3.08:629.3 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).66-76

О. В. Щербак, доц., канд. техн. наук, **І. Г. Кириченко**, проф., д-р техн. наук
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
e-mail: olegcherbak@gmail.com, e-mail: kyrig@ukr.net
С. Л. Хачатурян, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна e-mail: serg130354@gmail.com

Розробка макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи на основі mems-imu модулів для експериментальних досліджень шарнірно-з’єднаних машин

Стаття присвячена актуальній проблемі розробки спеціалізованих засобів вимірювання динамічних характеристик шарнірно-з’єднаних машин (ШЗМ). Особливістю таких машин є наявність декількох модулів, взаємне кутове переміщення яких критично впливає на стійкість, керованість та навантаженість конструкції. Автор обґрунтовує доцільність переходу від дорогих комерційних систем із закритою архітектурою до відкритих апаратно-програмних рішень, що дозволяють гнучко адаптувати систему під специфічні потреби наукового експерименту.

У роботі представлено етап створення макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), побудованого на базі мікроконтролера ATmega328 (платформа Arduino UNO V3) та двох інерціальних MEMS-модулів MPU-6500. Вибір компонентів обумовлений їх доступністю, можливістю просторового рознесення датчиків на різні напіврами машини та здатністю реєструвати лінійні прискорення й кутові швидкості за трьома осями одночасно.

Програмна частина комплексу реалізована за допомогою середовища Arduino IDE для збору даних у реальному часі та мови програмування Python для їх подальшої аналітичної обробки. Розроблений графічний інтерфейс користувача (GUI) підтримує два основні режими: реєстрацію даних у реальному часі та режим аналізу («Analysis»). В останньому реалізовано методи часової та частотної обробки сигналів, включаючи швидке перетворення Фур’є (FFT) для спектрального аналізу, статистичну обробку та оцінку дрейфу сенсорів.

Особливу увагу приділено визначенню відносного кута між модулями ($\Delta\theta$), який є ключовим параметром при дослідженні кінематики ШЗМ. Експериментальна апробація макета підтвердила його здатність фіксувати незначні механічні впливи та коректність роботи алгоритмів. Результати дослідження формують технічну базу для подальшого створення повнофункціонального вимірювального комплексу для модульних дорожньо-будівельних машин.

інформаційно-вимірювальний комплекс, графічний інтерфейс, ARDUINO IDE, PYTHON, MEMS-IMU, акселерометр, гіроскоп, обробка сигналів, Fast Fourier Transform (FFT) (швидке перетворення Фур’є), дрейф

Постановка проблеми. Сучасні шарнірно-з’єднані машини характеризуються наявністю декількох модулів (напіврам), з’єднаних між собою шарнірним вузлом. У типовій конструкції передбачено вертикальний шарнір, який забезпечує поворот напіврам відносно горизонтальної площини, а в окремих моделях також застосовується горизонтальний шарнір, що допускає взаємний кутовий поворот рам у вертикальній площині.

© О. В. Щербак, І. Г. Кириченко, С. Л. Хачатурян, 2026

Така конструктивна схема суттєво ускладнює динамічну поведінку машини, оскільки взаємні кутові переміщення напіврам безпосередньо впливають на керованість, стійкість, навантаженість елементів конструкції та характер взаємодії з опорною поверхнею. У зв'язку з цим під час дослідження динаміки шарнірно-зчленованих машин принципово важливим є визначення просторового положення напіврам в процесі виконання робочих операцій.

На відміну від класичних машин, для яких достатньо аналізу абсолютних параметрів руху, у шарнірно-з'єднаних системах ключовим параметром є саме відносний кутовий стан між модулями. Його експериментальне визначення потребує застосування вимірювальних систем, здатних реєструвати кутові переміщення в реальному часі без жорсткого механічного зв'язку між вимірювальними точками.

У цьому контексті перспективним є використання інерціальних вимірювальних засобів на основі MEMS-технологій, які дозволяють формувати вимірювальні системи з просторово рознесеними датчиками. Розміщення інерціальних модулів безпосередньо на окремих напіврамах дає можливість визначати їх взаємне кутове положення та аналізувати динаміку шарнірних з'єднань без суттєвого втручання в конструкцію машини.

З огляду на це, актуальним є створення макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи на основі MEMS-інерціальних датчиків, призначеного для відпрацювання програмного забезпечення, алгоритмів обробки даних і методів визначення динамічних характеристик та відносних кутових переміщень між модулями шарнірно-зчленованих механічних систем.

У сучасних інженерних дослідженнях технічних систем важливу роль відіграють експериментальні вимірювання кутових переміщень, прискорень і вібраційних параметрів. Для розв'язання таких задач широко застосовуються готові промислові вимірювальні комплекси, що забезпечують високу точність і стабільність результатів. Разом з тим використання комерційних систем збору даних супроводжується рядом обмежень, серед яких висока вартість, закрита чи частково закрита архітектура програмного забезпечення, а також обмежені можливості адаптації до специфічних умов експерименту.

У багатьох випадках дослідник змушений підлаштовувати методику експерименту під наявні можливості програмного забезпечення комерційного комплексу, що знижує гнучкість досліджень. Крім того, універсальність таких систем часто призводить до надлишкової функціональності, котра не використовується при проведенні наукових досліджень, але ускладнює налаштування та експлуатацію.

Альтернативним підходом є створення інформаційно-вимірювальних комплексів на основі відкритих апаратно-програмних платформ, зокрема мікроконтролерних систем родини Arduino та подібних платформ у поєднанні з зовнішніми інерціальними датчиками. Такий підхід забезпечує повний контроль над архітектурою комплексу, можливість реалізації власних алгоритмів обробки сигналів і поетапного розвитку системи відповідно до задач дослідження.

Аналіз основних досліджень і публікацій. У наукових публікаціях значну увагу приділено застосуванню комерційних систем збору даних для вимірювання динамічних характеристик механічних об'єктів. Такі системи демонструють високу точність, проте їх закрита архітектура обмежує можливість модифікації алгоритмів обробки сигналів і інтеграції з нестандартними експериментальними завданнями.

У низці робіт показано, що за умови правильної організації збору даних і застосування статистичних методів обробки MEMS-акселерометри та гіроскопи можуть забезпечувати достатню інформативність для аналізу вібраційних процесів і

кутових переміщень. Разом з тим підкреслюється необхідність врахування шумів та дрейфу, характерних для датчиків цього класу.

Методи частотного аналізу, зокрема швидке перетворення Фур'є, широко використовуються для ідентифікації домінуючих частот коливань і виявлення резонансних явищ у конструкціях. У поєднанні з часовим аналізом такі методи дозволяють отримати комплексне уявлення про динамічний стан об'єкта. Разом з тим у багатьох роботах частотний аналіз реалізується як окремий інструмент без інтеграції в єдину вимірювальну систему.

Наразі в багатьох наукових роботах стали використовуватися MEMS-акселерометри. Галузь їх використання досить широка – це і медицина [10], машинобудування [5-9], сучасні літальні апарати [11], вони найшли широке використання практично в усіх галузях.

У роботі [1] запропоновано метод обробки даних MEMS-акселерометрів і гіроскопів для оцінювання кутів розгойдування вантажу мостового крана. Основна увага приділена алгоритмам фільтрації та експериментальній перевірці на лабораторному стенді. Робота [2] розглядає практичні аспекти вимірювання кутів у шарнірних з'єднаннях за допомогою IMU, зокрема калібрування та усунення дрейфу. Запропоновані підходи є базовими для побудови систем вимірювання відносних кутів. Стаття [3] присвячена проблемі узгодження систем координат IMU при вимірюванні кутів шарнірів. Запропоновано формалізовану процедуру уніфікації опорних систем відліку для підвищення точності вимірювань.

У дослідженні [4] наведено сучасний огляд технологій масивів MEMS-IMU, методів їх калібрування та поєднання даних. Робота демонструє потенціал підвищення точності вимірювань шляхом використання кількох інерціальних сенсорів.

На відміну від наукових праць, які є у відкритому доступі, в даному дослідженні розроблюється макетний апаратно-програмний зразок, основним призначенням якого є відпрацювання архітектури системи, програмного забезпечення та методів обробки інерціальних сигналів для подальшого використання в дослідженнях шарнірно-з'єднаних машин. На цьому етапі застосовується аналіз raw data (сирі вимірювальні дані) та відносних вимірювальних даних, що дозволяє оцінити вплив шумів, дрейфу та динамічних складових без попередньої компенсації.

Остаточне калібрування інерціальних датчиків з використанням спеціалізованих калібрувальних пристроїв планується на наступному етапі досліджень після завершення формування повнофункціонального інформаційно-вимірювального комплексу та його механічної інтеграції з об'єктом експерименту.

Аналіз літературних джерел свідчить, що актуальною є задача створення відкритого інформаційно-вимірювального комплексу, котрий поєднує апаратну частину на базі MEMS-IMU та програмні засоби збору, візуалізації й аналізу експериментальних даних.

Постановка завдання. Метою роботи є створення макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи для налагодження програмного забезпечення та апробації методів обробки інерціальних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

– проаналізувати можливості існуючих вимірювальних систем і обґрунтувати доцільність використання відкритої архітектури;

– обрати тип інерціальних MEMS-IMU датчиків для вимірювання кутових переміщень;

– розробити апаратно-програмну структуру комплексу;

– реалізувати методи обробки даних;

– створити графічний інтерфейс – програмне забезпечення для реєстрації та обробки експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу. При розробці макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи особливу увагу було приділено вибору програмного забезпечення з урахуванням вимог до ліцензування, доступності та можливості вільного використання у межах науково-дослідної роботи. У процесі аналізу розглядалися як безкоштовні, так і комерційні середовища розробки та пакети обробки даних, зокрема Visual Studio у поєднанні з мовою програмування C#, а також спеціалізовані інженерні програмні продукти для збору та аналізу експериментальної інформації.

З огляду на обмежені фінансові можливості закладу вищої освіти, у якому виконується дослідження, а також на вимоги до використання виключно ліцензійного чи вільно розповсюджуваного програмного забезпечення при підготовці науково-дослідної роботи, було обрано середовище Arduino IDE та мову програмування Python. Обидва програмні інструменти є безкоштовними, відкритими та широко застосовуються у науковій і прикладній практиці в багатьох країнах світу, що забезпечує прозорість і відтворюваність результатів досліджень.

Arduino IDE використовується для реалізації програмної частини, що функціонує безпосередньо на мікроконтролері та забезпечує зчитування інерціальних даних, обмін за стандартними інтерфейсами, а також попередню обробку та передавання інформації до персонального комп’ютера. Простота середовища, наявність великої кількості відкритих бібліотек і стабільна підтримка апаратних платформ роблять Arduino IDE доцільним вибором для створення вбудованих вимірювальних вузлів.

Для реалізації задач збору, візуалізації та аналізу експериментальних даних на персональному комп’ютері застосовано мову програмування Python з використанням відкритих бібліотек для чисельних обчислень, обробки сигналів і графічного представлення результатів. За своїми функціональними можливостями даний підхід є співставним з можливостями комерційних програмних пакетів, таких як MATLAB або LabVIEW, зокрема у частині реалізації алгоритмів фільтрації, спектрального аналізу та статистичної обробки даних.

Слід зазначити, що використання комерційного програмного забезпечення для подібних задач потребує значних фінансових витрат на придбання ліцензій, вартість яких може сягати декількох тисяч доларів США на рік. Запропонований підхід на основі Arduino IDE та Python дозволяє реалізувати повнофункціональну систему збору, обробки та аналізу інерціальної інформації без додаткових фінансових витрат, не поступаючись за рівнем функціональності та гнучкості комерційним аналогам. Вартість професійного обладнання коливається в межах 1000÷3000 євро. Вартість даної розробки, в тому числі вартість компонентів і витратних матеріалів не перевищує 300 євро.

У попередніх дослідженнях та публікаціях широко застосовуються як окремі акселерометри, зокрема ADXL345, так і багатокомпонентні інерціальні модулі на основі MEMS-технологій. Акселерометри типу ADXL345 є простими у використанні та придатними для вимірювання лінійних прискорень у квазістатичних режимах, проте їх функціональні можливості є обмеженими при дослідженні динамічних процесів, пов’язаних із кутовими переміщеннями та швидкими змінами орієнтації.

З огляду на специфіку задач дослідження динаміки шарнірно-зчленованих механічних систем, де визначальним є аналіз **відносних кутових переміщень між модулями**, доцільним є використання інерціального модуля, що поєднує акселерометри та гіроскопи в єдиному пристрої. У цьому контексті для розробки макетного апаратно-програмного зразка було обрано MEMS-інерціальний модуль

MPU-6500, який забезпечує одночасне вимірювання лінійних прискорень і кутових швидкостей за трьома взаємно перпендикулярними осями.

Порівняно з окремими акселерометрами, застосування MPU-6500 дозволяє реалізувати більш інформативну систему збору даних, орієнтовану на аналіз кутового стану та динамічних характеристик руху. Крім того, даний модуль характеризується компактністю, доступністю, широкою підтримкою з боку відкритих апаратно-програмних платформ і наявністю значної кількості прикладних реалізацій, що є важливим на етапі створення стендового макета та відпрацювання програмного забезпечення.

Таким чином, вибір MPU-6500 зумовлений не прагненням досягти максимальну точність на даному етапі, а необхідністю формування **універсального, гнучкого та функціонально повного макетного зразка**, придатного для подальшого розвитку в складі інформаційно-вимірювального комплексу для дослідження шарнірно-з'єднаних машин.

Запропонований комплекс складається з апаратної та програмної частин. Апаратна частина містить мікроконтролерну платформу на базі мікроконтролера ATmega328, встановленого на плату Arduino UNO V3 з підключеними інерціальними датчиками типу MEMS-IMU (в даному комплексі встановлено 2 датчика MPU-6500) (рис. 1), які забезпечують вимірювання лінійних прискорень і кутових швидкостей у трьох взаємно перпендикулярних осях. Датчики були просторово рознесені (на експериментальному зразку будуть встановлюватися на двох напіврамах (модулях), з'єднаних шарніром), що дозволяє формувати багатоточкову вимірювальну систему.

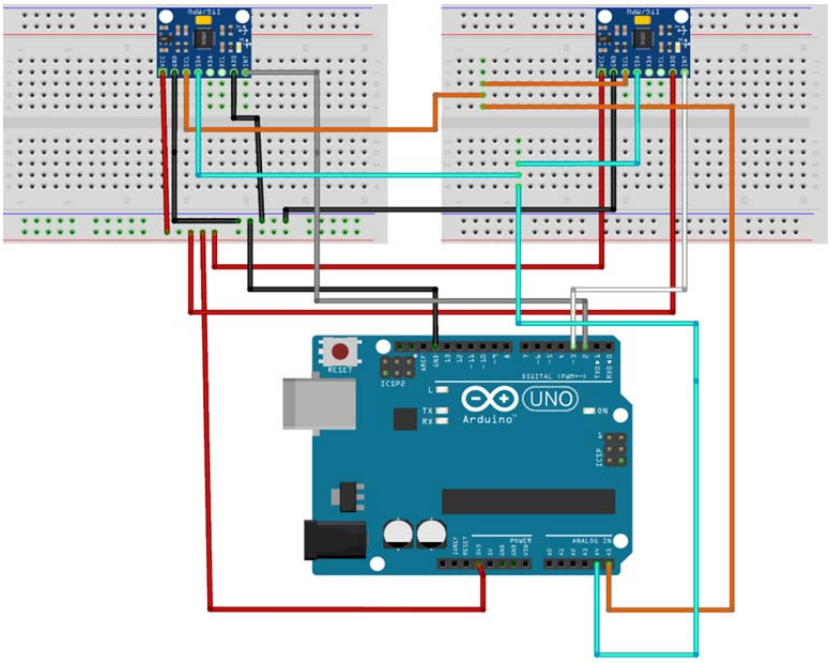


Рисунок 1 – Макетний стенд збору інерціальних даних на основі плати Arduino Uno та двох MEMS-модулів MPU-6500, підключених спільною шиною I²C

Джерело: розроблено авторами

Програмна частина реалізована завдяки використання програми Arduino IDE 2.3.7, яка забезпечує прийом даних у реальному часі, їх буферизацію та передачу у COM порт і прийом на PC та подальшу обробку з програмним забезпеченням, розробленим у Python 3.12.10. Архітектура програмного забезпечення передбачає розділення режимів візуалізації поточних даних і аналітичної обробки. В результаті

виконання цієї програми отримуємо графічні залежності, показані на рис. 2, де наведено часові реалізації сигналів інерціальних датчиків у режимі механічного спокою макетного стенда. За відсутності зовнішніх збурень сигнали характеризуються відносною стабільністю та незначними флуктуаціями навколо сталих рівнів. Постійні складові сигналів обумовлені проєкцією вектору прискорення вільного падіння на чутливі осі акселерометрів, а також індивідуальними зсувами нуля MEMS-сенсорів.

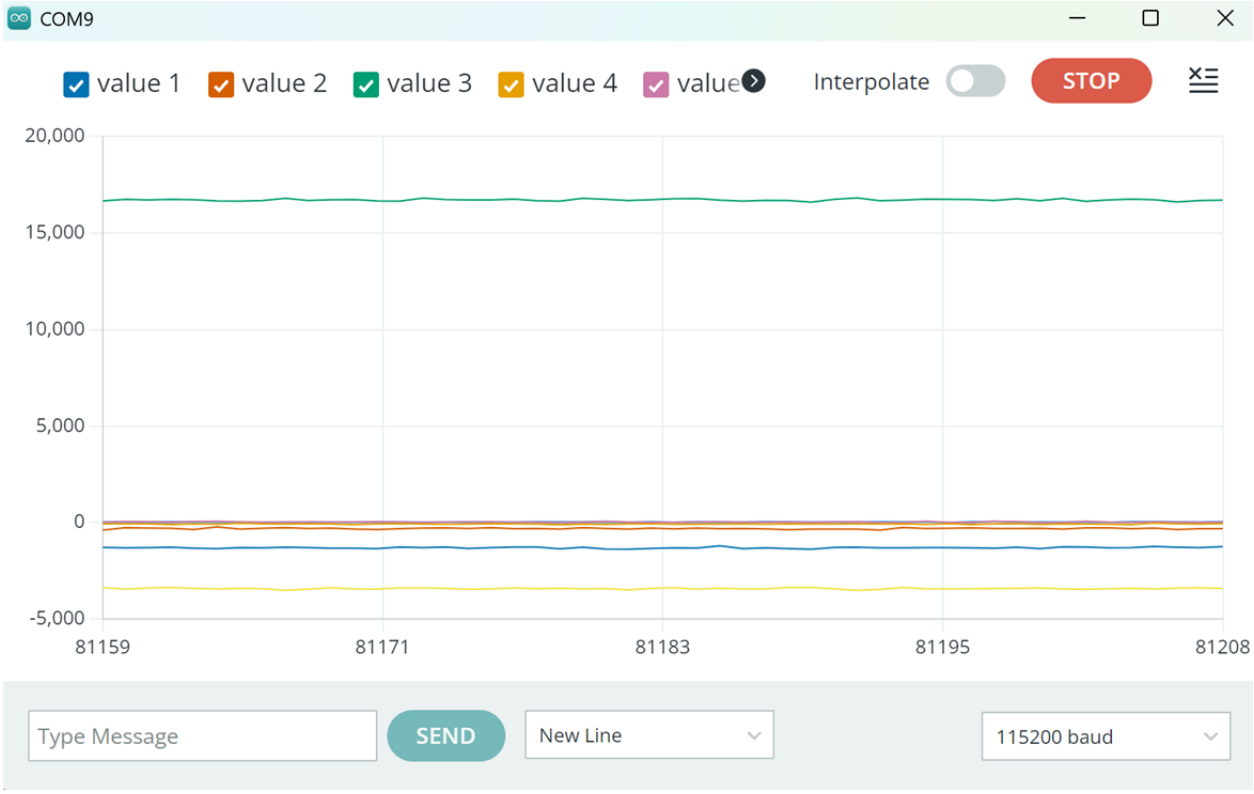


Рисунок 2 – Експериментальні сигнали у часі сирих інерціальних даних, зчитаних з двох MEMS-модулів MPU-6500 у режимі механічного спокою макетного стенда

Джерело: розроблено авторами

Невеликі коливання сигналів пояснюються внутрішніми шумами датчиків, температурними дрейфами та особливостями макетного підключення. Отримані результати підтверджують коректність роботи апаратної частини стенда та дозволяють розглядати даний режим як базовий (референтний) для подальшого аналізу реакції системи на зовнішні механічні впливи. Незважаючи на те, що з двох інерціальних модулів MPU-6500 зчитуються дванадцять інформаційних каналів, на графіках може візуально спостерігатися менша кількість кривих. Це пояснюється накладанням сигналів з каналів, що мають близькі числові значення, зокрема у випадку однакової орієнтації та умов роботи датчиків. Крім того, різний динамічний діапазон акселерометричних і гіроскопічних сигналів призводить до зменшення візуальної виразності окремих каналів при їх спільному відображенні.

На рис. 3 представлено результати вимірювань, отриманих при прикладенні контрольованого зовнішнього механічного впливу до макетного стенда у вигляді легких коливальних рухів макетних плат з інерціальними модулями. У порівнянні з режимом спокою спостерігається зростання амплітуди коливань сигналів та поява динамічних складових, що відображають реакцію датчиків на зовнішнє збурення.

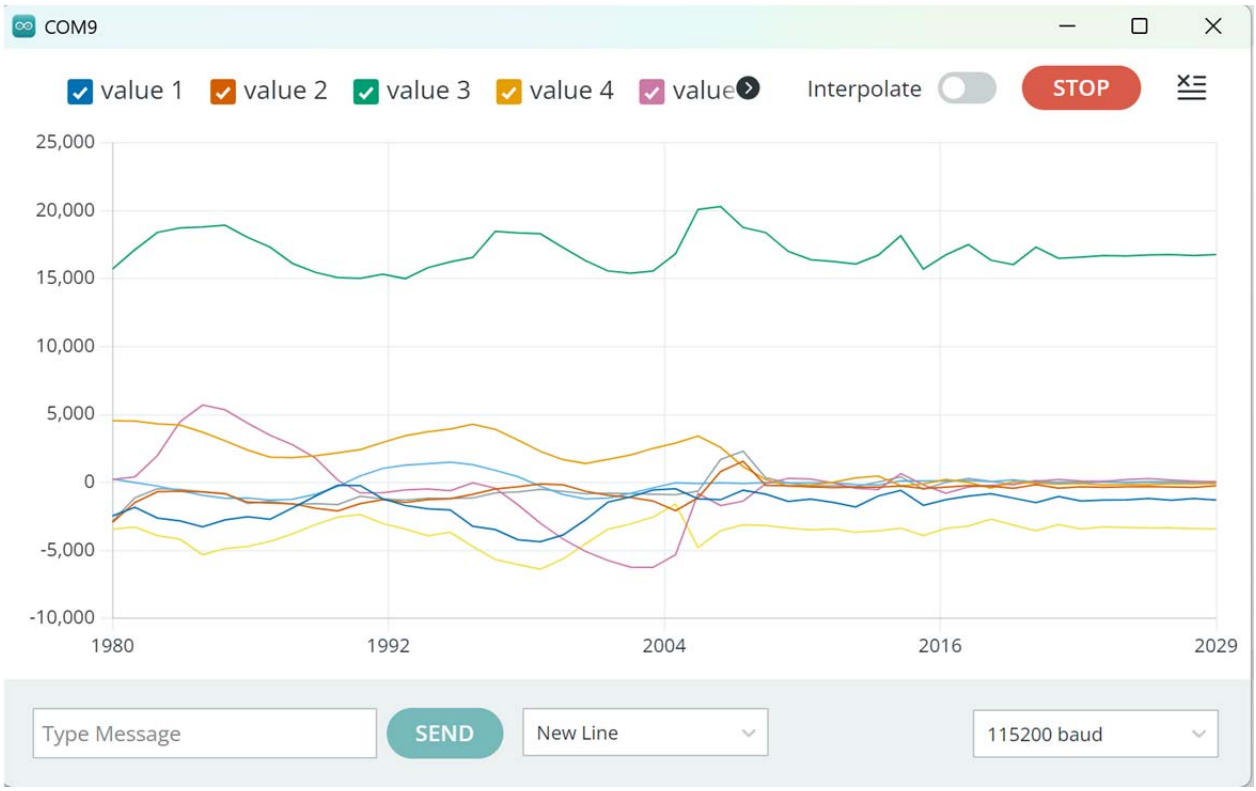


Рисунок 3 – Експериментальні сигнали сирих інерціальних даних
при прикладенні зовнішнього механічного впливу до макетного стенда
Джерело: розроблено авторами

Відмінності у характері сигналів окремих каналів зумовлені просторовою орієнтацією чутливих осей датчиків і різним розташуванням інерціальних модулів у межах макетного стенда. Отримані залежності демонструють здатність розробленого апаратно-програмного зразка фіксувати навіть незначні механічні впливи й можуть бути використані для подальшого аналізу динамічних характеристик, зокрема оцінки дрейфу, спектрального складу та відносних кутових переміщень.

Алгоритм роботи графічного інтерфейсу полягає у такому. Як було зазначено вище, побудова графічного інтерфейсу користувача (graphical user interface – GUI) здійснювалася у програмі Python 3.12.10. У процесі створення програми регістратора GUI було розроблено низку проміжних варіантів (а саме 12), з простого віртуального осцилографа, котрий зчитує COM порт та будує графіки прискорення та дані з гіроскопів у реальному часі. На рис. 4 представлена третя модернізація з додаванням елементу аналізу. До графічного інтерфейсу добавлені експериментальні сигнали кутів нахилу θ_1 та θ_2, визначених за даними двох інерціальних MEMS-модулів MPU-6500, а також їх відносний кут $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$.

Третій графік (Angles) на рис. 4 відображає часові залежності кутових параметрів, обчислених на основі даних акселерометрів двох інерціальних MEMS-модулів. Криві θ_1 та θ_2 відповідають кутам нахилу, визначеним окремо для першого та другого датчика відповідно, у вибраній площині, що визначається орієнтацією чутливих осей датчиків.

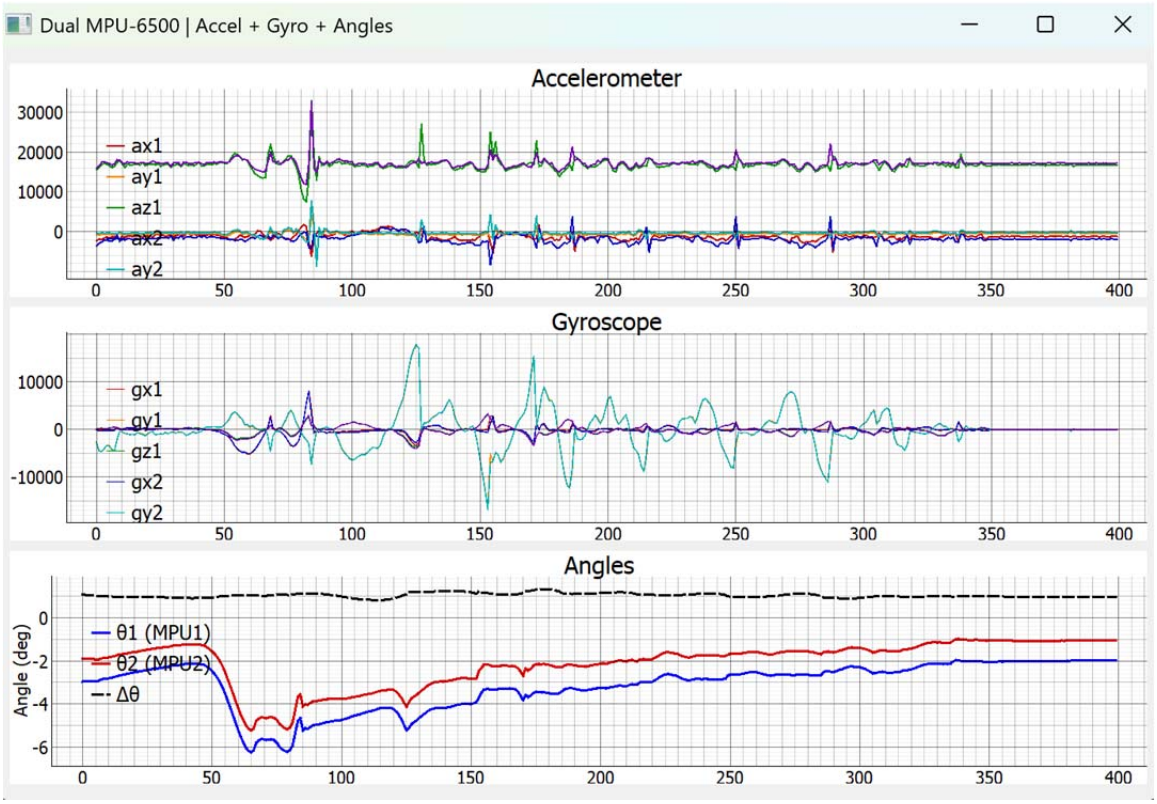


Рисунок 4 – Модернізація GUI №3, додавання графіка Angle до графічного інтерфейсу
Джерело: розроблено авторами

Кутові параметри θ_1 та θ_2 розраховуються на основі співвідношення компонент прискорення з урахуванням гравітаційної складової, що дозволяє оцінити просторове положення кожного модуля відносно вертикалі. Отримані значення відображають абсолютний кут нахилу кожної макетної плати у поточний момент часу.

Третя крива $\Delta\theta$ являє собою різницю між кутами θ_1 та θ_2 і характеризує відносне кутове положення двох інерціальних модулів. Саме цей параметр є найбільш інформативним при дослідженні динаміки шарнірно-зчленованих механічних систем, оскільки дозволяє безпосередньо оцінювати взаємне положення окремих ланок конструкції незалежно від їхнього абсолютного просторового положення.

Використання різниці кутів $\Delta\theta$ дозволяє зменшити вплив систематичних похибок окремих датчиків, таких як зсув нуля та температурний дрейф, що є особливо важливим на етапі роботи з некаліброваними чи попередньо обробленими даними. Таким чином, параметр $\Delta\theta$ може розглядатися як узагальнена характеристика деформаційних або кінематичних змін у макетному стенді та є базовим для подальшого аналізу динамічних процесів.

Після низки переглянутих варіантів, була отримана поки що остання модернізація GUI під номером 12 (рис. 5). На наш погляд, на даному етапі можливостей цього користувацького інтерфейсу достатньо для виконання завдань налагодження компонентів ІВС (інформаційна вимірювальна система). У процесі проведення пошукових експериментів на моделі шарнірної машини користувальницький інтерфейс, з огляду на відкритий код, може бути легко доопрацьований під нові обставини. Це ще більше підкреслює універсальність і модульність розробленої концепції ІВС. Ключові особливості розроблено за допомогою GUI. Для можливості роботи в двох режимах передбачений перемикач між режимом реєстрації даних та їх аналізом. Режим

реєстрації – це відображення в реальному часі вимірюваних параметрів, де без затримки можна спостерігати за процесом, який відбувається. Другий режим програмного забезпечення – Analysis, дозволяє виконувати комплексну обробку експериментальних даних, отриманих з інерціальних акселерометрів та гіроскопів MEMS-модулів MPU-6500. У часовій області забезпечується аналіз зміни сигналів у часі, що дає змогу оцінювати характер перехідних процесів, стабільність показів і реакцію системи на зовнішні збурення. Обчислення кутових параметрів θ_1, θ_2 та відносного кута $\Delta\theta$ дозволяє досліджувати просторове положення окремих елементів і їх взаємну кінематику. Функція оцінки дрейфу (drift) дає змогу кількісно визначити повільні систематичні зміни кутових сигналів у часі, характерні для MEMS-датчиків. Реалізація спектрального аналізу на основі FFT дозволяє виявляти домінуючі частоти коливань і досліджувати вібраційні процеси у системі. Додатково передбачено статистичний аналіз сигналів, зокрема визначення середніх значень, RMS та діапазонів зміни, що забезпечує комплексну оцінку якості та інформативності експериментальних даних.

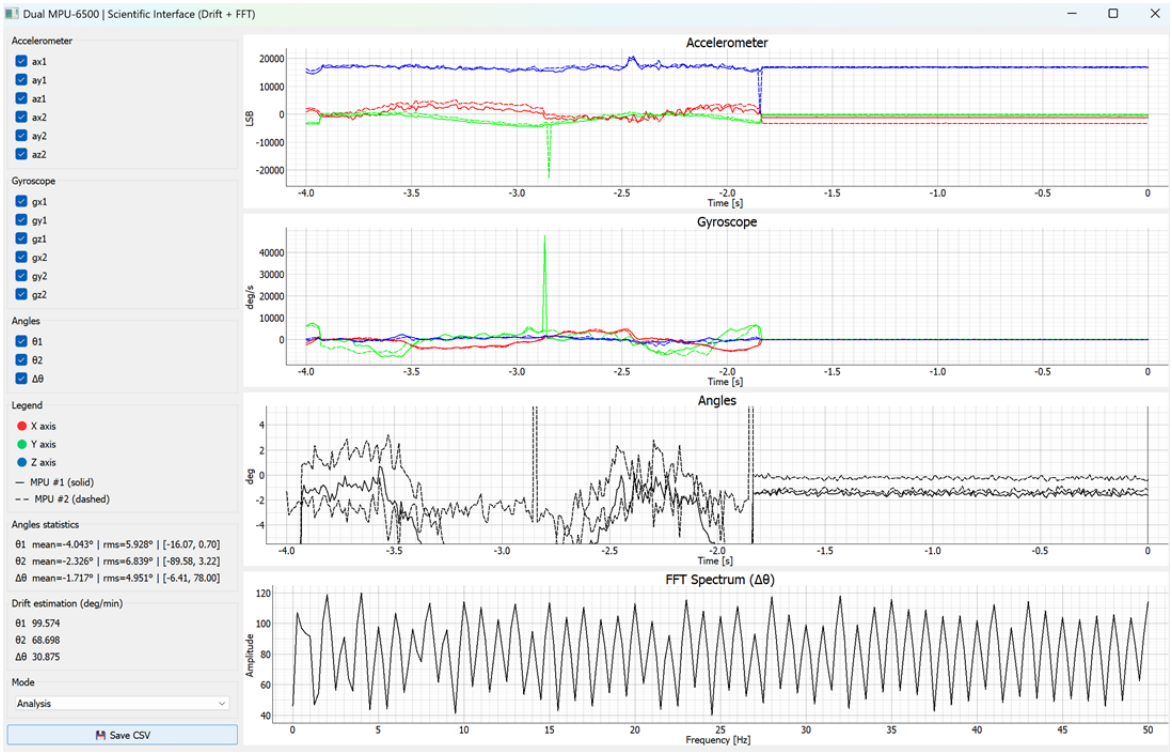


Рисунок 5 – Остання модернізація GUI для реєстрації та обробки експериментальних досліджень
Джерело: розроблено авторами

Подальші дослідження передбачають:

– до графічного інтерфейсу користувача GUI додати зчитування експериментальних даних з 4 тензобалок, які будуть встановлені біля кожного колеса, та будуть фіксувати реакції на них. Також на металевій конструкції зразка буде встановлено 4 тензорозетки. В результаті, на першому етапі проведення експериментальних досліджень GUI буде фіксувати дані з 20 інформаційних каналів;

– зі сторони апаратної частини розроблятиметься модульний блок, який дозволить змінювати компоненти ІВС у залежності від складності та умов проведення експериментальних досліджень, що не можливо здійснювати за допомогою серійних ІВС.

Висновки. 1. У ході дослідження розроблено макетний апаратно-програмний зразок інформаційно-вимірювальної системи на основі MEMS-інерціальних датчиків, призначений для стендового відпрацювання архітектурних і алгоритмічних рішень.

2. Запропонований макетний зразок реалізує базові функції збору, передавання, візуалізації та аналізу інерціальних даних і не є завершеним інформаційно-вимірювальним комплексом, а розглядається як етап підготовки до подальших експериментальних досліджень.

3. Обґрунтовано доцільність застосування відкритої апаратно-програмної архітектури, котра забезпечує гнучкість налаштування, можливість модифікації програмного забезпечення та адаптацію макетного зразка до різних об’єктів дослідження.

4. У складі програмного забезпечення реалізовано методи часової та частотної обробки інерціальних сигналів, зокрема визначення статистичних показників, оцінку дрейфу та спектральний аналіз, що дозволяє виконувати первинну оцінку динамічних процесів.

5. Розроблений графічний інтерфейс розглянуто як складову стендового макета, що забезпечує зручність налагодження програмного забезпечення, наочну інтерпретацію результатів і зменшення впливу оператора на процес аналізу даних.

6. Створений макетний апаратно-програмний зразок формує методичну та технічну основу для подальшої розробки повнофункціонального інформаційно-вимірювального комплексу та його використання в експериментальних дослідженнях механічних і шарнірно-з’єднаних систем.

Список літератури

1. Helma V., Goubej M., Setka M. Inertial measurements processing for sway angle estimation in overhead crane control applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2021. p. 1123–1128.
2. Seel T., Schauer T. IMU-based joint angle measurement made practical. *IEEE Sensors Journal*. 2013. Vol. 14, No. 6. p. 1954–1962.
3. Yi C., Zhou Y., Zhao Y. Reference frame unification of IMU-based joint angle measurement. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 9. Article 3147.
4. Xuan J., Liu H., Zhang Q. A review of inertial measurement unit arrays: configuration, calibration and data fusion. *Micromachines*. 2024. Vol. 15, No. 2. Article 215.
5. Rashid K. M., Louis J., Chowdhury T. Automated activity identification for construction equipment using IMU sensors. *Frontiers in Built Environment*. 2019. Vol. 5. Article 72.
6. Li Z., Wang J., Chen X. Research on structural health monitoring and intelligent lifting technology for cranes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1486. Article 022015.
7. Zhang Y., Liu B., Sun D. Structural health monitoring of lifting machinery based on multi-sensor data fusion. *NDT & E International*. 2024. Vol. 137. Article 102778.
8. Shahirpour A., Taheri S., Moshiri B. Sideslip angle and parameter estimation of an articulated vehicle using joint extended Kalman filter. *Vehicle System Dynamics*. 2023. Vol. 61, No. 4. P. 1057–1074.
9. Suzuki T., Yamamoto M., Kato H. Estimation of articulated angle in six-wheeled dump trucks using sensor fusion. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. Article 4738.
10. Uhlenberg M., Seel T., Bellmann M. Where to mount the IMU? Validation of joint angle estimation accuracy for different sensor placements. *Frontiers in Robotics and AI*. 2024. Vol. 11. Article 1298456.
11. Бойко Ю., Свачій О. Дослідження інерційної системи вимірювання відхилення вантажу БПЛА від нульової точки. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. №5. С. 218–226.

References

1. Helma, V., Goubej, M., & Setka, M. (2021). Inertial measurements processing for sway angle estimation in overhead crane control applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM),* (pp. 1123–1128). [in English].
2. Seel, T., & Schauer, T. (2013). IMU-based joint angle measurement made practical. *IEEE Sensors Journal.* Vol. 14, No. 6. 1954–1962. [in English].
3. Yi, C., Zhou, Y., & Zhao, Y. (2021). Reference frame unification of IMU-based joint angle measurement. *Sensors.* Vol. 21, No. 9. Article 3147. [in English].

4. Xuan, J., Liu, H., & Zhang, Q. (2024). A review of inertial measurement unit arrays: configuration, calibration and data fusion. *Micromachines.* Vol. 15, No. 2. Article 215. [in English].
5. Rashid, K. M., Louis, J., & Chowdhury, T. (2019). Automated activity identification for construction equipment using IMU sensors. *Frontiers in Built Environment.* Vol. 5. Article 72. [in English].
6. Li, Z., Wang, J., & Chen, X. (2020). Research on structural health monitoring and intelligent lifting technology for cranes. *Journal of Physics: Conference Series.* Vol. 1486. Article 022015. [in English].
7. Zhang, Y., Liu, B., & Sun, D.) (2024). Structural health monitoring of lifting machinery based on multi-sensor data fusion. *NDT & E International*. Vol. 137. Article 102778. [in English].
8. Shahirpour, A., Taheri, S., & Moshiri, B. (2023). Sideslip angle and parameter estimation of an articulated vehicle using joint extended Kalman filter. *Vehicle System Dynamics.* Vol. 61, No. 4. P. 1057–1074 [in English].
9. Suzuki, T., Yamamoto, M., Kato, H. (2021). Estimation of articulated angle in six-wheeled dump trucks using sensor fusion. *Sensors*.Vol. 21, No. 14. Article 4738. [in English].
10. Uhlenberg, M., Seel, T., & Bellmann, M. (2024). Where to mount the IMU? Validation of joint angle estimation accuracy for different sensor placements. *Frontiers in Robotics and AI.* Vol. 11. Article 1298456 [in English].
11. Bojko, Yu., & Svachij, O. (2022). Doslidzhennya inercijnoyi sistemi vimiryuvannya vidhilennya vantazhu BPLA vid nulovoyi tochki. *Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu,* 5, 218–226. [in Ukrainian].

Oleh Shcherbak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Kyrychenko,** Professor, DSci.
National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
Serhiy Khachaturyan, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Development of a Mock-up Hardware and Software Prototype of an Information and Measurement System Based on MEMS-IMU Modules for Experimental Research of Articulated Machines

The article presents the development stage of a mock-up hardware and software prototype of an information and measurement system (IMS) specifically designed for studying the dynamics of articulated-joint machines. Modern articulated vehicles consist of multiple modules (semi-frames) where the relative angular displacement significantly impacts controllability, stability, and structural loading. Unlike classical rigid machines, investigating articulated systems requires real-time monitoring of relative spatial positions without rigid mechanical links between measurement points.

The author highlights the limitations of commercial data acquisition systems, such as high costs, closed architectures, and lack of flexibility for specific research tasks. As an alternative, the research proposes an open-architecture system based on affordable MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technologies. The prototype's hardware component utilizes the ATmega328 microcontroller (Arduino UNO V3 platform) and two MPU-6500 inertial measurement units (IMU). These sensors are spatially separated to allow placement on different semi-frames, enabling the collection of three-axis linear acceleration and angular velocity data.

The software ecosystem of the developed prototype leverages the Arduino IDE for low-level firmware tasks and Python 3.12 for high-level data processing and visualization. This combination provides a powerful, license-free alternative to expensive commercial packages like MATLAB or LabVIEW. A specialized Graphical User Interface (GUI) was developed, featuring twelve iterations of refinement to ensure effective data logging and analysis. The GUI includes two operational modes: a real-time Registration mode for live monitoring and an Analysis mode for comprehensive post-processing.

The implemented signal processing algorithms include time-domain analysis for transient response evaluation, frequency-domain analysis using Fast Fourier Transform (FFT) for vibration study, and drift estimation to account for inherent MEMS sensor errors. A critical functional feature is the calculation of the relative angle ($Δθ$) between the two IMU modules, which serves as the primary informative parameter for analyzing the kinematic changes in articulated mechanical systems.

Experimental tests of the prototype in both static and dynamic conditions confirmed the reliability of the hardware and the accuracy of the software algorithms in detecting subtle mechanical perturbations. The study concludes that the developed mock-up provides a solid methodological and technical foundation for a future full-scale IMS complex intended for testing modular road-building machines. Future work includes expanding the system with 20 information channels, including strain gauges for reaction measurement at each wheel and structural stress analysis.

information and measuring complex, graphical interface, ARDUINO IDE, PYTHON, MEMS-IMU, accelerometer, gyroscope, signal processing, Fast Fourier Transform (FFT), drift

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 01.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 631.319.4 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).77-86

А.В. Бабій, проф., д-р техн. наук, **І.В. Вовк**
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: avbabiytntu@gmail.com

Дослідження енергетичних показників при подрібненні рослин бильними робочими органами

У роботі представлено теоретичну модель руйнування стебел рослин комбінованим ротаційним робочим органом, що поєднує дію бильних та ножових елементів. Використання теорії балки Ейлера-Бернулі та функції Ґріна дало змогу визначити енергетичні пороги руйнування, оцінити вплив кінематичних і конструктивних параметрів та встановити загальну споживану потужність процесу мульчування.
робочий орган, процес, подрібнення, стебло, параметри, швидкість, руйнування, навантаження, кінематичний режим, енергетичні показники, експеримент, модель, енергія, потужність, дослідження

Постановка проблеми. Забур'яненість площ, залишки бадилля часто стають однією з перешкод якісного проведення збиральних операції сільськогосподарських культур. Промисловістю випускається багато видів мульчувачів, які легко видаляють рослинні рештки, подрібнюючи їх. Але, в переважній більшості випадків, такі машини – однофункціональні. Тому сучасні виробники техніки намагаються зменшити номенклатуру машин у господарстві і тому на базі однієї машини, при нескладному її перелаштуванні, поєднати дві і більше суміжних технологічних операцій. Аналогічним чином було запропоновано на базі фрезерного барабана встановити додаткові осі, прикріпивши їх до дисків барабана, та встановити на осях шарнірно закріплені била. Принцип роботи такого багатофункціонального ротаційного робочого органу полягає в тому, що без встановлених бил він працює як фрезерний барабан на обробітку ґрунту, а при монтажі бил та зміні кінематичного режиму роботи – як мульчувач рослинних решток.

Проте така робота ротаційного робочого органу супроводжується певною складністю взаємодії робочих органів з ґрунтом та стеблами рослин у різних режимах роботи. Якщо робота барабана при фрезеруванні ґрунту проходить у тихохідному режимі, то в режимі мульчувача частота його набагато більша. Проблема полягає у відсутності узагальненої теоретичної моделі, яка б дозволяла описати динаміку руйнування стебла билом та встановити енергетичні критерії його руйнування, одночасно оцінити вплив конструкторсько-технологічних параметрів на споживану потужність робочим органом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Наукові праці, що стосуються процесу подрібнення рослинних решток та вдосконалення ротаційних робочих органів, висвітлюють проблематику у дослідженні механічних властивостей матеріалів при їх подрібненні [2, 5], встановлюють закономірності споживання енергії, якості та продуктивності процесу [3, 6, 7-9], закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів робочих органів на процес подрібнення [13-17].

У доробках авторів розвинуто багато ідей при обґрунтуванні нових конструкцій машин та способів подрібнення рослин, проте, багатофункціональні робочі органи на базі одного агрегату розглянуті ще недостатньо і потребують побудови аналітичних моделей, що описують основні аспекти їхньої роботи.

© А. В. Бабій, І. В. Вовк, 2026

Постановка завдання. Метою роботи є теоретичне обґрунтування енергетичних параметрів процесу подрібнення та руйнування стебел рослин комбінованим ротаційним робочим органом, що поєднує дію бильних та ножових елементів, шляхом побудови динамічної моделі імпульсної взаємодії била зі стеблом на основі рівняння Ейлера-Бернулі та функції Ґріна, визначення порогових енергетичних критеріїв руйнування, а також встановлення залежностей споживаної потужності привода від конструктивних і кінематичних параметрів робочого органу та характеристик стеблестою.

Виклад основного матеріалу. При обґрунтуванні конструктивно-технологічних параметрів комбінованого ротаційного робочого органу [10-12], який окремо поєднує технологічну операцію фрезерування ґрунту та після незначного дообладнання бильними робочими органами та при зміні кінематичного режиму – використовується як мульчувач рослинних решток, було встановлено діапазон його робочих швидкостей [1]. Це частина дослідження, яка дає відповіді на окремі питання при проєктуванні машини. Але не менш важливим є, теоретичним шляхом, на стадії проєктування, встановити споживану потужність такого агрегату та ряд інших показників. В даному дослідженні зосередимо основну увагу на енергетичних затратах на процес мульчування та вплив на нього окремих конструктивних параметрів бильних робочих органів.

Процес руйнування рослинних решток бильними робочими органами висвітлено у роботі [1], де модель побудована на основі теорії балки Ейлера-Бернулі. Стебло змодельоване як пружна ізотропна балка, що має модуль Юнга E, момент інерції його перетину I, щільність матеріалу стебла ρ та переріз має площу A. Модель балки Ейлера-Бернулі передбачає, що стебло коренем жорстко защемлене у ґрунті, а іншою частиною – вільне. Тоді основне рівняння згину для такої балки матиме вигляд [1, 4]

$$EI\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2}=q(x,t), \tag{1}$$

де $w(x,t)$ – поперечний прогин вздовж осі $x\in[0,L]$, L – довжина стебла;
$q(x,t)$ – імпульсне навантаження від дії била.

Вважаємо, що контактне навантаження від била – це зосереджений короткочасний імпульс у точці $x=x_0$ і момент часу $t=t_0$.

У моделі використано такі граничні умови:

$$w(0,t)=0,\ \frac{\partial w(0,t)}{\partial x}=0,\ \frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial x^2}=0,\ \frac{\partial^3 w(L,t)}{\partial x^3}=0. \tag{2}$$

У роботі [1] було отримано розв’язок рівняння (1) методом поділу змінних (модальний підхід) та наведено критерії руйнування.

У ході подальших досліджень було встановлено, що альтернативою модального підходу може бути розв’язок через функцію Ґріна, тобто вираз (1) можна записати у вигляді згортки функції Ґріна $G(x,\xi,t)$. Це фактична реакція системи в точці x на одиничний імпульс, що прикладений до стебла у точці ξ та у момент часу t.

Тоді рівняння Ейлера-Бернулі (1) можна переписати наступним чином

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI\frac{\partial^2 G}{\partial x^2}\right)+\rho A\frac{\partial^2 G}{\partial t^2}=\delta(x-\xi)\delta(t), \tag{3}$$

де $q(x,t)=\delta(x-\xi)\delta(t)$ – навантаження ($\delta(\cdot)$ – дельта-функції Дірака).

Граничні умови є аналогічними до умов (2).

Раціональність розв'язку (3) полягає в тому, що якщо замість одиночного імпульсу прикласти реальне навантаження $q(x,t)$, то завдяки лінійності рівняння можна скласти розв'язок

$$w(x,t)=\int_0^L\int_0^t G(x,\xi,t-\tau)q(\xi,t)d\tau\, d\xi\,. \tag{4}$$

Вираз (4) називають оператором Дюамеля.

При дії била на стебло виникає навантаження від ударної взаємодії

$$q(x,t)=I_u\delta(x-x_0\,)\delta(t-t_0), \tag{5}$$

де $I_u=\int F(t)dt$ – імпульс сили била.

Тоді вираз (4) з врахуванням (5) можна переписати у наступному вигляді

$$w(x,t)=I_u G(x,x_0,t-t_0). \tag{6}$$

Звідси видно, що відгук балки повністю визначається функцією Ґріна.

При модальному розкладі було отримано

$$w(x,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\phi_n(x)q_n(t)\,, \tag{7}$$

де $\phi_n(x)$ – власні форми; $q_n(t)$ – часова реакція.

Тоді функцію Ґріна можна представити аналогічним чином

$$G(x,\xi,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\phi_n(x)\phi_n(\xi)}{M_n\omega_n}\sin(\omega_n t)H(t), \tag{8}$$

де $M_n=\int_0^L\rho A\phi_n^2(x)dx$ – приведена маса моди; ω_n – власна частота моди; $H(t)$ – функція Хевісайда (відгук існує лише при $t>0$).

Якщо удар била відбудеться у точці x_0, то

$$q_n(t)=\frac{I_u}{M_n}\phi_n(x_0)\sin(\omega_n(t-t_0))H(t-t_0) \tag{9}$$

і це дає скачок швидкості моди

$$\dot{q}_n(t_0^+)=\frac{I_u}{M_n}\phi_n(x_0)\,. \tag{10}$$

Такий підхід використано якраз у моделі руйнування рослини билом.

Таким чином, функції Ґріна дозволяють досить точно описати вплив локального удару била у визначеній точці стебла на всю його довжину. Ця теорія добре узгоджується із модальною теорією, дозволяє перейти до енергетичних показників, зокрема мінімальної швидкості при якій відбувається руйнування стебла.

Застосування функції Ґріна при прогнозуванні руйнування стебла полягає у наступному. Запишемо момент, який буде виникати у стеблі після отримання імпульсу сили

$$M(x,t)=EI\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=EI\cdot I_u\frac{\partial^2 G(x,x_0,t-t_0)}{\partial x^2}. \tag{11}$$

Максимум моменту буде визначатися другою похідною від $G(x, x_0, t_0)$.

Тоді критерієм руйнування стебла буде

$$|M| \geq M_{kr} = \sigma_{зг} W, \tag{12}$$

де $\sigma_{зг}$ – напруження згину матеріалу стебла; W – осьовий момент опору перетину.

Тобто за такої моделі руйнування стебла можна оцінити перетин, де відбудеться злом стебла, визначити затримку між ударом та наростанням максимального моменту, проаналізувати наскільки сильно хвиля розповсюджується до основи стебла, а також точно розрахувати модальні енергії.

Реалізовуючи мету дослідження, що полягає у визначенні енергетичних показників роботи ротаційного робочого органу, опишемо деякі зв'язки цього процесу.

На першому етапі встановимо зв'язок імпульсу з кінетикою била. Припустимо, що маса била m_b, а його колова швидкість складає $\vartheta = \omega R$. Контакт била зі стеблом проходить за дуже короткий час і можна вважати, що це відбувається миттєво, тобто ефективний імпульс передається стеблу. Такий імпульс можна оцінити наближено за виразом

$$I_u \cong \alpha m_b \vartheta, \tag{13}$$

де $\alpha \in (0, 1)$ – безрозмірний коефіцієнт ефективної передачі імпульсу.

Коефіцієнт α враховує можливість часткового ковзання поверхні контакту била зі стеблом та частково пружно-демпфуючий характер самого контакту.

Тоді енергія удару може бути представлена виразом

$$E_{уд} = \frac{1}{2} \alpha m_b \vartheta. \tag{14}$$

Частка енергії, що поглинається рослиною

$$E_{ст} = \beta E_{уд}, \tag{15}$$

де β – коефіцієнт поглинання енергії рослиною ($\beta \in (0{,}05 ... 0{,}25)$).

Тоді енергетичний критерій руйнування стебла може бути записаний за виразом

$$E_{пор} = \gamma M_{кр} \kappa_{еф}^{-1}, \tag{16}$$

де $\kappa_{еф}$ – ефективна кривизна у критичній зоні (біля кореня або в місці удару); $\gamma \approx 1$ – коефіцієнт, що враховує дисипацію.

Вираз (16) – це енергетичний поріг, який враховує локальний згин та частковий зсув.

Тоді руйнування ймовірне, якщо $E_{ст} \geq E_{пор}$.

Пригадаємо, що даний ротаційний робочий орган, який розроблений за патентом [11], має свою специфіку роботи на технологічній операції при видаленні рослинності з поверхні поля.

Якщо било не забезпечує належного моменту, при якому проходить руйнування стебла, тобто $M_{\max} < M_{кр}$, то воно на шарнірі відхиляється і тоді у роботу вступає ніж фрези, що жорстко закріплений на дисках барабана.

Енергія, яка затрачається на руйнування стебла ножем буде складати

$$E_н = \int_0^{l_p} F_p(x)dx \approx \tau_s A_{зр}, \tag{17}$$

де l_p – величина проникнення ножа; $F_p(x)$ – локальна сила різання; τ_s – питомий опір зрізу; $A_{зр}$ – площа зрізу.

Для швидкообертових роторів значним є аеродинамічний опір. Особливо цей ефект позначається на роторах мульчувачів. При досягненні робочої частоти била займають радіальне положення чим створюють значний опір, переміщаючись у повітрі.

Сумарну площу бил, що створює опір, наближено можна вирахувати за наступною залежністю

$$A_{еф} = N_б h_b t_b \chi, \tag{18}$$

де $N_б$ – кількість бил; h_b – висота профілю била; t_b – товщина; χ – поправочний коефіцієнт на взаємний вплив елементів та турбулентність.

Тоді сила опору, що створюється аеродинамічним ефектом буде складати

$$F_{пов} = \frac{1}{2}\rho_{пов} C_d A_{еф} \vartheta^2, \tag{19}$$

де $\rho_{пов}$ – густина повітря; C_d – коефіцієнт лобового опору елементів ротора.

Потужність, що затрачається на подолання аеродинамічного опору

$$P_{пов} = F_{пов}\vartheta = \frac{1}{2}\rho_{пов} C_d A_{еф} \vartheta^3. \tag{20}$$

Отже, концептуально було окреслено основні опори, на які затрачається потужність приводу ротаційного робочого органу. Тепер потрібно врахувати конструктивні та кінематичні параметри робочого органу та параметри стеблестою.

Важливим чинником є густота стебел n (шт./м^2), які підлягають подрібненню та видаленню, робоча ширина захвату ротора b (м) та його поступальна швидкість u (м/с).

Тоді пропускна здатність ротора буде складати (шт./с)

$$\dot{N} = nbu, \tag{21}$$

а середня потужність, що затрачається на подрібнення рослин

$$P_{бил} = \dot{N}E_{ст} = nbu \cdot \beta \frac{1}{2} m_b \vartheta^2. \tag{22}$$

При другій стадії взаємодії – роботі ножів фрези

$$P_{нож} = \dot{N}E_н. \tag{23}$$

Загальна потужність, що затрачається на процес видалення рослинних решток з поверхні поля

$$P_{заг} = P_{бил/нож} + P_{пов} + \Delta P_{мех}, \tag{24}$$

де $\Delta P_{мех}$ – потужність, що затрачається на подолання механічних втрат у системі,

$$\Delta P_{мех} = \eta_{мех} P_{заг}, \tag{25}$$

тут $\eta_{мех} \approx 0{,}1...0{,}25$ – механічні втрати у системі.

Підсумовуючи виклад основних залежностей моделі, запишемо вираз загальної споживаної потужності приводу комбінованого ротаційного робочого органу при видаленні рослинності з поверхні поля

$$P_{заг} = \frac{1}{2}\left(nbu\beta m_b \vartheta^2 + \rho_{пов} C_d A_{еф} \vartheta^3\right)/\left(1-\eta_{мех}\right). \quad (26)$$

Таким чином, було описано механізм руйнування рослин билами та фрезерними ножами з енергетичної точки зору, враховано вплив опору повітря при обертанні ротора з робочими органами та механічні втрати.

Тепер перейдемо до кількісної оцінки енергетичних затрат на процес мульчування, проведемо числовий експеримент.

Маємо такі параметри ротаційного робочого органу та рослинної маси, на основі яких проведено числовий експеримент:

$b = 1{,}8$ м; $R = 0{,}3$ м; $N_б = 84$; $N_н = 32$; $m_b = 0{,}2$ кг; $\beta = 0{,}15$; $n = 250$ шт./м^2; $u = 1{,}0$ м/с; $\rho_{пов} = 1{,}2$ кг/м^3; $C_d = 1{,}2$; $h_b = 0{,}180$ м; $t_b = 0{,}012$ м; $\chi = 1{,}5$; $\eta_{мех} = 0{,}23$.

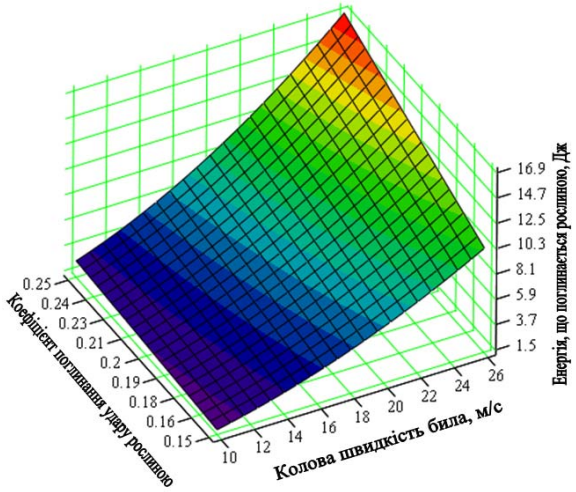


Рисунок 1 – Графічна залежність поглинання енергії рослиною при дії била
Джерело: розроблено авторами

На графічній залежності, рис. 1, показано здатність поглинати стеблом рослини енергію, що передається билом ротаційного апарату. Співставляючи отримані значення з пороговим для даного типу рослин, що визначено за виразом (16) на основі теорії балки Ейлера-Бернулі, регламентуємо діапазон значень колових швидкостей бил при роботі апарату. Такий підхід дозволяє правильно вибрати кінематичний режим роботи ротаційного робочого органу для надійного різання рослинної маси.

На основі проведеного числового експерименту отримано числові значення та графічні залежності потужностей, що затрачаються на процес подрібнення та видалення рослин, рис. 2.

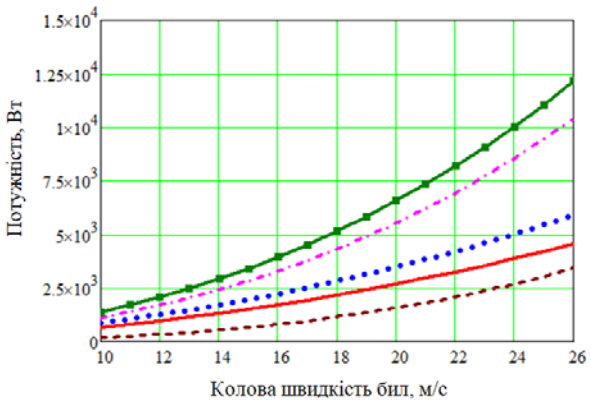


Рисунок 2 – Криві складових потужності, що затрачається на привод ротаційного барабана
Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 лініями зображені наступні потужності, що затрачаються на: подрібнення маси билами (суцільна лінія); роботу ножів (лінія крапками); подолання аеродинамічних опорів (пунктирна лінія); загальна потужність з механічними втратами, де подрібнення рослин здійснюється билами (штрих-пунктирна лінія); загальна потужність з механічними втратами, де подрібнення рослин здійснюється ножами барабана (суцільна лінія з квадратиками).

За аналізом графічних залежностей (рис. 2) видно, що потужність на подрібнення маси рослин при їх видаленні не є абсолютно визначальним чинником. Така потужність при максимальній досліджуваній коловій швидкості бил та для наведених умов роботи складає 4,5 кВт у загальній потужності, що затрачається на процес. Достатньо значну частку займає потужність на подолання аеродинамічних опорів при обертанні барабана – 3,44 кВт у загальній потужності. Механічні втрати, вплив інерційності системи на загальну потужність тут враховано через коефіцієнт механічних втрат системи $\eta_{мех} = 0{,}23$.

Крім того, якщо у процесі подрібнення рослинних решток била відхиляються та не перебивають рослину, то у роботу включаються фрезерні ножі барабана, максимальна потужність на їх роботу складає 5,89 кВт.

Тут можна спостерігати, що ця потужність є дещо більшою у порівнянні з роботою самих бил, але головною перевагою є здатність ножів, які жорстко закріплені на дисках барабана, подрібнювати рослини, тобто досягається технологічний ефект.

Збільшення цієї складової потужності на різних режимах роботи ротаційного барабана показаний на рис. 3. Максимальне значення такого приросту потужності складає 1,7 кВт у загальній потужності на привод ротаційного барабана.

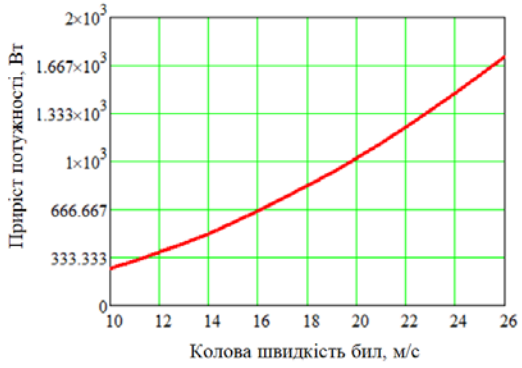


Рисунок 3 – Приріст потужності на привод ротаційного робочого органу,
коли подрібнення рослин здійснюється ножами барабана
Джерело: розроблено авторами

Висновки. У роботі побудовано модель руйнування стебла билом на основі теорії балки Ейлера-Бернулі, розв'язки отримані із застосуванням функції Ґріна, що дозволило отримати порогові значення енергії руйнування стебла, на основі цього вибрано кінематичний режим роботи ротаційного робочого органу. Для барабана діаметром 0,6 м, колова швидкість бил повинна складати не менше 12 м/с при поступальній швидкості агрегату 1 м/с. Зі зростанням поступальної швидкості агрегату та накладанні умови довжини подрібненої маси, колова швидкість повинна бути збільшеною. У даному експерименті було закладено діапазон колових швидкостей бил від 10 м/с до 26 м/с, що дало можливість охопити основні кінематичні режими ротаційного робочого органу та оцінити потужність, що буде споживатися приводом. Максимальна загальна потужність приводу не повинна перевищувати 12,1 кВт для умов, що визначені даним числовим експериментом. Таким чином, наведена методика дозволяє оцінити порогові значення енергії руйнування культур, на основі цього вибрати оптимальний кінематичний режим роботи барабана, встановити потужність, яка необхідна для виконання технологічного процесу подрібнення рослинних решток.

Список літератури

1. Babii A., Vovk I. Mathematical model of contact interaction between a rotating working body and plant stems for their shredding. *Engineering, Energy, Transport AIC. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university.* 2025. Vol. 103, № 3. P. 99-106. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-11.
2. Fan, J.; Li, Y.; Wang, B.; Gu, F.; Wu, F.; Yang, H.; Yu, Z.; Hu, Z. An Experimental Study of Axial Poisson's Ratio and Axial Young's Modulus Determination of Potato Stems Using Image Processing. *Agriculture 2022*, 12, 1026. https://doi.org/10.3390/agriculture12071026.
3. J.S. Pérez de Corcho Fuentes, F. Garbati Pegna, C. Iglesias Coronel, F. García Reina, and P. Spugnoli. 2009. Power demand of flail mower during field demolition of pineapple fields. *Cien. Inv. Agr.* 36(1): 59-68.
4. Krutiy Yu.S. Forced harmonic oscillations of the euler-bernoulli beam with resistance forces. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. *Pratsi, Issue* 3(47), 2015. P.9-15. DOI 10.15276/opu.3.47.2015.03.
5. Lorna J. Gibson. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *J. R. Soc. Interface* (2012) 9, 2749–2766. DOI:10.1098/rsif.2012.0341.
6. Ramm, S.; Hasler, M.; Reckleben, Y.; Hartung, E. Single-Pass Grain Corn Harvest and Stubble Shredding: Performance of Three Corn Header Configurations as Effected by Harvesting Speed and Cutting Height. *Agriculture 2023*, 13, 833. https://doi.org/10.3390/agriculture13040833.
7. Sheichenko, V., Volskyi, V., Kotsiubanskyi, R., Bonchyk, V., Shevchuk, V., Shevchuk, M., Vovk, V., Shapoval, O. (2025). Determination of the patterns of changes in the quality indicators of crushing corn and sunflower stems by working bodies of technical equipment. *Technology Audit and Production Reserves, 5* (1 (85)), 12–20. DOI: 10.15587/2706-5448.2025.340915.
8. Sheichenko, V., Volskyi, V., Kotsiubanskyi, R., Dnes, V., Bilovod, O., Shevchuk, M., Skoriak, Y. (2023). Determining the effect of the direction of installing the cutting edges of shredder roller blades on process parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (125)), 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287483.
9. Sridhar, N. and Surendrakumar, A. (2018). Performance evaluation of rotary and flail shredders. *Internat. J. Agric. Engg.*, 11(1) : 23-29, DOI: 10.15740/HAS/IJAE/11.1/23-29.
10. Бабій А., Вовк І., Гладьо Ю. Багатофункціональний ротаційний робочий орган. *Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті: збірник тез доповідей. Міжнародної науково-практичної конференції, (м. Рівне, 9-10 квітня 2025 року).* Рівне: НУВГП, 2025. С.6-8.
11. Бабій А.В., Вовк І.В., Гладьо Ю.Б., Валяшек В.Б. Ротаційний робочий орган. Патент на корисну модель 160845, Україна. МПК (2025.01) A01B 33/00. u 2025 00186; заявл. 16.01.2025; опубл. 5.10.2025, Бюл.№ 42.
12. Вовк І.В., Бабій А.В. Обґрунтування доцільності у проєктуванні багатофункціонального ротаційного робочого органу. *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів.* Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. С.96-97.
13. Вольський В. А., Коцюбанський Р. В. Конструкційно-технологічні особливості сучасних комбінованих знарядь. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва.* 2023. Вип. 2 (116). С. 16-24. https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-2.

14. Замойський С.М., Замойська К.В. Вплив конструктивно-технологічних параметрів ротаційного розпушувача на якість підготовки ґрунту. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Технічні науки.* 2017. Вип. 26. С. 16-22.
15. Корчак М.М., Дудчак Т.В., Вільчинська Д.В. Теоретичні дослідження впливу фрези на процес подрібнення рослинних залишків грубостеблових культур по смугах обробітку. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Технічні науки.* 2020. Вип. 32. С. 113-123. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2020-1-14.
16. Сало В. М., Богатирьов Д. В., Лещенко С.М. Щодо надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2023. Вип.53. С.93-101. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.93-101.
17. Труш М.М. Обґрунтування параметрів подрібнювача стебел. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2009. Вип. 19.10. С.103-108.

References

1. Babii, A., & Vovk, I. (2025). Mathematical model of contact interaction between a rotating working body and plant stems for their shredding. *Engineering, Energy, Transport AIC. Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university*. Vol. 103, № 3. P. 99-106. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-11.
2. Fan, J.; Li, Y.; Wang, B.; Gu, F.; Wu, F.; Yang, H.; Yu, Z., & Hu, Z. (2022). An Experimental Study of Axial Poisson's Ratio and Axial Young's Modulus Determination of Potato Stems Using Image Processing. *Agriculture*, 12, 1026. https://doi.org/10.3390/agriculture12071026.
3. J.S. Pérez de Corcho Fuentes, F. Garbati Pegna, C. Iglesias Coronel, F. García Reina, and P. Spugnoli. (2009). Power demand of flail mower during field demolition of pineapple fields. *Cien. Inv. Agr.* 36(1): 59-68.
4. Krutiy, Yu.S. (2015). Forced harmonic oscillations of the euler-bernoulli beam with resistance forces. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. *Pratsi, Issue* 3(47). P.9-15. DOI 10.15276/opu.3.47.2015.03.
5. Lorna, J. Gibson. (2012). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *J. R. Soc. Interface* 9, 2749–2766. DOI:10.1098/rsif.2012.0341.
6. Ramm, S.; Hasler, M.; Reckleben, Y.; & Hartung, E. (2023). Single-Pass Grain Corn Harvest and Stubble Shredding: Performance of Three Corn Header Configurations as Effected by Harvesting Speed and Cutting Height. *Agriculture*, 13, 833. https://doi.org/10.3390/agriculture13040833.
7. Sheichenko, V., Volskyi, V., Kotsiubanskyi, R., Bonchyk, V., Shevchuk, V., Shevchuk, M., Vovk, & V., Shapoval, O. (2025). Determination of the patterns of changes in the quality indicators of crushing corn and sunflower stems by working bodies of technical equipment. *Technology Audit and Production Reserves, 5* (1 (85)), 12–20. DOI: 10.15587/2706-5448.2025.340915.
8. Sheichenko, V., Volskyi, V., Kotsiubanskyi, R., Dnes, V., Bilovod, O., Shevchuk, M., & Skoriak, Y. (2023). Determining the effect of the direction of installing the cutting edges of shredder roller blades on process parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (125)), 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287483.
9. Sridhar, N. and Surendrakumar, A. (2018). Performance evaluation of rotary and flail shredders. *Internat. J. Agric. Engg.*, 11(1) : 23-29, DOI: 10.15740/HAS/IJAE/11.1/23-29.
10. Babii, A., Vovk, I., & Hlado, Yu. (2025). Multifunctional Rotary Working Element. *Innovations in the Agro-Industrial Complex, Mechanical Engineering, and Transport: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rivne, April 9–10, 2025*. Rivne: NUWEE. P. 6–8 [in Ukrainian].
11. Babii, A. V., Vovk, I. V., Hlado, Yu. B., Valiashek, V. B. (2025). Rotation working body. Patent for utility model 160845, Ukraine. IPC (2025.01) A01B 33/00. u 2025 00186; declared Jan. 16, 2025; published Oct. 5, Bull. No. 42 [in Ukrainian].
12. Vovk, I.V., & Babii, A.V. (2023). Substantiation of Expediency in Designing a Multifunctional Rotary Working Element. *Actual Problems of Modern Technologies: Proc. of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students*. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. P. 96–97 [in Ukrainian].
13. Volskyi, V. A., & Kotsiubanskyi, R. V. (2023). Design and Technological Features of Modern Combined Implements. *Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production*. Issue 2 (116). P. 16–24. https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-2 [in Ukrainian].
14. Zamoyskyi, S.M., & Zamoyska, K.V. (2017). Influence of Design and Technological Parameters of a Rotary Cultivator on the Quality of Soil Preparation. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics. Technical Sciences.* Issue 26. P. 16–22 [in Ukrainian].
15. Korchak, M.M., Dudchak, T.V., & Vilchynska, D.V. (2020). Theoretical Studies of the Influence of the Cutter on the Process of Shredding Plant Residues of Coarse-Stemmed Crops in Tillage Strips. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics. Technical Sciences.* Issue 32. P. 113–123. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2020-1-14 [in Ukrainian].

16. Salo, V. M., Bohatyryov, D. V., & Leshchenko, S.M. (2023). Regarding the Reliability of the Technological Process of Shredding Post-Harvest Residues. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines. All-State Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. Issue 53. P. 93–101. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.93-101 [in Ukrainian].
17. Trush, M.M. (2009). Substantiation of Stem Shredder Parameters. *Scientific Bulletin of UNFU*. Issue 19.10. P. 103–108 [in Ukrainian].

Andrii Babii, Prof., DSc., **Ivan Vovk**
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Research of Energy Parameters in Plant Shredding Using Flail Working Bodies

The aim of this study is the theoretical substantiation of the energy parameters of the process of shredding plant residues using a combined rotating working body that integrates the action of flail and cutting elements. Based on the Euler–Bernoulli beam equation and the Green's function, the dynamics of the impulse interaction between the flail and the stem are determined, as well as the threshold energy conditions for plant destruction. Additionally, the task is to evaluate the influence of the structural parameters of the working bodies, kinematic modes, and aerodynamic resistance on the total power consumption of the drum drive.

In this work, a mathematical model of stem bending under the action of an impact impulse from a flail working body is developed, where the stem is considered as a cantilever beam and the load as a short-term delta impulse. The Euler–Bernoulli equation is solved using the Green's function, which makes it possible to determine the spatiotemporal characteristics of deformations, maximum bending moments, and critical failure conditions. Based on the model, expressions for the flail impulse, impact energy, and energy absorbed by the stem are derived and an energy-based fracture criterion for the plant is formulated. The case of flail deflection on a hinge and the transition of shredding to the cutter blades is also analyzed, for which an estimation of cutting energy is provided. The influence of rotor aerodynamic resistance is considered, the area of elements creating resistance is determined and the corresponding force and power relationships are obtained. The throughput capacity of the device under a given stem density is established, and formulas for the average power consumed in mulching and in the operation of cutting elements are derived. A numerical experiment is conducted for real geometric and kinematic parameters of the drum, within which graphical dependencies of absorbed energy, components of drive power and the increase in energy consumption when switching to cutting mode are obtained.

The developed model made it possible to determine threshold values of energy and speed of flail elements at which effective stem destruction is ensured. It is shown that the aerodynamic resistance of the rotor constitutes a significant portion of energy consumption, while the power required for shredding plants with flail elements is not dominant in the overall energy balance. For a drum with a 0.6 m diameter, it is determined that the minimum circular speed of the flail should be at least 12 m/s, and the maximum total drive power is about 12.1 kW under the studied conditions. The proposed methodology can be used in the design of combined rotating working bodies, optimization of their kinematic modes, and prediction of energy consumption in the mulching process.

working body, process, shredding, stem, parameters, speed, destruction, load, kinematic mode, energy indicators, experiment, model, energy, power, research

Одержано (Received) 26.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 631.316.022.4 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).87-98

В.А. Дейкун, доц., канд. техн. наук, **Д.Ю. Артеменко,** доц., канд. техн. наук,
Р.В. Москальченко
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua

Обґрунтування конструкції лапи просапного культиватора із змінним струнним лезом

В роботі розглянуто питання зниження тягового опору робочих органів просапних культиваторів шляхом удосконалення конструкції лапи. Запропоновано конструкцію лапи культиватора з долотоподібним стояком та струнним сталевим лезом, натягнутим у горизонтальній площині. Розроблено математичну модель визначення тягового опору такого робочого органу, яка враховує опір стояка, опір струнного леза та швидкісний вплив під час руху в ґрунті. Проведено аналіз впливу основних конструктивних і технологічних параметрів на величину тягового опору лапи. Досліджено залежності тягового опору від глибини обробітку, щільності ґрунту, кута атаки струнного леза та швидкості руху агрегату. За результатами математичного моделювання побудовано графічні залежності, що характеризують зміну тягового опору в досліджуваних діапазонах параметрів. Встановлено, що найбільший вплив на величину тягового опору мають глибина обробітку та щільність ґрунту. Визначено, що збільшення кута атаки струнного леза сприяє зменшенню тягового опору робочого органу. Обґрунтовано раціональні параметри конструкції та режими роботи удосконаленої лапи культиватора. Запропоноване конструктивне рішення сприяє зменшенню енергетичних витрат процесу міжрядного обробітку ґрунту.

просапний культиватор, лапа культиватора, догляд за посівами, міжрядний обробіток

Постановка проблеми. Сучасна культура обробітку ґрунту вимагає застосування енерго та ресурсозберігаючих технологій. Міжрядний обробіток просапними культиваторами є однією з найбільш енергомістких операцій в рослинництві. Основна частка енерговитрат під час культивації припадає на подолання тягового опору ґрунту робочими органами (стрілчастими та плоскорізальними лапами). Тому вдосконалення конструкції робочої частини лапи з метою зниження її тягового опору є важливим і актуальним завданням.

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі землеробської механіки [1-4], існуючі конструкції просапних культиваторних лап не повною мірою задовольняють сучасні вимоги щодо енергоефективності. Зміна геометричних параметрів робочої частини (кута кришення, кута розхилу, радіуса кривизни поверхні, товщини леза) має комплексний вплив, з одного боку, вона визначає якість підрізання бур'янів і кришення ґрунту, а з іншого формує величину тягового опору.

Тяговий опір - це основний просто енергетичний показник, який безпосередньо впливає на кінематику агрегату та якість виконання технологічної операції. Високий тяговий опір створює значний згинальний момент на стійці лапи та рамі культиватора. Якщо опір перевищує розрахункові значення (наприклад, через тупе лезо або нераціональний кут кришення), стійка деформується або відхиляється назад. Це призводить до вимілення лапи (зменшення фактичної глибини обробітку), що неприпустимо, оскільки коренева система бур'янів залишається непідрізаною. Оптимально спроектована лапа з низьким опором працює за принципом різання зі сколюванням, вона легко проникає в пласт, підрізає його і змушує кришитися по лініях

© В. А. Дейкун, Д. Ю. Артеменко, Р. В. Москальченко, 2026

найменшого опору. Якщо опір робочої частини надмірний (через великий кут входження в ґрунт), лапа перестає різати і починає штовхати ґрунт поперед себе. Це руйнує структуру ґрунту, створює брили і призводить до засипання культурних рослин у рядку. При зростанні тягового опору через затуплення леза збільшується зона зминання перед кромкою. Замість того, щоб перерізати стебла бур'янів лапа просто пригинає їх до ґрунту або витягує разом із грудкою, залишаючи рослину неушкодженою. Зростання тягового опору машини змушує трактор збільшувати тягове зусилля, що призводить до підвищеного буксування коліс. Буксування не лише збільшує витрати пального та знижує продуктивність, але і спричиняє сильне ущільнення підошви, що погіршує водно-повітряний режим поля. Нерівномірність тягового опору (яка зростає при нераціональній формі лапи) викликає сильні автоколивання робочих органів. З одного боку, мікровібрації можуть сприяти самоочищенню лапи від решток, але надмірні коливання розхитують кріплення, призводять до втомного руйнування металу та нерівномірного дна борозни [5-8]. Тому, удосконалення конструкції лапи просапного культиватора є необхідна і актуальна задача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання зниження енергоємності обробітку ґрунту шляхом оптимізації геометрії робочих органів залишається одним із основних в сучасних дослідженнях. Значний внесок у дослідження впливу геометричних параметрів лап на тяговий опір зробили зарубіжні вчені. Так, вплив геометрії лапи на тяговий опір та деформацію ґрунту досліджувався в [9]. В роботі детально розглядається вплив кута нахилу леза та інших параметрів лапи на тяговий опір. Автори отримали математичну залежність і довели за допомогою моделювання, що зі збільшенням кута нахилу тяговий опір і вертикальна сила виштовхування закономірно зростають. Отримані результати дають повне розуміння силового балансу, який виникає під час взаємодії лапи культиватора із ґрунтом.

Fielke J.M. у своїй праці [10] довів, що стан різальної кромки є домінуючим фактором у формуванні тягового зусилля. Його моделювання взаємодії гострих та затуплених лез із ґрунтовим середовищем показало, що заміна гострої різальної кромки на притуплену (зі збільшенням радіуса закруглення) призводить до зростання тягового опору до 80% через зміну характеру руйнування ґрунту з різання на зм'яття та ефект нагортання.

Kornél T. в [11], зосередився на моделюванні взаємодії ґрунту з пасивно-вібруючими стрільчастими лапами. Використовуючи метод дискретних елементів, було встановлено, що коливання робочого органу в процесі руху сприяють періодичному руйнуванню ґрунтових зв'язків, що знижує загальний середній тяговий опір на 6 - 9% порівняно з жорстко закріпленими конструкціями. Це відкриває шлях до створення нових енергоефективних робочих органів на пружинних стійках.

Важливий аспект проектування високошвидкісних культиваторів висвітлено в роботі Kushwaha R.L. та Linke C. [12], де автори акцентують увагу на тому, що при збільшенні швидкості руху агрегату понад 8-10 км/год вплив кута нахилу (кута кришення) лапи на тяговий опір стає нелінійним. Ними встановлено, що кожний градус збільшення кута нахилу робочої поверхні спричиняє приріст опору ковзанню пласта приблизно на 2%, що вимагає дуже точного обґрунтування кутових параметрів лап для швидкісних режимів роботи.

Окремий напрям досліджень присвячений зносостійкості різальних елементів. Робота Tekeste M. [13], присвячена вивченню характеристик зносу лап у ґрунтових каналах. Де було доведено, що застосування локального зміцнення (нанесення твердосплавних матеріалів) саме на нижню частину леза дозволяє у 3,5 рази довше

зберігати проектну геометрію робочого органу, що стабілізує тяговий опір протягом усього періоду експлуатації та покращує якість формування насіннєвого ложа.

В останні роки особлива увага приділяється інтегрованим оглядам методологій моделювання, робота Ucgul M. [14], систематизує досвід використання DEM-моделей для прогнозування сил, що діють на робочі органи в різних ґрунтових умовах. Ці роботи підтверджують, що сучасна математична модель тягового опору повинна враховувати не лише макрогеометрію лапи, а і мікрогеометрію її різальної кромки (товщину леза, кут фаски), оскільки ці параметри критично впливають на енергетичні показники процесу.

Якщо узагальнити результати останніх наукових досліджень робочих органів просапних культиваторів, можна бачити, що основна увага дослідників направлена на покращення вже існуючих робочих органів і їх техніко технологічних характеристик. Головний показних роботи лапи просапного культиватора – тяговий опір зменшується в основному за рахунок впливу на вже існуючий елемент лезо. Існуюча конструкція лапи просапного культиватора вважається класичною і остаточною, нових конструктивних рішень практично не пропонується. Незважаючи на глибоке вивчення окремих факторів, питання комплексної оптимізації робочих елементів і геометрії лап просапних культиваторів з урахуванням специфіки міжрядного обробітку та необхідності мінімізації пошкодження кореневої системи культурних рослин потребує подальшого уточнення і нових конструкційних рішень, що і визначає актуальність цієї роботи.

Постановка завдання. Мета дослідження - зниження енергоємності процесу міжрядного обробітку ґрунту шляхом обґрунтування раціональних геометричних параметрів робочої частини лапи просапного культиватора на основі аналізу її взаємодії з ґрунтовим середовищем.

Завдання дослідження:

дослідити механізм взаємодії робочої частини культиваторної лапи з ґрунтом та виявити ключові фактори, що формують тяговий опір;

розробити математичну модель тягового опору лапи залежно від її конструктивних параметрів та фізико-механічних властивостей ґрунту;

теоретично дослідити та визначити раціональні параметри лапи, які забезпечують мінімальний тяговий опір за умови дотримання агротехнічних вимог (глибини обробітку, ступеня кришення, повноти підрізання бур’янів) та вплив тягового опору на процес роботи та виконання технологічного процесу.

Викладення основного матеріалу. З метою усунення визначених в результаті огляду недоліків роботи лап просапних культиваторів, нами була розроблена її удосконалена конструкція [15]. Запропонована лапа просапного культиватора має, стояк виконаний долотоподібним, в задній частині якого розташований натяжний пристрій з кронштейном, а в нижній частині як стояка так і з обох боків кронштейна є пази через які в горизонтальній площині натягується струнне сталеве лезо яке формує робочу поверхню лапи та забезпечує утворення кута її атаки.

На (рис. 1) показані три проекції удосконаленої лапи. Як видно, запропонована лапа складається із долотоподібного стояка 1, кронштейна 2, струнного сталевого леза 3, натяжного пристрою 4.

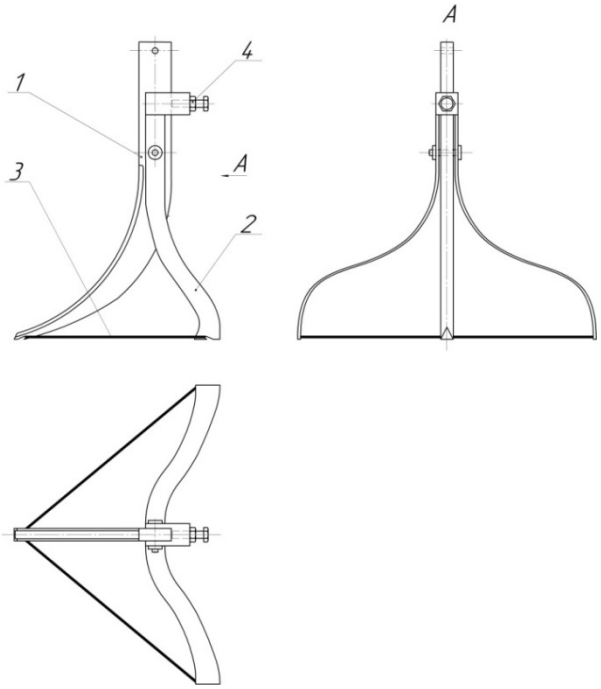
Запропонована лапа культиватора працює наступним чином: долотоподібний стояк 1 занурюючись в ґрунт і рухаючись на заданій глибині обробітку, орієнтує кронштейн 2 і натягнуте з обох боків струнне сталеве лезо 3 в горизонтальній площині. Долотоподібний стояк 1 розпушує шар ґрунту, а струнне сталеве лезо 3 рухаючись під кутом атаки в горизонтальній площині підрізає кореневу систему бур’янів і також проводить подальше кришення ґрунту. Завдяки незначній товщині струнного сталевого

леза 3 опір ґрунту буде мінімальним, а кут його атаки, який менший кута тертя бур'янів і ґрунту по сталі сприяє самоочищенню його робочої поверхні. За допомогою натяжного пристрою 4 компенсується провисання струнного сталевого леза 3 та відбувається його підтягування перед початком робіт.

Ефективність роботи культиваторної лапи забезпечується такими факторами:

завдяки долотоподібній стійці лапи та незначній товщині струнного сталевого леза тяговий опір робочого органу мінімальний;

за рахунок формування кута атаки струнним сталевим лезом та його руху в горизонтальній площині відбувається не лише якісне підрізання кореневої системи бур'янів і кришення ґрунту, а і самоочищення робочого органу.



1 – долотоподібний стояк; 2 – кронштейн; 3 - сталеве лезо; 4 - натяжний пристрій

Рисунок 1 – Удосконалена конструкція лапи просапного культиватора:
Джерело: розроблено авторами

Для можливості визначення основних конструктивно-технологічних параметрів удосконаленої лапи просапного культиватора нами була розроблена математична модель розрахунку тягового опору удосконаленої лапи просапного культиватора.

Оскільки удосконалення лапи просапного культиватора спрямоване на усунення двох типових недоліків стандартної лапи: підвищений тяговий опір через значну площу контакту з ґрунтом, налипання і забивання робочої поверхні то конструкція з долотоподібним стояком і натягнутим у горизонтальній площині струнним лезом забезпечує зменшення фронтальної площі взаємодії та забезпечує самоочищення за рахунок малого кута атаки леза.

Тяговий опір лапи культиватора можна задати, як суму складових від стояка і струнного леза з урахуванням швидкості:

$$` R = R_C + R_Л + R_V, \quad (1)$$

де R_C – опір стояка культиваторної лапи; $R_Л$ – опір струнного леза (поверхні різання); R_V – опір від зміни швидкості.

Для розгляду складових, що входять в рівняння (1), необхідно визначити геометрично-технологічні параметри, що впливають на процес роботи удосконаленої лапи просапного культиватора (рис. 2).

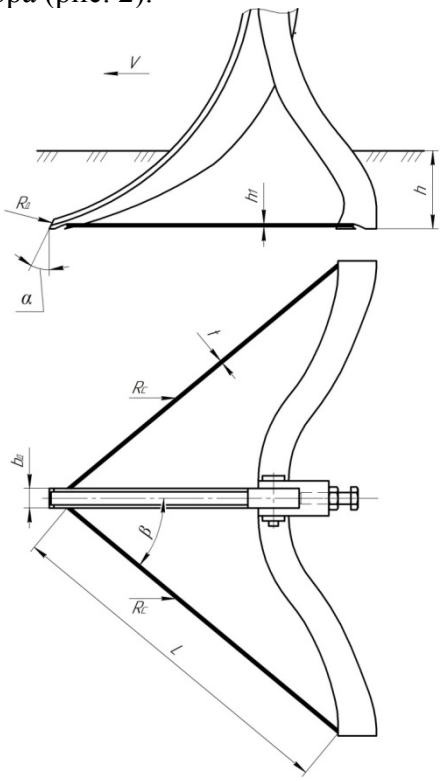


Рисунок 2 – Схема сил і геометричних параметрів удосконаленої лапи просапного культиватора
Джерело: розроблено авторами

В процесі роботи удосконаленої лапи культиватора на якість виконання технологічного процесу по догляду за просапними культурами мають вплив наступні параметри: h - глибина обробітку, м; V - швидкість руху лапи культиватора, м/с; ρ - щільність ґрунту, кг/м^3; c - питоме зчеплення, Па; φ - кут внутрішнього тертя, град; φ_1 - кут тертя ґрунту по сталі, град.

Також вплив здійснюють геометричні параметри лапи та величина натягу струни: $b_Д$ - ефективна ширина долота стояка (по різальній кромці), м; t - товщина струнного леза (діаметр струни), м; L - робоча довжина струни в ґрунті (розмах між пазами), м; β - кут атаки струни в горизонтальній площині, град; T - натяг струни, Н; t_1 - величина провисання струни, м.

Визначаємо складову опору R_C долотоподібного стояка. Оскільки, стояк виконує розпушення та частково формує зону руйнування ґрунту то для інженерного розрахунку приймемо клинову модель, аналогічну стандартним лапам, але з малою робочою шириною $b_Д$:

$$R_C = k_Д(\varphi, \varphi_1, \alpha) \cdot (c + \rho g h) \cdot b_Д h \,, \tag{2}$$

де α - ефективний кут атаки долота у вертикальній площині, град; g - сила тяжіння; $k_Д$ - узагальнюючий множник який враховує вплив геометрії долота і тертя (визначається підбором).

Для визначення складової опору $R_{Л}$, струнного сталевого леза при підрізанні в горизонтальній площині необхідно розглянути сам процес такої роботи. На відміну від звичайної лапи з суцільною полицею, струна має дуже малу товщину t, тому визначальним є не переміщення клину, а локальний зріз коренів та тонкий розріз ґрунту. Модель процесу можна представити, як суму опору різанню-зрізу, опору тертю та налипанню, а також від відхилення струни (провисання).

Введемо питомий опір різанню на одиницю довжини q_{c} (Н/м), що залежить від стану ґрунту та засміченості бур'янами. Тоді базова складова:

$$R_{Л,б} = q_{c} \cdot L \cos\beta . \tag{3}$$

Проекція $\cos\beta$ відображає, що при більшому β зростає частка поперечної роботи та зменшується поздовжня проекція на тягу. Фронтальна площа контакту струни з ґрунтом приблизно $S = th_{1}$ (на одиницю довжини), тому нормальне навантаження на струну можна оцінити як:

$$N_{Л} \approx k_{N} \cdot \left(c + \rho g h\right) \cdot th_{1} L , \tag{4}$$

де k_{N} - безрозмірний коефіцієнт, що враховує локальну концентрацію напружень біля тонкого леза.

Сила тертя по сталевому лезу:

$$R_{Л,f} = f \cdot N_{Л} \cos\beta , \tag{5}$$

де $f = tg\left(\varphi_{1}\right)$ - коефіцієнт тертя ґрунту по сталі.

Оскільки на робочий процес роботи лапи культиватора здійснює вплив натягу та провисання (самоочищення і стабілізація кута атаки) то його врахування є обов'язковим. Провисання збільшує ефективну товщину взаємодії (струна може збільшувати площу контакту і починати горнути ґрунт , а не підрізати), тому введемо поправку:

$$k_{f} = 1 + \chi \frac{t_{1}}{L}, \tag{6}$$

де $\chi \in \left[0,3\right]$ - емпіричний коефіцієнт.

Стрілу провисання для рівномірно навантаженої струни наближено можна оцінити як:

$$t_{1} = \frac{q_{r} L^{2}}{8T}, \tag{7}$$

де $q_{r} \approx k_{q} \cdot \left(c + \rho g h\right) \cdot th_{1}$ - розподілене навантаження ґрунту на струну, (Н/м); k_{q} - узагальнений коефіцієнт.

Тоді сумарна складова опору струни:

$$R_{Л} = k_{f} \left(R_{Л,б} + R_{Л,f}\right). \tag{8}$$

Конструкція лапи культиватора повинна забезпечувати самоочищення своєї робочої поверхні. Налипання зменшується, якщо струна працює з малим кутом атаки β, а тертя недостатнє для утримання частинок на поверхні, така ситуація відбувається якщо:

$$\beta < \varphi_{1} . \tag{9}$$

При роботі на підвищених швидкостях необхідно враховувати інерційний і швидкісний вплив, який пов'язаний з розгоном частинок і додатковим руйнуванням при зростанні V, можна записати як:

$$R_V = k_V \rho \cdot \left(b_Д h + th_1\right) \cdot V^2, \tag{10}$$

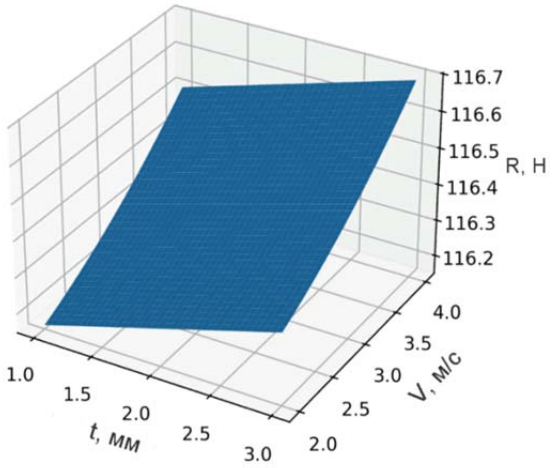
де k_V - коефіцієнт, що визначається експериментально.

Таким чином можна записати підсумкову залежність для визначення тягового опору лапи культиватора із сталевим струнним лезом:

$$\begin{aligned} R = &\left(k_Д\left(\varphi, \varphi_1, \alpha\right) \cdot \left(c + \rho g h\right) \cdot b_Д h\right) + \left(k_f\left(q_c \cdot L \cos\beta + f \cdot N_Л \cos\beta\right)\right) + \\ &+ \left(k_V \rho \cdot \left(b_Д h + th_1\right) \cdot V^2\right) \end{aligned}. \tag{11}$$

Залежність (11) дозволяє теоретично аналізувати, як конструктивні параметри лапи просапного культиватора та властивості ґрунту впливають на її тяговий опір. На основі підстановки розрахункових конструктивних параметрів розробленої лапи просапного культиватора та умов її експлуатації (фізико-механічні характеристики ґрунту під час догляду за посівами просапних культур [6-8,16-18]) було визначено теоретичні закономірності зміни тягового опору залежно від впливу базових робочих елементів (рис. 3-6).

Вплив товщини струнного леза та швидкості руху на тяговий опір лапи просапного культиватора наведений на (рис. 3). Аналіз отриманих результатів показує, що збільшення діаметра струни призводить до зростання тягового опору робочого органу. Це пояснюється збільшенням площі контакту леза з ґрунтом та, відповідно, зростанням сил тертя і деформації ґрунтового шару. В досліджуваному діапазоні значень збільшення діаметра струни з 1 до 3 мм спричиняє підвищення тягового опору приблизно на 0,4 - 0,5 Н. Отримана залежність має майже лінійний характер. Водночас істотніший вплив на величину тягового опору має швидкість руху агрегату. При збільшенні швидкості від 2 до 4 м/с тяговий опір зростає приблизно на 0,5 - 0,6 Н, що пов'язано зі збільшенням інерційних навантажень та інтенсивності руйнування ґрунтового шару. Отримані результати свідчать, що використання струнного леза малого діаметра є доцільним з точки зору зниження енергетичних витрат технологічного процесу.

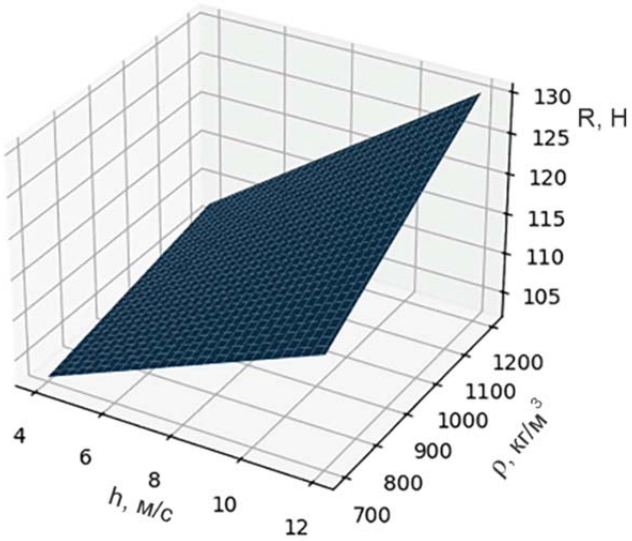


$q_c = 300\,Н/м$; $b_Д = 2\,см$; $h = 8\,см$; $\rho = 0{,}9$ г/см^3; $\beta = 30°$; $V = 4\,м/с$

Рисунок 3 – Залежність впливу товщини струнного леза t та швидкості руху на V тяговий опір лапи просапного культиватора

Джерело: розроблено авторами

Залежність тягового опору від глибини обробітку і щільності ґрунту наведена на (рис. 4). Отримана поверхня відгуку характеризує зміну тягового опору лапи культиватора залежно від глибини обробітку та щільності ґрунту.



$q_c = 300\ Н/м$; $b_Д = 2\ см$; $t = 2\ мм$; $\beta = 30°$; $V = 4\ м/с$

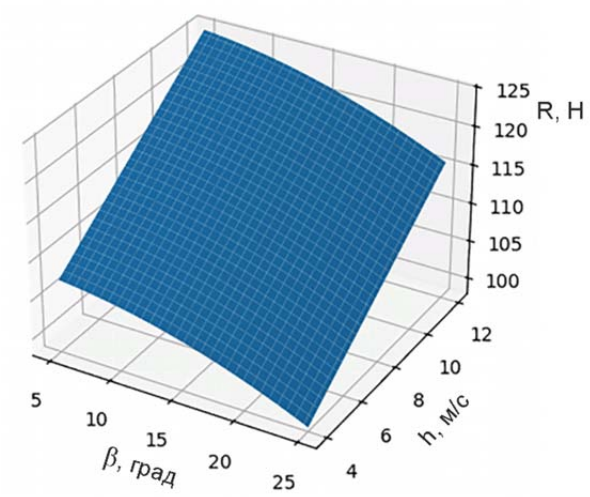
Рисунок 4 – Залежність тягового опору лапи від глибини обробітку h і щільності ґрунту ρ
Джерело: розроблено авторами

Аналіз (рис. 4) показує, що обидва фактори мають монотонний зростаючий вплив на величину тягового опору. При збільшенні глибини обробітку від 4 до 12 см тяговий опір зростає до 22Н. Це пояснюється тим, що зі збільшенням глибини обробітку зростає об'єм ґрунту, який піддається деформації, збільшується площа контакту робочого органу з ґрунтом, підвищується сила тертя по робочих поверхнях.

Щільність ґрунту також істотно впливає на величину тягового опору. При її збільшенні з 700 до 1200 кг/м³ тяговий опір зростає приблизно на 15 - 20 Н. Форма отриманої поверхні близька до площини, що свідчить про майже лінійний характер залежності. Таким чином, Найбільший вплив на тяговий опір має глибина обробітку, тоді, як щільність ґрунту виступає другим за значущістю фактором.

Залежність тягового опору від кута атаки β і глибини обробітку наведена на (рис.5). Отримана поверхня показує сумісний вплив кута атаки струнного леза β та глибини обробітку h на тяговий опір лапи просапного культиватора. Із (рис. 5) видно, що зі збільшенням глибини обробітку тяговий опір закономірно зростає, а збільшення кута атаки β призводить до поступового зменшення тягового опору. Це пояснюється тим, що при збільшенні кута атаки β змінюється напрямок дії сили різання, зменшується поздовжня складова сили опору, а також частина енергії витрачається на поперечне руйнування ґрунту.

В діапазоні, що досліджувався $\beta = 5 - 25°$, тяговий опір зменшується приблизно на 6 - 8 Н. При цьому глибина обробітку залишається основним фактором, який формує загальний рівень навантаження на робочий орган. Таким чином можна сказати, що збільшення кута атаки струнного леза сприяє зменшенню тягового опору, особливо при більших глибинах обробітку, раціональним значенням можна вважати діапазон $\beta = 20 - 30°$.



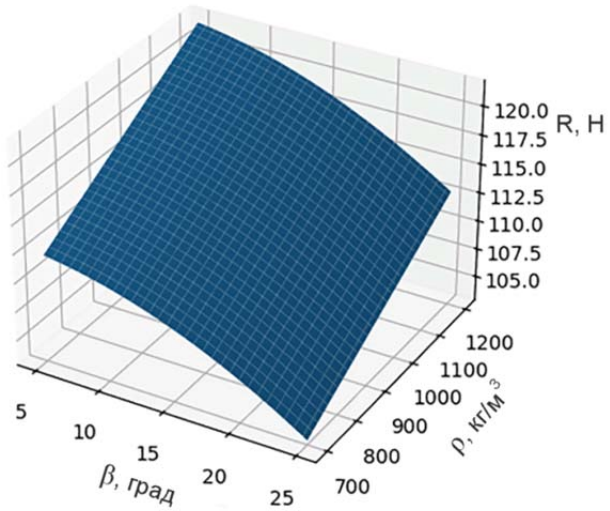
$q_c = 300\ Н/м$; $b_Д = 2\ см$; $t = 2\ мм$; $\beta = 30°$; $V = 4\ м/с$

Рисунок 5 – Залежність тягового опору лапи від кута атаки β і глибини обробітку h

Джерело: розроблено авторами

Залежність тягового опору від кута атаки β і щільності ґрунту ρ наведена на (рис. 6), і відображує зміну тягового опору при варіюванні кута атаки струнного леза та щільності ґрунту на глибині обробки. Аналіз (рис. 6) показує, що при збільшенні щільності ґрунту з 700 до 1200 кг/м³ тяговий опір зростає приблизно на 12 - 15 Н. Це пов'язано зі збільшенням опору деформації та руйнування ґрунтового масиву. При збільшенні кута атаки β тяговий опір зменшується, що підтверджує попередні результати моделювання. При збільшенні кута атаки від 5 до 25° величина тягового опору зменшується приблизно на 5 - 7 Н.

Форма поверхні має похилу криволінійну форму, що свідчить про сумісний вплив двох факторів на енергетичні показники роботи лапи. Щільність ґрунту істотно підвищує тяговий опір, однак збільшення кута атаки робочого органу частково компенсує цей вплив.



$q_c = 300\ Н/м$; $b_Д = 2\ см$; $t = 2\ мм$; $h = 8\ см$; $V = 4\ м/с$

Рисунок 6 – Залежність тягового опору лапи від кута атаки β і щільності ґрунту ρ

Джерело: розроблено авторами

Побудовані графіки (рис. 3-6) дозволили встановити основні закономірності формування тягового опору удосконаленої лапи просапного культиватора. Встановлено, що найбільший вплив на тяговий опір має глибина обробітку, значний вплив має щільність ґрунту, кут атаки струнного леза дозволяє зменшити тяговий опір, а оптимізація кута атаки може частково компенсувати вплив несприятливих ґрунтових умов. Раціональний діапазон кута атаки для забезпечення мінімального тягового опору становить $\beta = 20 - 30°$.

Таким чином, можна стверджувати, що запропонована конструкція лапи культиватора із сталевим струнним лезом може забезпечити якісний міжрядний обробіток ґрунту під час догляду за посівами просапних культур. Але для визначення точних раціональних значень основних конструктивних параметрів лапи просапного культиватора, які впливають на процес міжрядкового обробітку ґрунту потрібні додаткові експериментальні дослідження.

Висновки.

1. В результаті проведених досліджень, спрямованих на оцінку роботи удосконаленої лапи просапного культиватора із струнним сталевим лезом, була розроблена математична модель для визначення її тягового опору, яка враховує сумарний вплив опору долотоподібного стояка, опору струнного сталевого леза та швидкісної складової, що виникає під час руху робочого органу в ґрунті.

2. Встановлено, що найбільший вплив на тяговий опір удосконаленої лапи культиватора має глибина обробітку та щільність ґрунту. Зі збільшенням глибини обробітку до 12 см та щільності ґрунту 1200 кг/м³ спостерігається закономірне зростання тягового опору, що пов’язано зі збільшенням об’єму ґрунту, який піддається деформації та руйнуванню.

3. Дослідження впливу конструктивних параметрів показало, що збільшення кута атаки струнного леза сприяє зменшенню тягового опору, тоді як збільшення діаметра струни призводить до його незначного зростання внаслідок підвищення площі контакту з ґрунтом та сил тертя.

4. На основі проведеного математичного моделювання визначено раціональні параметри роботи удосконаленої лапи культиватора: глибина обробітку до 8 см, кут атаки струнного леза 20 - 30°, діаметр струни 1,5–2,0 мм та швидкість руху агрегату 3 - 4 м/с, при яких забезпечується мінімальний тяговий опір та енергоефективне виконання технологічного процесу міжрядного обробітку ґрунту.

5. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та удосконаленні робочих органів просапних культиваторів, а також для обґрунтування їхніх конструктивних параметрів і режимів роботи.

Список літератури

1 Козаченко О.В., Шкрегаль О.М.Дослідження конструкцій і режимів роботи робочих органів культиваторів . *Техніка і енергетика АПК: Науковий вісник НУБіП України*. Київ: НУБіП, 2010. Вип. 144, ч. 4. С. 122-127.

2 Козаченко О.В., Шкрегаль О.М., Каденко В.С. Зміна форми леза ґрунтообробних знарядь при зношуванні . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб*. 2015. Вип. 45, ч. І. С.21-26.

3 Пугач А.М. Обґрунтування параметрів культиваторних лап, оснащених елементами локального зміцнення: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11 / Вінниця, 2010. 20с.

4 Шкрегаль О.М. Обґрунтування параметрів процесу і енергозберігаючих робочих органів культиваторів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11 / Харків, 2011. 19с.

5 Алфьоров О.І., Антощенков Р.В., Юр’єва Г.П. Експериментальне дослідження коливань робочих органів культиватора на пружній стійці. *Machinery & Energetics. Journal of Production Research.* 2019. Vol.9. № 2. P. 129–132.

6 Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Кн. 1: Машини для рільництва; за заг. ред. М.І. Черновола. Київ: Урожай, 2001. 384 с.
7 Сільськогосподарські машини. Основи теорії і розрахунку: підручник / Д.Г.Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2005. С. 95-106. URL: https://studfiles.net/preview/5063474/page:25/.
8 Шмат С.І., Лузан П.Г., Сало В.М. Оригінальні способи і засоби обробітку ґрунту та сівби сільськогосподарських культур: навч. посіб. Харків: Мачулін, 2018. 236 с.
9 Hoseinian, Hasan & Hemmat, Abbas & Esehagh Beygi, Ali & Shahgoli, Gholamhossein & Baghbanan, Alireza. (2021). Development of a dual sideway-share subsurface tillage implement: Part 2. Effect of tool geometry on tillage forces and soil disturbance. Soil and Tillage Research. 215. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105200.
10 Fielke, J.M. Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil. Journal of Agricultural Engineering Research, 74, (1999), 91–101. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0440
11 Tamás, Kornél. (2024). Modelling the interaction of soil with a passively-vibrating sweep using the discrete element method. Biosystems Engineering. 245. 199–222. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.06.006.
12 R.L. Kushwaha, C. Linke. Draft-speed relationship of simple tillage tools at high operating speeds. Soil and Tillage Research. Volume 39, Issues 1–2, 15 November 1996, Pages 61-73. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01052-5
13 Tekeste, Mehari & Balvanz, Loran & Salim, Firas & Boesenberg, Adam & Hatfield, Jerry. (2021). Hardened Edges Effects On Wear Characteristics of Cultivator Sweeps Using Circular Soil Bin Test. Journal of Tribology. 144. https://doi.org/10.1115/1.4050805.
14 Ucgul, Mustafa, John M. Fielke and Chris Saunders. "Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling." Information Processing in Agriculture 2 (2015): 130-141. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.001
15 Патент України № 161655. Дейкун В.А, Артеменко Д.Ю., Москальченко Р.В., Жук Д.Г. Лапа просапного культиватора. МПК A01B 15/00 (2025.01). № u 202501026/UA; Заявл. 10.03.2025; Опубл. 24.12.2025, Бюл.№ 52. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891974/
16 Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / О. М. Царенко, Д. Г. Войтюк, В. М. Швайко та ін. Київ: Мета, 2003. 448 с
17 Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навчальний посібник / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2022. 220 с.
18 Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Том 1. Частина 1. Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. Харків: Око, 2001. 443 с.

References

1. Kozachenko O.V., Shkrehal O.M. (2010). Research on the designs and operating modes of cultivator working bodies. *Engineering and Energy of the Agricultural Complex: Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine*. Kyiv: NUBiP 144, v. 4. P. 122-127. [in Ukrainian].
2. Kozachenko O.V., Shkrehal O.M., Kadenko V.S. (2015). Change in the shape of the blade of tillage tools during wear. *Design, production and operation of agricultural machinery, National Interdepartmental Scientific and Technical Collection. Is. 45*, Part I. Kirovograd: KNTU. P. 21-26. [in Ukrainian].
3. Puhach A.M. (2010). Justification of the parameters of cultivator tines equipped with local strengthening elements: author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.05.11 – Vinnytsia. 20p. [in Ukrainian].
4. Shkrehal O.M. (2011). Justification of process parameters and energy-saving working bodies of cultivators: author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.05.11. Kharkiv. 19p. [in Ukrainian].
5. Alforov O.I., Antoshchenkov R.V., Yurieva H.P. (2019). Experimental study of vibrations of the cultivator's working parts on an elastic stand. *Machinery & Energetics. Journal of Production Research*. Kyiv. Ukraine. Vol.9. № 2. P. 129–132. [in Ukrainian].
6. Sysolin, P.V., Salo, V.M., & Kropivnyi, V.M. (2001). *Agricultural machines: theoretical bases, design, construction. Book 1: Machines for tillage.* M.I. Chernovol (Ed.). Kyiv: Urozhai. [in Ukrainian].
7. Voitiuk, D.H., Baranovskyi, V.M., Bulhakov, V.M., et al. (2005). *Agricultural machines. Fundamentals of theory and calculation: textbook.* (pp. 95-106). D.H. Voitiuk (Ed.). Kyiv: Vyshcha osvita. https://studfiles.net/preview/5063474/page:25/ [in Ukrainian].
8. Shmat, S.I., Luzan, P.H., & Salo, V.M. (2018). *Original methods and means of tillage and sowing of agricultural crops: textbook.* Kharkiv: Machulin. [in Ukrainian].
9. Hoseinian, Hasan & Hemmat, Abbas & Esehagh Beygi, Ali & Shahgoli, Gholamhossein & Baghbanan, Alireza. (2021). Development of a dual sideway-share subsurface tillage implement: Part 2. Effect of tool

geometry on tillage forces and soil disturbance. *Soil and Tillage Research. 215.* https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105200.
10. Fielke, J.M. Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil. *Journal of Agricultural Engineering Research, 74*, (1999), 91–101. https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0440
11. Tamás, Kornél. (2024). Modelling the interaction of soil with a passively-vibrating sweep using the discrete element method. *Biosystems Engineering. 245*. 199–222. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.06.006.
12. R.L. Kushwaha, C. Linke. Draft-speed relationship of simple tillage tools at high operating speeds. *Soil and Tillage Research. Volume 39*, Issues 1–2, 15 November 1996, Pages 61-73. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01052-5
13. Tekeste, Mehari & Balvanz, Loran & Salim, Firas & Boesenberg, Adam & Hatfield, Jerry. (2021). Hardened Edges Effects On Wear Characteristics of Cultivator Sweeps Using Circular Soil Bin Test. *Journal of Tribology. 144*. https://doi.org/10.1115/1.4050805.
14. Ucgul, Mustafa, John M. Fielke and Chris Saunders. "Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling." *Information Processing in Agriculture 2 (2015)*: 130-141. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.001
15. Patent of Ukraine № 161655. (2025). Deikun V.A, Artemenko D.Iu., Moskalchenko R.V., Zhuk D.H. Tiller cultivator paw. MPK A01B 15/00 (2025.01). № u 202501026/UA; Bull. No. 52. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891974/
16. Tsarenko, O.M., Voitiuk, D.H., & Shvaiko, V.M. (2003). *Mechanical and technological properties of agricultural materials: textbook.* Kyiv: Meta. [in Ukrainian].
17. Salo, V., Leshchenko, S., Luzan, P., & Salo, L. (2022). *Machines for sowing, planting and crop care: textbook.* Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
18. Zaika, P.M. (2001). *Theory of agricultural machines. Vol. 1, Part 1. Machines and tools for soil cultivation.* Kharkiv: Oko. [in Ukrainian].

Viktor Deikun, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Artemenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Moskalchenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Justification of the desigN of the Paw of a Row-Row Cultivator with a Replaceable String Blade

The paper considers the issue of increasing the efficiency of the working bodies of row-type cultivators by improving the design of the cultivator paw. The features of the interaction of the cultivator working bodies with the soil environment are analyzed and the main factors that affect the magnitude of the traction resistance during inter-row tillage are determined. The design of the row-type cultivator paw with a chisel-shaped riser and a string steel blade stretched in a horizontal plane is proposed. This design provides a reduction in the contact area of the working body with the soil and improves the conditions for self-cleaning of the working surface.

To assess the energy performance of the improved working body, a mathematical model for determining the traction resistance of the cultivator paw has been developed. The model takes into account the total effect of the resistance of the chisel-shaped riser, the resistance of the string steel blade, as well as the speed component that arises during the movement of the working body in the soil. Based on the proposed model, mathematical modeling of the paw operation process was carried out and the influence of the main design and technological parameters on the value of traction resistance was studied. An analysis of the dependence of traction resistance on the depth of cultivation, soil density, angle of attack of the string blade, thickness of the string and speed of movement of the unit was performed. According to the results of calculations, graphical dependencies were constructed that characterize the change in traction resistance in the studied ranges of parameters. It was established that the greatest influence on the value of traction resistance is exerted by the depth of cultivation and soil density, while an increase in the angle of attack of the string blade contributes to a decrease in the resistance of the working body.

Based on the conducted studies, rational design parameters and operating modes of the improved cultivator paw were determined, which ensure a decrease in the energy costs of the technological process. The results obtained can be used in the design and improvement of the working bodies of soil tillage machines for inter-row cultivation of row crops.

row cultivator, cultivator paw, crop care, inter-row cultivation

Одержано (Received) 26.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 631.171:621:004.89 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).99-115

А. М. Тригуба, проф., д-р техн. наук, **О. І. Фількін, М. П. Коциловський**
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна
e-mail: trianamik@gmail.com, filkin.orest@gmail.com, kotsylovskyimp@lnup.edu.ua
Н. Я. Коваль, д-р філос.
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
e-mail: kovaln870@gmail.com

Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту

Метою статті є розробка моделі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту. Основну увагу приділено формуванню адаптивних технічних рішень для функціонування обладнання в умовах цифровізації аграрного виробництва, коли визначення раціональних параметрів технологічних систем враховує мінливість виробничих умов, енергетичних навантажень, режимів використання та поточного технічного стану обладнання. У межах дослідження побудовано функціональну схему використання даних кіберфізичних систем, яка охоплює фізичний рівень функціонування обладнання, сенсорний рівень збору параметрів, рівень контролерів, модулі передачі даних, аналітичний блок і підсистему прийняття рішень. Запропонована модель обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва базується на формуванні інформаційної бази параметрів роботи обладнання, що включає технологічні, енергетичні, конструктивні та експлуатаційні характеристики. На основі цих даних формується вектор ознак, який надходить до інтелектуального модуля оцінювання, де використано поєднання багатошарової нейронної мережі, алгоритму XGBoost та нечіткої логіки для визначення раціональних параметрів обладнання. У комп'ютерній реалізації модель формалізується у вигляді послідовності етапів – нормалізація даних, формування інтегрального критерію ефективності, прогнозування робочих параметрів і адаптивне коригування режимів функціонування. Практичну перевірку моделі виконано в умовах ТзОВ «Інтелектуальні вендингові системи» із використанням дослідного зразка автоматизованої установки під час миття трактора John Deere 8320R. Отримані результати підтвердили зниження витрат води, електроенергії та тривалості технологічного циклу за одночасного підвищення стабільності роботи обладнання. Запропонована модель створює основу для переходу від статичного обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва до інтелектуального, що відповідає принципам Індустрії 4.0 та сучасного машинобудування.
кіберфізична система, обладнання, аграрне виробництво, конструктивно-технологічні параметри, обчислювальний інтелект, інтелектуальне моделювання, цифровізація виробництва

Постановка проблеми. Підвищення ефективності функціонування обладнання аграрного виробництва є одним із визначальних напрямів сучасного розвитку галузевого машинобудування в умовах цифрової трансформації виробничих процесів [1, 2, 3]. У сучасних технологічних системах аграрного виробництва зростають вимоги не лише до продуктивності технічних засобів, а й до їхньої здатності працювати в умовах змінного навантаження, мінливих виробничих умов та жорстких обмежень щодо споживання енергетичних ресурсів. Особливо це стосується обладнання, яке безпосередньо пов'язане з технологічними процесами миття техніки, енергозабезпечення виробничих процесів,

© А. М. Тригуба, О. І. Фількін, М. П. Коциловський, Н. Я. Коваль, 2026

підготовки сировини та підтримання функціонування виробничої інфраструктури, де навіть незначне відхилення конструктивних параметрів або режимів використання обладнання призводить до зниження загальної ефективності виробництва.

На практиці у аграрному виробництві значна частина обладнання продовжує експлуатуватися за параметрами, що визначалися на етапі проєктування без урахування мінливості виробничих умов [3, 5, 6]. При цьому реальні режими роботи обладнання досить часто істотно відрізняються від нормативних, оскільки на них впливають сезонні зміни, коливання навантаження, різна інтенсивність використання технічних систем, а також відмінності у характеристиках сировини чи технологічного середовища. За таких умов традиційні методи розрахунку конструктивно-технологічних параметрів втрачають достатню точність, оскільки не враховують постійне оновлення інформації про стан обладнання та його фактичну поведінку під час експлуатації.

У зв’язку з цим особливого значення набуває використання кіберфізичних систем, які дозволяють поєднати фізичні технічні засоби з цифровими модулями збору, передавання та аналізу даних [7, 8, 9]. Сенсорні елементи, інтегровані у структуру обладнання, забезпечують постійне надходження інформації про режими його роботи, енергетичні витрати, температурні характеристики, навантаження окремих вузлів та інші параметри, що забезпечують оцінення реального стану функціонування технічної системи. Така інформація забезпечує перехід від статичного проєктування до адаптивного обґрунтування параметрів обладнання в умовах реальних виробничих умов його експлуатації.

Разом із цим сам по собі збір великого обсягу технологічних даних не забезпечує автоматичного підвищення ефективності, якщо відсутній інструментарій їхньої глибокої інтерпретації. Саме тому в сучасних дослідженнях дедалі активніше використовуються методи обчислювального інтелекту, які дозволяють виявляти приховані закономірності між параметрами функціонування обладнання, прогнозувати зміну його режимів роботи та формувати рекомендації щодо вибору раціональних конструктивних характеристик [10, 11]. Використання нейромережевих моделей, адаптивних алгоритмів прогнозування та методів багатофакторного аналізу лежить в основі визначення таких параметрів обладнання, які забезпечують не лише технологічну ефективність, а й стабільність функціонування в умовах мінливих виробничих умов.

Проблема полягає в тому, що більшість існуючих технічних рішень у галузі аграрного машинобудування переважно орієнтована на нормативні або середньостатистичні умови функціонування, без урахування реальних даних отриманих під час експлуатації обладнання. У результаті параметри машин і технологічних установок часто визначаються із запасом або, навпаки, без необхідної адаптації до конкретного виробничого середовища, що призводить до перевитрат енергії, нерівномірного завантаження вузлів та скорочення ресурсу роботи обладнання.

У зв’язку з цим виникає науково-практична задача, яка полягає у створенні моделі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі інтеграції даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту. Така модель дозволяє сформувати новий рівень технічного супроводу аграрного виробництва, у якому конструктивні рішення приймаються не лише на етапі проєктування обладнання, але й постійно уточняються відповідно до поточних умов експлуатації, що відповідає сучасним вимогам цифровізації, адаптивного управління та ресурсоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років у галузі аграрного машинобудування суттєво зростає інтерес до використання кіберфізичних

систем як основи для адаптивного управління технічними процесами та обґрунтування параметрів обладнання в умовах мінливого виробничого середовища. У сучасних дослідженнях зазначається, що інтеграція сенсорних модулів, цифрового збору даних і аналітичних алгоритмів дає змогу оперативно оцінювати режими функціонування технічних систем та формувати рішення щодо їхнього налаштування залежно від поточного навантаження і зовнішніх умов [12].

Розвиток кіберфізичних систем, які використовуються у сільському господарстві, трансформував підходи до управління виробничими процесами. Це пов'язано із тим, що дані надходять від технічних об'єктів у реальному часі і вони є основою для побудови цифрових моделей функціонування обладнання. У роботі [13, 14, 15, 16] показано, що використання цифрових двійників і сенсорних платформ у розумному сільському господарстві дозволяє підвищити точність контролю технологічних процесів та скоротити витрати ресурсів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із застосуванням методів обчислювального інтелекту для прогнозування параметрів технічних систем. Зокрема, у роботах [17, 18] наголошується, що машинне навчання дозволяє виявляти залежності між енергоспоживанням, навантаженням обладнання та зміною технологічних режимів, що створює передумови для адаптивного вибору конструктивних характеристик технічних засобів.

У машинобудівних дослідженнях останніх років значна увага приділяється інтеграції сенсорних даних із моделями прогнозування технічного стану обладнання. Разом із тим, більшість наявних рішень орієнтована на окремі автоматизовані процеси, тоді як питання комплексного використання даних кіберфізичних систем для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва залишається недостатньо дослідженим [19]. Саме це визначає потребу у розробці моделей, у яких поєднуються дані моніторингу, адаптивне прогнозування та технічне проєктування.

Таблиця 1 – Основні напрями сучасних досліджень у сфері кіберфізичних систем та інтелектуального обґрунтування параметрів обладнання

Напрям дослідження	Основний зміст	Джерело
Кіберфізичні системи в аграрному виробництві	Інтеграція сенсорних мереж, IoT-платформ і цифрового контролю виробничих процесів	[12, 13, 19]
Цифрові двійники технічних систем	Побудова цифрових моделей функціонування обладнання в реальному часі	[12, 20]
Машинне навчання в аграрній інженерії	Прогнозування режимів роботи технічних систем і виробничих параметрів	[17, 21]
Енергетичне моделювання обладнання	Оптимізація енергоспоживання та аналіз навантаження технічних систем	[18, 22]
Інтелектуальна оптимізація параметрів обладнання	Використання аналітичних моделей для вибору конструктивних характеристик	[21, 23]
Сенсорний моніторинг технічного стану	Збір даних про температурні режими, навантаження і витрати ресурсів	[12, 24]

Джерело: розроблено авторами

Аналіз таблиці 1 показує, що найбільш активно розвиваються наукові напрями, пов'язані з цифровим моніторингом виробничих процесів, використанням сенсорних платформ та інтеграцією методів машинного навчання у технічні системи аграрного виробництва. Переважна частина сучасних досліджень зосереджена на створенні

цифрових моделей функціонування обладнання та прогнозуванні його режимів роботи на основі даних, що надходять у реальному часі. Разом із тим, більшість існуючих підходів орієнтована на окремі компоненти технічних систем без достатнього врахування взаємозв'язку між конструктивними параметрами обладнання, експлуатаційними режимами та сенсорною інформацією. Це зумовлює потребу у розробці моделі, яка дозволить комплексно використовувати дані кіберфізичних систем і методи обчислювального інтелекту для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва з урахуванням умов реальної його експлуатації.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка моделі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту. У основі запропонованої моделі використано підхід, орієнтований на формування адаптивних технічних рішень для функціонування обладнання в умовах цифровізації аграрного виробництва, коли визначення раціональних параметрів технологічних систем враховує мінливість виробничих умов, енергетичних навантажень, режимів використання та поточного технічного стану обладнання. Використання даних, що надходять від сенсорних модулів, систем контролю та цифрових каналів моніторингу, створює передумови для переходу від традиційних розрахункових підходів до динамічного інтелектуального обґрунтування параметрів технічних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити два завдання:

– розробити функціональну схему використання даних кіберфізичних систем для формування інформаційної бази визначення конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва з урахуванням взаємодії сенсорних елементів, виконавчих механізмів, контролерів та модулів збору інформації про особливості функціонування обладнання;

– запропонувати модель обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту та виконати її перевірку.

Реалізація поставлених завдань дозволить підвищити точність визначення параметрів технічних систем, забезпечити адаптивність функціонування обладнання до реальних умов експлуатації та створити основу для підвищення енергоефективності технологічних процесів аграрного виробництва.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розвитку технічних систем аграрного виробництва обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання вже не може базуватися виключно на статичних довідкових характеристиках або нормативно закладених режимах експлуатації. Практика функціонування аграрних машин і технологічних установок показує, що навіть за однакової конструктивної схеми фактична ефективність роботи обладнання суттєво змінюється під впливом режимів навантаження, виробничих умов, інтенсивності використання, тривалості циклу та енергетичних коливань. Саме тому формування інформаційної бази параметрів пропонується здійснювати через інтеграцію даних кіберфізичних систем, які забезпечують безперервне надходження фактичної інформації про функціонування технічного об'єкта.

Функціональна схема використання даних кіберфізичних систем для формування інформаційної бази визначення конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва (рис. 1**)**, відображає послідовність переходу від фізичного рівня роботи обладнання до формування інформаційної бази із їхніми параметрами, яка у подальшому аналітично опрацьовується. У схеми центральне місце займає обладнання аграрного виробництва. Це пояснюється тим, що саме воно виступає джерелом первинної технічної інформації, що формується у процесі роботи

обладнання. Сенсорні елементи реєструють температуру, тиск, навантаження, витрати ресурсів, рівень вібрацій та швидкість функціонування (виконання окремих операцій). Одночасно виконавчі механізми забезпечують реалізацію керувальних впливів, які формуються контролерами після аналізу поточного стану системи.



Рисунок 1 – Функціональна схема використання даних кіберфізичних систем для формування інформаційної бази визначення конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва

Джерело: розроблено авторами

Особливістю наведеної схеми (рис. 1) є те, що первинна інформація не використовується безпосередньо для прийняття рішень, а проходить кілька послідовних етапів оброблення. Контролери та вбудовані обчислювальні модулі виконують первинну фільтрацію, синхронізацію та нормалізацію сигналів. Це особливо характерно для аграрного обладнання, де різні параметри надходять із різною частотою, а часові характеристики сенсорних сигналів істотно відрізняються.

Формування інтегрованого вектора вхідних параметрів описується:

$$X(t) = \{T(t), P(t), L(t), V(t), R(t), \tau(t)\}, \quad (1)$$

де $T(t)$ – температура у t-й момент часу; $P(t)$ – потужність споживання; $L(t)$ – рівень навантаження; $V(t)$ – швидкість функціонування; $R(t)$ – витрати ресурсів; $\tau(t)$ – тривалість технологічного циклу.

У реальних виробничих умовах ці параметри характеризуються неоднорідністю та високою варіативністю, тому після первинного збору інформації застосовується етап нормалізації:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (2)$$

де x_i^{norm} – нормалізоване значення i-го параметра, приведене до безрозмірного інтервалу [0;1]; x_i – фактичне виміряне значення параметра у поточний момент функціонування обладнання; x_{min} – мінімальне значення параметра у вибірці

спостережень або в межах допустимого технологічного діапазону; x_{max} – максимальне значення параметра у вибірці або у встановленому робочому інтервалі.

Нормалізований масив параметрів формує інформаційну базу, яка накопичується у вигляді часових рядів, журналів подій, режимів роботи та історії відхилень. Саме цей рівень (рис. 1) є базовим для подальшого створення аналітичного модуля, де здійснюється попередня обробка, виділення інформативних ознак і виявлення закономірностей функціонування.

Для оцінювання інформативності кожного параметра пропонується використовувати ентропійний підхід:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i, \tag{3}$$

де p_i – імовірність настання окремого стану параметра.

Формула (3) дозволяє кількісно визначити, які саме характеристики мають найбільший вплив на зміну технічного стану обладнання. На основі сформованої інформаційної бази створюється аналітичний модуль, який взаємодіє з моделями обчислювального інтелекту. У цьому випадку використання нейромережевих, регресійних або нечітких моделей дозволяє перейти від простого накопичення інформації до прогнозування раціональних параметрів обладнання.

Структура взаємозв'язків між конструктивними, технологічними та експлуатаційними параметрами обладнання аграрного виробництва наведена на рис. 2. На відміну від функціональної схеми формування даних, тут показано причинно-наслідковий механізм впливу окремих груп параметрів на результативні показники роботи обладнання.

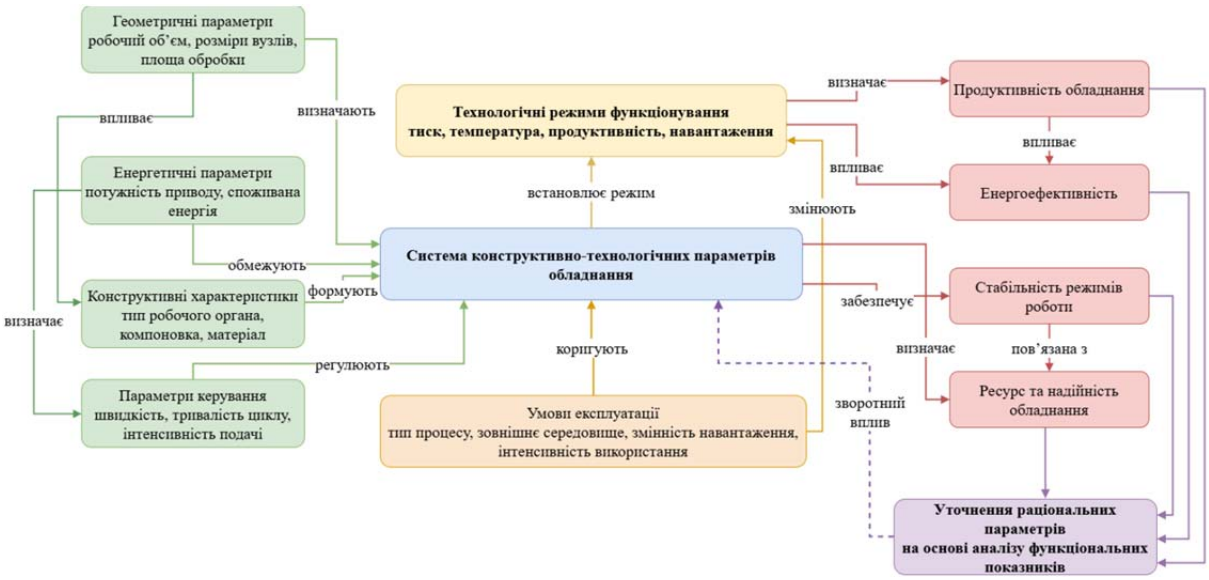


Рисунок 2 – Взаємозв'язок конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва

Джерело: розроблено авторами

Першою групою є геометричні параметри (робочий об'єм, розміри вузлів, площа обробки тощо). Саме вони задають фізичні межі продуктивності обладнання. Друга група охоплює енергетичні параметри (потужність приводу, рівень споживаної енергії, характер енергетичного навантаження тощо). Конструктивні характеристики, такі як тип робочого органу, компоновка вузлів і матеріал елементів, формують можливості адаптації обладнання до змін режимів його роботи.

Узагальнену функціональну залежність між цими групами параметрів описано функцією:

$$Q = f\left(G, E, C, U\right), \tag{4}$$

де G – геометричні параметри, E – енергетичні параметри, C – конструктивні характеристики, U – параметри керування.

Водночас, продуктивність обладнання залежить не лише від його конструкції, а й від технологічного режиму функціонування:

$$Q = \frac{V \cdot \eta}{\tau}, \tag{5}$$

де V – обсяг виконаної роботи, η – коефіцієнт енергоефективності, τ – тривалість циклу.

З рис. 2 видно, що технологічний режим функціонування формує проміжний вузол системи взаємозв'язків. Зокрема, через температуру, тиск, продуктивність і навантаження реалізується вплив конструктивних параметрів на кінцеві результати.

Для оцінювання стабільності режимів пропонується використовувати показник варіації:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100\%, \tag{6}$$

де σ – середньоквадратичне відхилення параметра; μ – середнє значення параметра.

Чим менше значення коефіцієнта CV, тим стабільніше функціонує обладнання за заданих конструктивних параметрів. Основні конструктивно-технологічні параметри, які підлягають подальшому обґрунтуванню, систематизовано і представлено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні конструктивно-технологічні параметри обладнання аграрного виробництва

Група параметрів	Основні характеристики	Функціональний вплив
Геометричні	Робочий об'єм, розміри вузлів, площа контакту	Формування продуктивності
Енергетичні	Потужність приводу, споживання енергії	Визначення енергоефективності
Конструктивні	Тип робочого органу, матеріал, компоновка	Стабільність функціонування
Режимні	Швидкість, тривалість циклу, тиск	Технологічна адаптація
Експлуатаційні	Інтенсивність використання, середовище	Надійність і ресурс

Джерело: розроблено авторами

На основі таблиці 2 встановлено, що конструктивно-технологічні параметри не існують окремо, а формують взаємопов'язану систему, у якій зміна одного показника неминуче впливає на інші показники.

Для комплексного оцінювання раціональності конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва, яке функціонує в умовах змінних технологічних режимів та різнорідних навантажень, доцільно використовувати інтегральний критерій, що дозволяє одночасно врахувати кілька основних характеристик ефективності роботи технічного обладнання:

$$I = \alpha_1 Q + \alpha_2 \eta + \alpha_3 S + \alpha_4 R, \tag{7}$$

де I – інтегральний показник комплексного оцінювання конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва; α_1 – ваговий коефіцієнт значущості продуктивності обладнання; α_2 – ваговий коефіцієнт значущості енергоефективності; α_3 – ваговий коефіцієнт значущості стабільності технологічного режиму; α_4 – ваговий коефіцієнт значущості ресурсу обладнання; Q – фактична продуктивність обладнання, що характеризує обсяг виконаної роботи за одиницю часу; η – коефіцієнт енергоефективності, який відображає співвідношення корисної роботи до витраченої енергії; S – показник стабільності функціонування, який характеризує рівномірність роботи обладнання без критичних коливань параметрів; R – ресурс обладнання, що визначає залишкову технічну придатність або довговічність вузлів у процесі експлуатації.

Застосування такого інтегрального критерію дозволяє перейти від оцінювання окремих технічних характеристик до узагальненого аналізу, у якому кожна складова враховується відповідно до її реального впливу на результат функціонування системи. У практиці аграрного виробництва це особливо важливо, оскільки підвищення лише одного параметра, наприклад продуктивності, не завжди забезпечує загальне покращення роботи обладнання, якщо одночасно зростають енергетичні витрати або знижується ресурс. Саме цей інтегральний показник стає основою для подальшого використання методів обчислювального інтелекту при визначенні раціональних конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва.

Схема моделі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту (рис. 3) відображає повний цикл переходу від первинного фізичного функціонування обладнання до формування раціональних параметрів його роботи в адаптивному режимі.

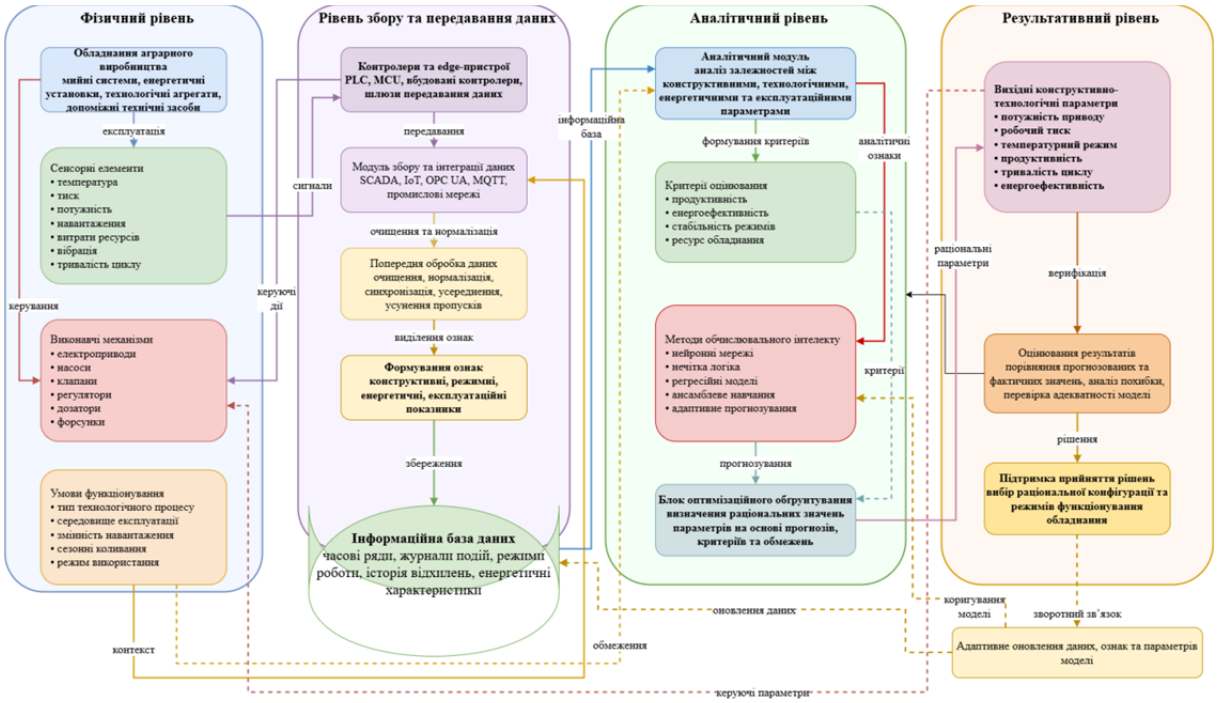


Рисунок 3 – Схема моделі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту

Джерело: розроблено авторами

Її принципова відмінність полягає у багаторівневій побудові, де кожен структурний блок виконує окрему функцію, але одночасно залишається інтегрованим у загальну систему безперервного зворотного зв'язку.

На фізичному рівні джерелом первинної інформації є обладнання аграрного виробництва (машини, енергетичні установки, технологічні агрегати та допоміжні технічні системи тощо). Саме на цьому рівні виникають усі процеси, які надалі підлягають цифровій інтерпретації. Сенсорні елементи реєструють температуру, тиск, потужність, навантаження, параметри ресурсу, вібрацію та швидкість виконання технологічного циклу. Паралельно виконавчі механізми реалізують регулювання через електроприводи, клапани, форсунки, дозатори або регулятори подачі. Умови функціонування технологічного процесу фіксуються через рівень зовнішнього середовища, інтенсивність використання, сезонні коливання навантаження, що формують змінний контекст, який безпосередньо впливає на поведінку системи.

У математичному вигляді стан фізичного рівня записується як багатовимірний вектор:

$$Z(t) = \{X(t), U(t), E(t)\}, \tag{8}$$

де $Z(t)$ – поточний стан обладнання; $X(t)$ – вектор сенсорних параметрів; $U(t)$ – керуючі дії виконавчих механізмів; $E(t)$ – зовнішні експлуатаційні умови.

На рівні збору та передавання даних контролери PLC, MCU та периферійні пристрої виконують первинну синхронізацію, нормалізацію та перевірку достовірності сигналів. У цьому блоці формується єдина інформаційна база, яка вже придатна до подальшої аналітичної інтерпретації. Особливість цього етапу полягає в інтеграції даних різної часової частоти, що є типовим для технічних систем аграрного виробництва. Для узгодження часових рядів використовується оператор згортки потоків даних:

$$D(t) = \int_{t-\Delta t}^{t} X(\tau) d\tau, \tag{9}$$

де $D(t)$ – агрегований інформаційний масив за часовий інтервал Δt.

У подальшому виконується формування ознак, які описують функціональний стан обладнання. У схемі (рис. 3) нами представлено як окремий блок формування ознак (конструктивних, режимних, енергетичних та експлуатаційних характеристик). На цьому етапі застосовується матриця ознак:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \text{L} & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \text{L} & f_{2m} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ f_{n1} & f_{n2} & \text{L} & f_{nm} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

де F – матриця інформативних ознак; n – кількість спостережень; m – кількість параметрів.

На аналітичному рівні здійснюється перехід від накопичення та структуризації інформації до інтелектуального оцінювання функціонального стану обладнання, де первинні дані вже розглядаються не як окремі технічні показники, а як взаємопов'язана система параметрів, що характеризує поведінку технологічного процесу в динаміці. Саме на цьому рівні сформована інформаційна база, яка містить часові ряди, журнали подій, режими роботи, енергетичні характеристики та історію відхилень, використовується для виявлення прихованих закономірностей функціонування обладнання та визначення тих параметрів, які найбільше впливають на зміну результативних характеристик.

Першим етапом аналітичного рівня є аналіз масиву даних із використанням статистичних, технологічних, енергетичних і часових характеристик. Це дозволяє перейти від прямого спостереження до оцінювання впливу параметрів на кінцеву ефективність роботи обладнання. При цьому оцінюється не лише середнє значення показників, а й характер їхніх коливань, наявність критичних відхилень, стійкість режимів та взаємний вплив окремих змінних. Для цього формується коваріаційна матриця параметрів:

$$C = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(X_k - \bar{X})(X_k - \bar{X})^T, \tag{10}$$

де C – матриця коваріацій між параметрами; X_k – вектор спостережень у k-й момент часу; $\bar{X}$ – середній вектор параметрів; n – кількість спостережень.

Застосування матриці (10) дозволяє визначити, які технічні характеристики обладнання змінюються узгоджено, а які мають незалежний характер впливу. Наприклад, зростання навантаження на обладнання супроводжується збільшенням енергоспоживання та температури, тоді як зміна швидкості його роботи не завжди прямо впливає на ресурс обладнання.

Наступним етапом є формування критеріїв оцінювання роботи обладнання, що у схемі (рис. 3) представлені як окремий блок, де враховуються продуктивність, енергоефективність, стабільність режиму та ресурс обладнання. Для того щоб оцінка була узгодженою, кожен критерій приводиться до безрозмірного вигляду через функцію відносної оцінки:

$$K_j = \frac{x_j}{x_j^{ref}}, \tag{11}$$

де K_j – відносний критерій оцінювання j-го параметра; x_j – фактичне значення показника; x_j^{ref} – еталонне або нормативне значення показника.

Після цього критерії інтегруються у багатофакторну систему оцінювання, яка передається до блоку методів обчислювального інтелекту.

На цьому ж аналітичному рівні виконується визначення чутливості системи до зміни окремих параметрів, що дозволяє встановити, які характеристики є визначальними при прогнозуванні раціонального режиму. Для цього використовується частинна похідна інтегрального критерію:

$$S_i = \frac{\partial I}{\partial x_i}, \tag{12}$$

де S_i – коефіцієнт чутливості інтегрального критерію до параметра x_i.

Якщо значення S_i є високим, це означає, що навіть незначна зміна параметра суттєво впливає на загальну ефективність роботи обладнання. У аграрному виробництві це особливо важливо для врахування навантаження, температурного режиму та енергетичних характеристик.

Після завершення статистичного оцінювання дані передаються до блоку методів обчислювального інтелекту, де нейромережеві (регресійні або нечіткі) моделі формують прогноз раціональних параметрів обладнання. Таким чином, аналітичний рівень фактично виконує роль інтелектуального ядра всієї моделі, оскільки саме тут формується перехід від фактичних даних до обґрунтованого технічного рішення.

Наступний блок передбачає використання методів обчислювального інтелекту (нейромережі, регресійні моделі, нечітку логіку та адаптивне прогнозування). Завдяки ньому формується прогноз раціональних параметрів обладнання через нелінійну функцію:

$$Y(t+1) = \Phi(W \cdot F(t) + b), \quad (13)$$

де $Y(t+1)$ – прогнозовані раціональні параметри обладнання; W – матриця ваг моделі; b – вектор зміщення; Φ – нелінійна функція перетворення.

На відміну від попередніх формул, ця модель вже працює як прогнозний інструмент, оскільки враховує часову зміну параметрів. Блок оптимізаційного обґрунтування у моделі виконує пошук найкращого варіанта параметрів обладнання на основі сформованих критеріїв. Для цього застосовується задача багатокритеріальної оптимізації:

$$\min_{u \in U} \left\{ \lambda_1 f_1(u) + \lambda_2 f_2(u) + \lambda_3 f_3(u) + \lambda_4 f_4(u) \right\}, \quad (14)$$

де $f_1(u)$ – критерій продуктивності обладнання; $f_2(u)$ – критерій енергоефективності обладнання; $f_3(u)$ – критерій стабільності роботи обладнання; $f_4(u)$ – критерій використаних ресурсів обладнанням; λ_i – коефіцієнти пріоритетності.

На результативному рівні модель формує конкретні раціональні параметри обладнання (продуктивність, тиск, температурний режим, тривалість циклу, енергоефективність тощо). Після цього запускається процедура перевірки крайових рішень, де здійснюється оцінювання результатів моделювання. Для перевірки відхилення прогнозованого режиму роботи обладнання від фактичного використовується похибка:

$$\varepsilon = \frac{|Y_{fact} - Y_{pred}|}{Y_{fact}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де ε – відносна похибка прогнозування, що характеризує ступінь відхилення розрахованого значення параметра від фактично зафіксованого в процесі роботи обладнання; Y_{fact} – фактичне значення параметра функціонування обладнання, отримане із сенсорної системи або за результатами реального вимірювання; Y_{pred} – прогнозоване значення параметра, визначене математичною моделлю або алгоритмом обчислювального інтелекту; $|Y_{fact} - Y_{pred}|$ – абсолютне відхилення між фактичним і прогнозованим значеннями параметра; 100% – коефіцієнт переходу до відсоткового представлення результату.

Застосування залежності (15) забезпечує кількісну оцінку адекватності розробленої моделі під час визначення раціональних параметрів обладнання аграрного виробництва. Якщо значення ε є незначним, це свідчить про високу відповідність між розрахунковими та фактичними характеристиками функціонування обладнання, а отже, і про достатню точність моделі для використання в умовах реального технологічного процесу.

У межах кіберфізичних систем така оцінка виконується після кожного циклу прогнозування, що дозволяє реалізувати механізм самокоригування параметрів моделі. У випадку збільшення похибки понад допустиме значення запускається процедура адаптивного оновлення вагових коефіцієнтів або повторного навчання алгоритму, завдяки чому підтримується стійкість прогнозування навіть за зміни навантажень, технологічних режимів чи енергетичних характеристик обладнання

У випадку перевищення допустимого порогу ε модель активує блок адаптивного оновлення даних, який через зворотний зв’язок повертає систему до аналітичного рівня. Саме ця частина моделі робить забезпечує не статичність, а можливість самонавчатися.

Таблиця 3 – Логіка функціонування рівнів моделі

Рівень моделі	Функціональне призначення	Вхідні дані	Методи оброблення	Результат функціонування
Фізичний рівень	Формування потоку первинних технологічних параметрів функціонування обладнання в режимі реального часу	Температура, тиск, витрата енергії, навантаження, швидкість обертання	Сенсорний моніторинг, первинна фільтрація сигналів, нормалізація	Масив первинних технічних сигналів
Рівень збору та інтеграції даних	Агрегація, синхронізація та структуризація інформаційних потоків	Первинні сигнали з датчиків, часові мітки, історичні записи	Бази даних, буферизація, часовий аналіз, цифрова синхронізація	Єдина інформаційна база для аналітичної обробки
Аналітичний рівень	Виявлення закономірностей функціонування системи та побудова прогнозних залежностей	Поточні й архівні параметри, виробничі режими	Регресійний аналіз, нейромережеве прогнозування, оцінювання похибки, ентропійний аналіз	Прогнозовані параметри, критерії відхилення, аналітичні індикатори
Інтелектуаль-ний рівень прийняття рішень	Визначення доцільних керуючих впливів залежно від стану технологічного процесу	Прогнозні показники, допустимі межі, цільові критерії	Алгоритми обчислювального інтелекту, нечітка логіка, адаптивна оптимізація	Управлінське рішення щодо корекції режиму
Результативний рівень	Формування раціональних параметрів функціонування обладнання	Управлінське рішення, обмеження технологічного процесу	Модуль адаптивного коригування параметрів	Раціональний режим роботи обладнання

Джерело: розроблено авторами

Запропонована багаторівнева модель обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту (рис. 3**)** відображає послідовний перехід від формування первинних технічних сигналів до інтелектуального визначення раціональних параметрів роботи обладнання в реальному часі. На відміну від традиційних підходів, у яких етапи збору даних, аналітичного оцінювання та прийняття рішень розглядаються окремо, у запропонованій моделі ці рівні інтегровані в єдину функціональну структуру, що забезпечує безперервний інформаційний зв’язок між фізичними параметрами процесу та результативним управлінським впливом. Новизна моделі полягає у введенні окремого аналітичного рівня, де поряд із класичним аналізом використовується прогнозне оцінювання конструктивно-технологічних параметрів обладнання із застосуванням методів обчислювального інтелекту. Це дає можливість враховувати мінливість виробничих

умов та відхилення технологічних режимів. Завдяки цьому модель орієнтована не лише на фіксацію поточного стану обладнання, а й на прогнозування його функціонування з подальшим формуванням адаптивного режиму роботи обладнання. Важливою особливістю запропонованої моделі є те, що кожен рівень формує завершений інформаційний результат, який використовується як вхід для наступного рівня, забезпечуючи системну узгодженість усієї моделі. Це створює передумови для підвищення точності визначення раціональних параметрів обладнання, зменшення енергетичних втрат та підвищення стійкості функціонування обладнання у мінливих виробничих умовах.

Апробацію запропонованої математичної моделі виконано в умовах ТзОВ «Інтелектуальні вендингові системи» (м. Львів). Як об’єкт дослідження використано дослідний зразок автоматизованої установки для миття сільськогосподарської техніки, який призначений для миття трактора John Deere 8320R після виконання польових робіт. Особливість цього обладнання полягає у поєднанні гідравлічної системи подачі мийного розчину, електромеханічного приводу насосної станції, вузла регулювання тиску, температурного контролю мийного середовища та цифрового блока керування, який дозволяє інтегрувати дані сенсорних елементів у єдину інформаційну систему [25]. Для моделювання використовували масив даних, отриманий під час 42 циклів миття техніки за різного ступеня забруднення після польових робіт. У ході експерименту фіксувалися температура мийного розчину, робочий тиск у системі, витрата води, електрична потужність насосної станції та тривалість повного циклу миття. Для інтелектуального аналізу використано багатошарову нейронну мережу прямого поширення (MLP), градієнтний бустинг XGBoost і нечітку логіку для адаптації вагових коефіцієнтів інтегрального критерію. Це дозволило сформувати раціональні режими миття залежно від фактичного рівня забруднення трактора та поточного навантаження насосної системи.

Таблиця 4 – Результати визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів мийної установки для миття трактора John Deere 8320R

Показник	Базове значення	Раціональне значення	Зміна показника, %
Діаметр форсунки, мм	1,6	1,4	-12,5
Кількість форсунок, од	10	12	+20,0
Кут розпилення, °	25	30	+20,0
Робочий тиск, МПа	11,2	9,8	-12,5
Температура мийного розчину, °С	54	49	-9,3
Витрата води, л/хв	21,6	18,4	-14,8
Потужність насосної системи, кВт	8,1	7,0	-13,6
Тривалість циклу миття, хв	19,6	16,8	-14,3

Джерело: розроблено авторами

Аналіз результатів наведених у таблиці 4 свідчить, що найбільш суттєвий вплив на ефективність миття поверхонь трактора John Deere 8320R має узгодження конструктивних параметрів форсункової системи з технологічним режимом подачі мийного розчину. Зменшення діаметра форсунки до 1,4 мм при одночасному збільшенні кількості форсунок до 12 одиниць дозволило сформувати рівномірніше покриття складних зон забруднення без збільшення загальної витрати води. Зміна кута розпилення до 30° забезпечила покращення охоплення поверхонь ходової частини та вузлів трансмісії, що дало можливість знизити робочий тиск на 12,5 % без втрати якості миття. Одночасно коригування температурного режиму до 49°С сприяло підвищенню ефективності розчинення органічних забруднень, унаслідок чого тривалість циклу миття скоротилася на 14,3 %.

Таким чином, використання запропонованої моделі дозволило перейти від традиційного встановлення режимів роботи мийної установки за фіксованими технологічними налаштуваннями до адаптивного визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів на основі фактичних даних кіберфізичної системи. Отримані результати показали, що узгоджене коригування конструктивних характеристик форсункової системи, параметрів подачі мийного розчину, температурного режиму та енергетичного навантаження насосного обладнання забезпечує підвищення продуктивності миття техніки, скорочення тривалості технологічного циклу та зменшення витрат ресурсів без зниження якості миття техніки.

Висновки.

1. У результаті виконаного дослідження досягнуто поставлену мету щодо розробки моделі обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва на основі даних кіберфізичних систем та методів обчислювального інтелекту. Запропонована модель базується на підході, який орієнтований на формування адаптивних технічних рішень для функціонування обладнання в умовах цифровізації аграрного виробництва, коли визначення раціональних параметрів здійснюється з урахуванням мінливості виробничих умов, енергетичних навантажень, режимів використання та поточного технічного стану технічних систем.

2. Розроблено функціональну схему використання даних кіберфізичних систем для формування інформаційної бази визначення конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва. Запропонована схема передбачає узгодження взаємодії сенсорних елементів, виконавчих механізмів, контролерів, модулів збору інформації та аналітичного блоку обробки даних, що забезпечує перехід від фізичного рівня функціонування обладнання до аналітичного середовища прийняття управлінських рішень. Визначена послідовність формування інформаційної бази передбачає збір первинних даних про параметри обладнання, нормалізацію даних про них, формування інформативних ознак та побудову масиву технологічних характеристик, придатного для подальшого використання в інтелектуальних моделях.

3. Запропоновано модель обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання аграрного виробництва, яка передбачає 4 рівні, що забезпечують виконання повного циклу переходу від первинного фізичного функціонування обладнання до формування раціональних параметрів його роботи в адаптивному режимі. Вона базується на використанні алгоритмів обчислювального інтелекту, що дозволяє врахувати приховані зв’язки між параметрами обладнання, визначати раціональні параметри функціонування обладнання залежно від зміни технологічних режимів, виробничого навантаження, енергетичних характеристик та поточного технічного стану системи.

4. Перевірку запропонованої моделі виконано в умовах ТзОВ «Інтелектуальні вендингові системи» на прикладі дослідного зразка автоматизованої установки під час миття трактора John Deere 8320R. Результати перевірки моделі показали, що її використання забезпечує обґрунтоване коригування конструктивних і технологічних параметрів обладнання. Зокрема, діаметр форсунок зменшено до 1,4 мм, кількість форсункових елементів збільшено до 12 одиниць, робочий тиск оптимізовано до 9,8 МПа, температура мийного розчину – до 49 °С, а витрата води – до 18,4 л/хв. Це дозволило знизити витрати води на 14,8%, зменшити споживання електроенергії насосною системою на 13,6%, скоротити тривалість циклу миття на 14,3% та підвищити продуктивність очищення на 16,7% порівняно з базовим режимом функціонування обладнання. Середня відносна похибка прогнозування становила 3,7%, що підтверджує достатню адекватність моделі для використання в реальних виробничих умовах.

Список літератури

1. Uztürk D., Kuter S., Akdemir B. Industry 4.0 technologies in Smart Agriculture: A review of research trends, opportunities, and challenges. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 208. Art. 123855. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123855
2. Yuan J., Huang Z. Intelligent Agricultural Machinery and Robots: Embracing Technological Advancements for a Sustainable and Highly Efficient Agricultural Future. *Agriculture*. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 2150. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14122150
3. Швець М. Д., Аулін В. В., Голуб Д. В. Інтеграція технологій вантажних робіт і виробничих процесів на основі цифрового моніторингу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. Вип. 11(42), ч. I. С. 320–329. URL: https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11%2842%29_I/38.pdf
4. Shamshiri R. R., Kalantari F., Ting K. C., Thorp K. R., Hameed I. A., Weltzien C., Ahmad D., Shad Z. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition toward dynamic operational control in agricultural systems. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 153. P. 69–90. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.029
5. Аулін В. В., Голуб Д. В., Замота Т. М. Інноваційні рішення в складській логістиці на основі автоматизації та цифровізації технічних систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2024. Вип. 10(41), ч. I. С. 280–289. URL: https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/10%2841%29_I/29.pdf
6. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 149. P. 94–111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014
7. Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V. Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2018. Vol. 18. P. 20–23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002
8. Фількін О. І., Тригуба А. М. Цифровий двійник кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. I. С. 253–264. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.253-264
9. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65, No. 2. P. 621–641. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005
10. Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data. *Nature*. 2018. Vol. 544. P. 23–25. DOI: https://doi.org/10.1038/544023a
11. Wang L., Törngren M., Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 37. P. 517–527. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008
12. Montalvo A., Camacho O., Chavez D. Cyber-Physical Systems for Smart Farming: A Systematic Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 14. Art. 6393. DOI: https://doi.org/10.3390/su17146393.
13. Tryhuba A., Filkin O., Tryhuba I., Tatomyr A., Malanchuk O. Architecture of a cyber-physical system for washing agricultural machinery. *Research in Agricultural Engineering*. 2025. Vol. 71, No. 4. P. 235–246. DOI: https://doi.org/10.17221/91/2025-RAE
14. Alves R. G., Souza G., Maia R. F., Tran A. L. H., Kamienski C. A digital twin for smart farming. In: 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). Seattle, USA, 2019. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/GHTC46095.2019.9033058.
15. 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. II. С. 143–159. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159
16. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3109. P. 25–31. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3109/paper4.pdf
17. Qian M., Shi Y., Chen J. Smart Irrigation Systems from Cyber–Physical Perspective. *Future Internet*. 2024. Vol. 16, No. 7. Art. 234. DOI: https://doi.org/10.3390/fi16070234.
18. Inderwildi O., Zhang C., Wang X., Kraft M. The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy. *Energy & Environmental Science*. 2020. Vol. 13. P. 744–771. DOI: https://doi.org/10.1039/C9EE03418C.
19. Zamora-Izquierdo M. A., Santa J., Martínez J. A., Martínez V., Skarmeta A. F. Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 177. P. 4–17. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014.
20. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29. P. 36–52. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
21. Liakos K. G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. Sensors. 2018. Vol. 18, No. 8. Art. 2674. DOI: https://doi.org/10.3390/s18082674.

22. Moysiadis V., Sarigiannidis P., Vitsas V., Khelifi A. Smart farming in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2021. Vol. 191. Art. 106515. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106515.
23. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems.* 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023.
24. Benos L., Bechar A., Bochtis D. Safety and ergonomics in human-robot interactive agricultural operations. *Biosystems Engineering.* 2020. Vol. 200. P. 55–72. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.017.
25. Тригуба А., Фількін О. Технологія мийки сільськогосподарської техніки та метод оцінки її ефективності за різних рівнях забруднення. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія Агроінженерні дослідження.* 2025. 29, С. 34–47. https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.34-47

References

1. Uztürk, D., Kuter, S., & Akdemir, B. (2024). Industry 4.0 technologies in smart agriculture: A review of research trends, opportunities, and challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, 208, 123855. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123855 [in English].
2. Yuan, J., & Huang, Z. (2024). Intelligent agricultural machinery and robots: Embracing technological advancements for a sustainable and highly efficient agricultural future. *Agriculture*, 14(12), 2150. https://doi.org/10.3390/agriculture14122150 [in English].
3. Shvets, M. D., Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2025). Intehratsiia tekhnolohii vantazhnykh robit i vyrobnychykh protsesiv na osnovi tsyfrovoho monitorynhu. Tsentralnoukrayinskyy naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky, 11(42), Part I, 320–329. https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11%2842%29_I/38.pdf [in Ukrainian].
4. Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition toward dynamic operational control in agricultural systems. Computers and Electronics in Agriculture, 153, 69–90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.029 [in English].
5. Aulin, V. V., Holub, D. V., & Zamota, T. M. (2024). Innovatsiini rishennia v skladskii lohistytsi na osnovi avtomatyzatsii ta tsyfrovizatsii tekhnichnykh system. Tsentralnoukrayinskyy naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky, 10(41), Part I, 280–289. https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/10%2841%29_I/29.pdf [in Ukrainian].
6. Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. Biosystems Engineering, 149, 94–111. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014 [in English].
7. Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial artificial intelligence for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 18, 20–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002 [in English].
8. Filkin, O. I., & Tryhuba, A. M. (2025). Tsyfrovyi dviinyk kiberfizychnoi systemy myttia silskohospodarskoi tekhniky. Tsentralnoukrayinskyy naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky, 12(43), Part I, 253–264. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.253-264 [in Ukrainian].
9. Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. CIRP Annals, 65(2), 621–641. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005 [in English].
10. Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing must embrace big data. Nature, 544, 23–25. https://doi.org/10.1038/544023a [in English].
11. Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. Journal of Manufacturing Systems, 37, 517–527. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008 [in English].
12. Montalvo, A., Camacho, O., & Chavez, D. (2025). Cyber-physical systems for smart farming: A systematic review. Sustainability, 17(14), 6393. https://doi.org/10.3390/su17146393 [in English].
13. Tryhuba, A., Filkin, O., Tryhuba, I., Tatomyr, A., & Malanchuk, O. (2025). Architecture of a cyber-physical system for washing agricultural machinery. Research in Agricultural Engineering, 71(4), 235–246. https://doi.org/10.17221/91/2025-RAE [in English].
14. Alves, R. G., Souza, G., Maia, R. F., Tran, A. L. H., & Kamienski, C. (2019). A digital twin for smart farming. In 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC) (pp. 1–4). https://doi.org/10.1109/GHTC46095.2019.9033058 [in English].
15. Holovaty, A. O., Chumak, V. M., Manko, Ye. V., Aulin, V. V., & Kulova, D. O. (2025). Vdoskonalennia matematychnoho modeliuvannia mashynobudivnykh tekhnolohii dlia smart-pidpryiemstv v systemi mashynnoho zoru. Tsentralnoukrayinskyy naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky, 11(42), Part II, 143–159. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.143-159 [in Ukrainian].
16. Tryhuba, A., Padyuka, R., Tymochko, V., & Lub, P. (2022). Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. CEUR Workshop Proceedings, 3109, 25–31. https://ceur-ws.org/Vol-3109/paper4.pdf [in English].

17. Qian, M., Shi, Y., & Chen, J. (2024). Smart irrigation systems from cyber–physical perspective. Future Internet, 16(7), 234. https://doi.org/10.3390/fi16070234 [in English].
18. Inderwildi, O., Zhang, C., Wang, X., & Kraft, M. (2020). The impact of intelligent cyber-physical systems on the decarbonization of energy. Energy & Environmental Science, 13, 744–771. https://doi.org/10.1039/C9EE03418C [in English].
19. Zamora-Izquierdo, M. A., Santa, J., Martínez, J. A., Martínez, V., & Skarmeta, A. F. (2019). Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. Biosystems Engineering, 177, 4–17. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014 [in English].
20. Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 29, 36–52. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002 [in English].
21. Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. Sensors, 18(8), 2674. https://doi.org/10.3390/s18082674 [in English].
22. Moysiadis, V., Sarigiannidis, P., Vitsas, V., & Khelifi, A. (2021). Smart farming in Europe. Computers and Electronics in Agriculture, 191, 106515. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106515 [in English].
23. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023 [in English].
24. Benos, L., Bechar, A., & Bochtis, D. (2020). Safety and ergonomics in human-robot interactive agricultural operations. Biosystems Engineering, 200, 55–72. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.017 [in English].
25. Tryhuba, A., & Filkin, O. (2025). Tekhnolohiia myiky silskohospodarskoi tekhniky ta metod otsinky yii efektyvnosti za riznykh rivniakh zabrudnennia. Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ekolohichnoho universytetu. Seriia Ahroinzhenerni doslidzhennia, 29, 34–47. https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.34-47 [in Ukrainian].

Anatoliy Tryhuba, Prof., DSc., **Orest Filkin**, **Maryan Kotsylovskyi**
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Lviv, Ukraine
Nazar Koval, PhD tech. sci.
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Substantiation of Structural and Technological Parameters of Agricultural Production Equipment Based on Cyber-Physical System Data and Computational Intelligence Methods

The purpose of the article is to develop a model for substantiating the structural and technological parameters of agricultural production equipment based on cyber-physical system data and computational intelligence methods. The main focus is placed on the formation of adaptive technical solutions for equipment operation under conditions of agricultural production digitalization, where the determination of rational technological system parameters takes into account variability of production conditions, energy loads, operating modes, and the current technical state of equipment. Within the study, a functional scheme for the use of cyber-physical system data was developed, covering the physical level of equipment operation, the sensor level of parameter acquisition, the controller level, data transmission modules, the analytical block, and the decision-making subsystem.

The proposed model for substantiating the structural and technological parameters of agricultural production equipment is based on the formation of an information base of equipment operating parameters, including technological, energy, structural, and operational characteristics. Based on these data, a feature vector is formed and transferred to an intelligent evaluation module, where a combination of a multilayer neural network, the XGBoost algorithm, and fuzzy logic is applied to determine rational equipment parameters. In computer implementation, the model is formalized as a sequence of stages including data normalization, formation of an integral efficiency criterion, prediction of operating parameters, and adaptive adjustment of operating modes.

The practical verification of the model was carried out under the conditions of Intelligent Vending Systems LLC using an experimental automated washing unit during the cleaning process of a John Deere 8320R tractor. The obtained results confirmed the possibility of reducing water consumption, electricity use, and technological cycle duration while simultaneously increasing the operational stability of the equipment. The proposed model provides a basis for the transition from static substantiation of structural and technological parameters of agricultural production equipment to intelligent substantiation in accordance with the principles of Industry 4.0 and modern mechanical engineering.

cyber-physical system, equipment, agricultural production, structural and technological parameters, computational intelligence, intelligent modeling, production digitalization

Одержано (Received) 21.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 23.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 621.86 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).116-124

О. Л. Ляшук, проф., док. техн. наук, **Ю. В. Омелянський**
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: oleglashuk@ukr.net

Дослідження динамічних характеристик гвинтового скребкового трубчастого транспортера-змішувача при транспортуванні сипких матеріалів у криволінійних трасах

Розроблено математичну модель поздовжніх коливань системи «привідний канат–зернова маса» гвинтового скребкового трубчастого транспортера-змішувача, що базується на квазілінійному описі пружних властивостей привідного органу та переході до змінних Ейлера. Модель враховує неперервний характер розподілу маси системи вздовж траси і дозволяє аналітично описати динамічний стан конвеєра в усталеному режимі транспортування. На основі побудованої моделі отримано аналітичні вирази для амплітуди резонансних коливань робочого органу при заданій швидкості транспортування та для резонансної швидкості при заданій амплітуді коливань. Встановлено, що зі збільшенням параметра нелінійності при сталій амплітуді власна частота коливань системи зменшується, а амплітуда при переході через резонанс зростає зі збільшенням швидкості руху робочого органу та його погонної маси, що фізично зумовлено більшим значенням кінетичної енергії системи при збільшеній відстані між скребками.

привідний канат, гвинтового скребкового трубчастого транспортера-змішувача, математичну модель, конструктивні параметри

Постановка проблеми. Інтенсифікація технологічних процесів в агропромисловому комплексі зумовлює підвищені вимоги до надійності та енергоефективності транспортуючого обладнання, призначеного для переміщення сипких матеріалів. Особливе місце серед такого обладнання займають трубчасті скребкові конвеєри, здатні переміщувати матеріали по криволінійних трасах довільної конфігурації. Запровадження у їх конструкцію гвинтових скребків, з’єднаних шарнірно-канатними ланками, відкриває принципово нові можливості. Окрім суто транспортних функцій, такі пристрої здатні одночасно виконувати змішування компонентів кормових сумішей безпосередньо в процесі їх переміщення, що дозволяє суттєво скоротити витрати на реалізацію комплексу технологічних операцій. Разом з тим практичне впровадження гвинтових скребкових трубчастих транспортерів-змішувачів стримується недостатньою вивченістю їх динамічної поведінки в умовах реальної експлуатації. Привідний канат із закріпленими на ньому гвинтовими скребками є пружною механічною системою, яка в процесі руху зазнає збурень при проходженні кутових точок траси. За певних співвідношень між швидкістю транспортування та параметрами системи такі збурення здатні спричиняти резонансні коливання, що збільшують динамічні навантаження на робочий орган і призводять до передчасного зносу елементів конструкції. Відсутність аналітично обґрунтованих критеріїв уникнення резонансних режимів унеможливлює раціональне призначення конструктивних параметрів і швидкісних режимів роботи конвеєра вже на стадії проєктування. Паралельно залишається відкритим питання кількісного опису продуктивності транспортера-змішувача як функції від сукупності взаємопов’язаних

© О. Л. Ляшук, Ю. В. Омелянський, 2026

чинників: внутрішнього діаметра труби, ступеня заповнення поперечного перерізу та поступальної швидкості руху робочого органу. Без встановлення залежностей між цими змінними на основі багатофакторного аналізу неможливо визначити оптимальні умови роботи пристрою та обґрунтувати його раціональні конструктивні параметри для конкретних виробничих умов.

Аналіз відомих результатів досліджень. Питанням вибору раціональних конструктивних схем і режимів роботи шнекових та трубчастих скребкових конвеєрів для транспортування сипких матеріалів у сільськогосподарському виробництві присвячено значну кількість наукових праць. В роботах [1, 2] авторами обґрунтовано конструктивні параметри пневматичних шнекових конвеєрів та встановлено вплив характеристик потоку сипкого матеріалу на техніко-економічні показники транспортування. Показано, що пневматичний принцип переміщення забезпечує високу мобільність і значну продуктивність технологічного процесу. Водночас у дослідженні вказано на суттєвий недолік таких систем: питомі енерговитрати при пневматичному транспортуванні в кілька разів перевищують аналогічний показник механічних шнекових конвеєрів, що обмежує можливість їх застосування в умовах малої механізації аграрного виробництва. Теоретичну модель механіки шнекових конвеєрів тунелепрохідних машин, що базується на взаємодії гвинтового робочого органу із зв’язаним ґрунтовим середовищем, запропоновано в [3]. Проте специфіка об’єкта дослідження визначає обмежену прикладну цінність цієї моделі для задач сільськогосподарського транспортування незв’язаних сипких матеріалів.

Питання підвищення надійності шнекових конвеєрів вирішувались у роботах [4-6]. Зокрема, в [4] авторами сформульовано загальні підходи до оптимізації параметрів шнекових конвеєрів для сипких матеріалів з урахуванням технологічних навантажень, проте запропонована методологія не враховує динамічних ефектів, що виникають при русі гнучкого привідного елемента по криволінійних трасах. У [5] авторами розроблено метод проєктування вертикального шнекового конвеєра на основі стійких гвинтових вихорів Тейлора-Куетта-Пуазейля. Проте авторами показано, що застосування цього підходу обмежено вертикальним компонуванням і не поширюється на конвеєри зі змінною геометрією траси. В роботі [6] методом дискретних елементів досліджено вплив геометрії шнека на характер вивантаження сферичних частинок із бункера в горизонтальному шнековому живильнику. Незважаючи на цінність отриманих результатів щодо взаємодії часток з гвинтовою поверхнею, питання динамічного навантаження привідного елемента за умов криволінійного переміщення матеріалу залишилось поза увагою авторів.

Питання моделювання процесів переміщення сипких матеріалів та визначення оптимальних режимів роботи шнекових і трубчастих скребкових конвеєрів розглядаються в роботах [7-12]. У дослідженні [7] авторами виконано верифікацію методу дискретних елементів шляхом зіставлення розрахункових результатів із лабораторними експериментами для горизонтального шнекового конвеєра. Встановлено задовільну збіжність числових і дослідних даних щодо продуктивності та характеру руху часток, що підтверджує придатність методу для подальших розрахунків. Однак у роботі розглядається лише прямолінійна конфігурація конвеєра. Питання поведінки системи за криволінійної траси та пружних коливань привідного елемента авторами не ставилось. В роботі [8] авторами визначено параметри транспортування і змішування кормових сумішей у трубчастих конвеєрах при їх русі по криволінійних трасах. Показано взаємозв’язок між конструктивними параметрами робочого органу і якістю змішування, проте питання динамічного навантаження на гнучкий привідний елемент в цій роботі системно не досліджувалось. Результати [9] містять дані багатофакторного експерименту з транспортування сипких матеріалів трубчастими скребковими конвеєрами та підтверджують суттєвий вплив швидкості

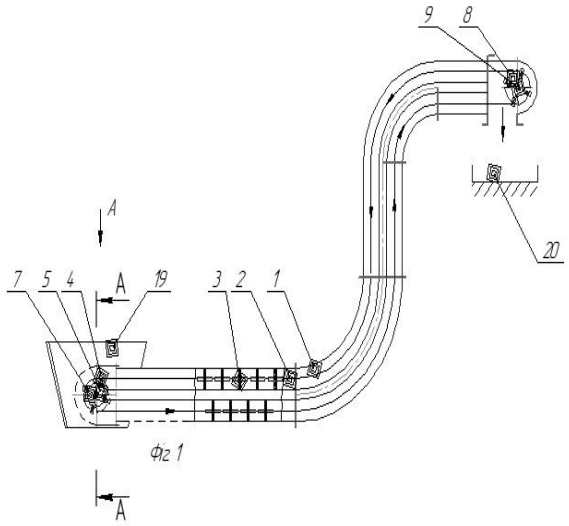
руху і ступеня заповнення перерізу на продуктивність. Разом з тим динамічні ефекти, що виникають при проходженні кутових ділянок траси, залишились поза увагою авторів. В роботі [10] авторами розглянуто сівалки і системи на основі елементів флюїдики. Незважаючи на суміжну тематику розподілу сипких матеріалів, в роботі не достатньо досліджено зв'язок із задачами динаміки трубчастих скребкових транспортерів. У [11] авторами досліджено можливість підвищення транспортних характеристик шнекових конвеєрів шляхом введення конструкції з обертовим кожухом. Показано, що така модифікація дозволяє знизити опір переміщенню матеріалу, однак розгляд динамічних навантажень у системі «привідний орган – транспортований матеріал» авторами не здійснювався. В [12] авторами запропоновано комплексну оцінку ефективності трубчастих скребкових конвеєрів методом TOPSIS із застосуванням багатокритеріального аналізу. Розглянутий підхід дозволяє порівнювати альтернативні конструктивні рішення за сукупністю показників, проте він носить суто порівняльно-аналітичний характер і не спрямований на дослідження динаміки робочого органу. Безпосередньо суміжними із тематикою цього дослідження є роботи [13-15], в яких розглядаються нові типи трубчастих скребкових конвеєрів, робочі органи яких здатні суміщати функції транспортування і змішування компонентів кормових сумішей. У цих дослідженнях авторами обґрунтовано конструктивні рішення, що забезпечують відбір і дозування компонентів у зоні завантаження та їх рівномірне перемішування в процесі транспортування трасою, що дозволяє суттєво скоротити апаратурне оформлення технологічного процесу. Разом з тим, незважаючи на практичну цінність отриманих результатів, у вказаних роботах залишились нерозв'язаними принципово важливі питання аналітичного обґрунтування умов виникнення резонансних коливань у системі «привідний канат – зернова маса» при переході через кутові точки траси, а також встановлення кількісних залежностей продуктивності від комплексу конструктивних і режимних параметрів системи. Саме ці аспекти є предметом цього дослідження.

Метою роботи є встановлення умов виникнення резонансних коливань привідного робочого органу гвинтового скребкового трубчастого транспортера-змішувача на основі побудови математичної моделі динаміки системи, а також визначення залежності його продуктивності від конструктивних і режимних параметрів за результатами багатофакторного експерименту.

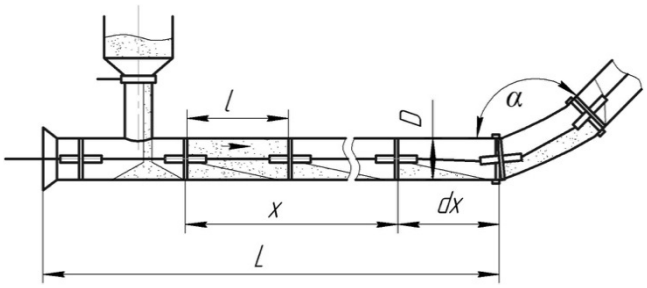
Виклад основного матеріалу. Об'єктом теоретичного аналізу в цій роботі є гвинтовий скребковий трубчастий транспортер-змішувач, конструктивна схема якого наведена на рис. 1. Робочий орган пристрою сформований із парних гвинтових скребків, розміщених із взаємним кутовим зміщенням 90° у коловому напрямку. Суміжні секції з'єднані між собою через пару кульок, розташованих у торцевих лунках циліндричних основ. Така конструктивна схема забезпечує збереження кінематичної рухомості системи при проходженні криволінійних ділянок транспортної траси і є базовою для подальшого динамічного аналізу.

Для побудови математичної моделі динаміки системи «привідний канат – зернова маса» прийнято такі допущення:

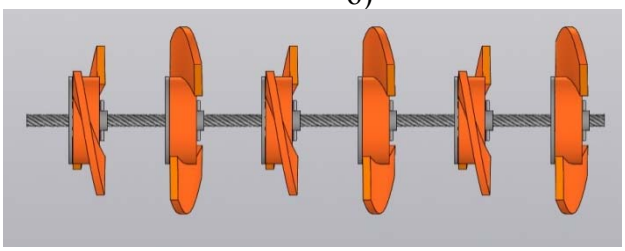
- привідний канат із закріпленими гвинтовими скребками розглядається як одновимірне тіло, пружні властивості якого описуються квазілінійним співвідношенням;
- швидкість переміщення робочого органу вважається сталою;
- зернова маса між сусідніми парами скребків розподілена рівномірно, а її переміщення відносно привідного каната є малими;
- сила опору руху пропорційна швидкості та є малою величиною порівняно з максимальним значенням пружної сили канату.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Конструктивна схема гвинтового скребкового трубчастого транспортера-змішувача (а); розрахункова схема горизонтально розміщеної вітки конвеєрної лінії з позначенням геометричних параметрів системи (б); загальний вигляд виготовленого робочого органу (в)

Джерело: розроблено авторами

Сукупність наведених допущень відповідає усталеному режиму роботи конвеєра і дозволяє коректно лінеаризувати задачу в рамках наступного аналізу. Для умовно виділеного елемента горизонтально розміщеної ділянки конвеєра довжиною *dx* на підставі другого закону Ньютона для деформованого континуального тіла записано основне співвідношення динаміки у вигляді:

$$m(x)\,dx\frac{d^2u(x,t)}{dt}=EA\left[\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right)^{\nu+1}_{|x}-\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right)^{\nu+1}_{|x+dx}\right]-R\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right)dx, \qquad (1)$$

де x – координата вздовж горизонтальної ділянки конвеєра; $u(x,t)$ – переміщення перетину робочого органу з координатою Лангранжа x у довільний момент часу t; $EA\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right)^{\nu+1}_{|x}$ та $EA\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right)^{\nu+1}_{|x+dx}$ – зусилля, що діють відповідно на лівий і правий торці виділеного елементу через площу перерізу A; $R\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right)dx$ – рівнодійна сил опору.

Оскільки привідний робочий орган рухається зі сталою відносною швидкістю v_0 вздовж горизонтальної осі, для переходу від Лагранжевого опису руху до Ейлерового використано стандартне перетворення координат. Після такої заміни змінних диференціальне рівняння поздовжніх коливань горизонтальної вітки конвеєрної лінії набуває вигляду:

$$m(x)\left(\frac{\partial^2u(x,t)}{\partial t^2}+2V\frac{\partial^2u(x,t)}{\partial x\partial x}+V^2\frac{\partial^2u(x,t)}{\partial x^2}\right)-(\nu+1)EA\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right)^{\nu}\frac{\partial^2u(x,t)}{\partial x^2}=-R\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right). \qquad (2)$$

Рівняння (2) є основним розрахунковим співвідношенням для подальшого аналізу резонансних режимів. З нього безпосередньо випливають обмежувальні крайові умови

$$u(x,t)_{|x=0}=0; \qquad (3)$$

$$u(x,t)_{|x=L} = l(1-\cos\alpha),$$

де L – довжина горизонтальної вітки конвеєрної лінії, l – віддаль між сусідніми бочкоподібними та круглими скребками, α – кут нахилу частини ланцюга у кутовій точці, яка знаходиться між скребками.

Фізичною причиною виникнення коливань у системі є збурення, що отримує привідний канат при проходженні кутових точок траси. Оскільки відстань між сусідніми скребками суттєво перевищує діаметр труби конвеєрної лінії, у межах першого наближення кут α може бути замінений його малою величиною в радіанному вимірі, а крайова умова на правому кінці системи спрощується до $u(x,t)_{|x=L} = \left(\frac{D}{2l}\right)^2 \cos^2\frac{V}{l}t$

З урахуванням того, що лінійна маса системи є неперервною функцією координати і з достатнім ступенем точності описується залежністю $m(x) = m_0 + m_1\cos\left(\frac{\pi}{2l}x + \varphi_0\right)$ (де m_0, m_1 і φ_0 сталі, а $m_0 >> m_1$), диференціальне рівняння (2) у змінних Ейлера набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - \eta^2\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\right)^{\nu}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \mu f\left(x, \vartheta, \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}, ..., \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\right), \qquad (4)$$

Застосування до рівняння (4) результатів аналізу неавтономних рівнянь з однорідними крайовими умовами дозволяє отримати аналітичний вираз для амплітуди резонансних коливань привідного гвинтового скребкового трубчастого конвеєра при заданій швидкості транспортування зерна:

$$a_p = \left(\frac{\Pi V}{\pi l}\sqrt{\frac{m_0}{EA(\nu+1)}}\right)^{\frac{2}{\nu}}\left(\frac{L}{\Pi_x}\right)^{\frac{\nu+2}{\nu}}. \qquad (5)$$

Швидкість транспортування сипкого матеріалу, за якої при заданій амплітуді коливань робочого органу реалізуються резонансні умови:

$$V = \sqrt{\frac{EA(\nu+1)}{m_0}}\left(\frac{\Pi_x}{L}\right)^{\frac{\nu+2}{2}}\frac{\pi l}{\Pi}a^{\frac{\nu}{2}}. \qquad (6)$$

На підставі отриманих виразів (5–6) побудовано графічні характеристики рис. 2, які ілюструють поведінку системи при варіюванні визначальних параметрів.

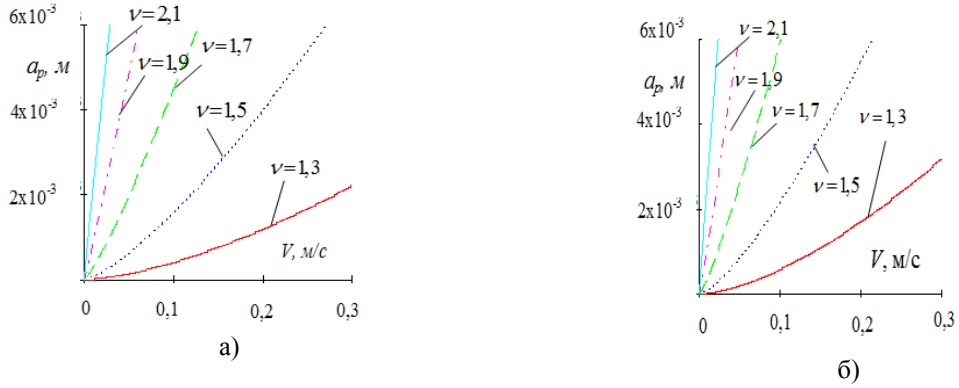


Рисунок 2 – Графічні залежності амплітуди резонансних коливань робочого органу від швидкості переміщення сипкого матеріалу при різних значеннях параметра нелінійності та погонній масі системи 25 кг/м (а) і 40 кг/м (б)

Джерело: розроблено авторами

Аналіз представлених кривих свідчить про те, що зі збільшенням параметра нелінійності при незмінній амплітуді коливань власна частота системи зменшується. Характерним є також те, що амплітуда при переході через резонанс є більшою для підвищених швидкостей руху робочого органу та більших значень погонної маси системи, що фізично пояснюється зростанням кінетичної енергії, яка переходить у коливальний процес при збільшенні відстані між скребками. Водночас, зменшення довжини вітки конвеєра призводить до помітного зниження амплітуди резонансних коливань, що підтверджує доцільність секційного компонування транспортної магістралі при проєктуванні систем із підвищеними вимогами до динамічної стійкості.

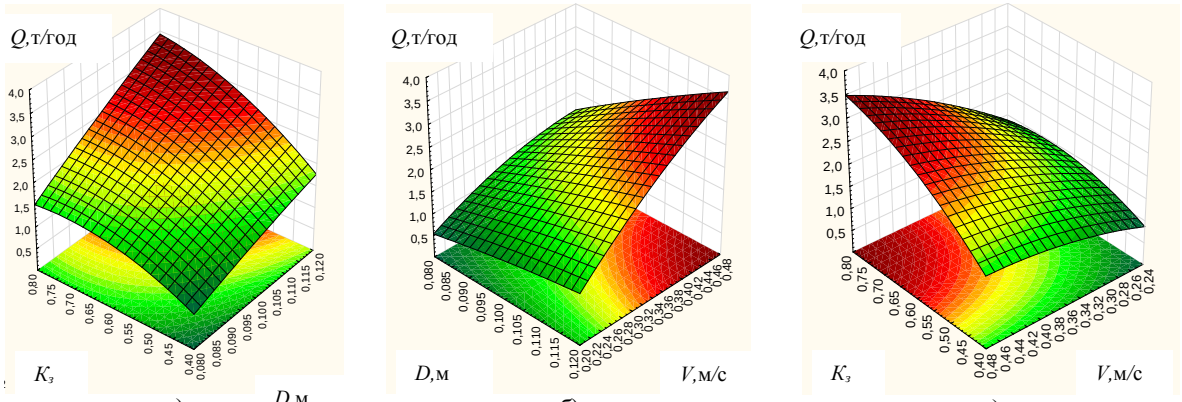
Отримані аналітичні залежності (5–6) описують умови виникнення резонансних явищ у системі та встановлюють зв’язок між конструктивними параметрами конвеєра і динамічними характеристиками його роботи. Для практичної верифікації теоретичних результатів і кількісного визначення продуктивності транспортера-змішувача як функції від сукупності конструктивних і режимних параметрів було проведено експериментальні дослідження на спеціально розробленому лабораторному стенді. Експериментальні дослідження виконувались згідно з методикою планування багатофакторного експерименту [9] на лабораторному стенді, загальний вигляд якого наведено на рис. 3. До складу стенду входять привід конвеєра (1), засипний бункер (2), робочий орган (3), привідна зірочка (4), скребок (5), транспортна магістраль (6), перетворювач частоти (7) та персональний комп’ютер (8) для реєстрації і оброблення даних. Застосування перетворювача частоти дозволило реалізувати задані значення поступальної швидкості руху робочого органу в широкому діапазоні без механічного перемикання передач, що забезпечило необхідну точність відтворення умов кожного дослідного варіанту.



Рисунок 3 – Загальний вигляд лабораторного стенду для дослідження параметрів транспортування сипких матеріалів гвинтовим скребковим трубчастим транспортером-змішувачем:
1 – привід конвеєра; 2 – засипний бункер; 3 – робочий орган; 4 – привідна зірочка; 5 – скребок; 6 – транспортна магістраль; 7 – перетворювач частоти; 8 – персональний комп’ютер
Джерело: розроблено авторами

Предметом дослідження визначено продуктивність транспортування сипкого матеріалу $Q=f(D,Kз,V)$ як функцію трьох незалежних факторів: внутрішнього діаметра труби D, м, коефіцієнта заповнення поперечного перерізу $K_з$ та поступальної швидкості руху робочого органу V, м/с. Діапазони варіювання факторів встановлено в межах $0{,}08 \le D \le 0{,}12$ м; $0{,}5 \le K_з \le 0{,}9$; $0{,}24 \le V \le 0{,}48$ м/с. Вибір зазначених меж зумовлений практичними умовами експлуатації транспортерів-змішувачів у тваринницьких комплексах і відповідає типовим технологічним регламентам подачі кормових сумішей.

За результатами дослідного масиву виконано апроксимацію отриманих даних і перевірку адекватності регресійної моделі. Оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії підтвердило статистичну достовірність встановлених залежностей у всьому досліджуваному діапазоні факторів. На підставі отриманої моделі побудовано поверхні відгуку продуктивності транспортування (рис. 4), які наочно відображають характер взаємного впливу пар факторів: D і $K_з$ (рис. 4а), D і V (рис. 4б) та $K_з$ і V (рис. 4в).



а) б) в)

Рисунок 4 – Поверхні відгуку продуктивності транспортування сипкого матеріалу гвинтовим скребковим трубчастим транспортером-змішувачем:
а) $Q = f(D, K_з)$; б) $Q = f(V, D)$; в) $Q = f(V, K_з)$

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих поверхонь відгуку свідчить про те, що визначальний вплив на продуктивність транспортера-змішувача справляють внутрішній діаметр труби D та поступальна швидкість руху робочого органу V. Зростання обох параметрів у досліджуваному діапазоні супроводжується монотонним збільшенням продуктивності. Вплив коефіцієнта заповнення $K_з$ є менш виразним. Збільшення швидкості руху при зміні $K_з$ призводить до незначного приросту продуктивності. Водночас встановлено, що зміна кута α робочої поверхні шайб у межах від 22 до 40° спричиняє несуттєве збільшення продуктивності, тоді як подальше збільшення кута до 53° призводить до її зниження внаслідок виникнення клинення матеріалу між скребками і стінкою труби. Максимальна продуктивність транспортування сипкого матеріалу при вологості 14–17% за результатами багатофакторного експерименту становила Q=3,8 т/год, що підтверджує відповідність конструктивних параметрів розробленого транспортера-змішувача вимогам промислової експлуатації.

Висновки.

1.Встановлено характер зростання динамічних навантажень у системі залежно від швидкісного режиму транспортування. При збільшенні швидкості від 1 м/с до 2 м/с за умови v=1,5 і довжини траєкторії l=10 м динамічне напруження зростає у 5,2 рази. При збільшенні швидкості від 2 м/с до 3 м/с за тих самих параметрів – у 3 рази.

Отримані результати підтверджують необхідність проєктного обмеження швидкісних режимів роботи конвеєра для запобігання резонансним явищам.

2.Експериментально встановлено, що на криволінійних ділянках технологічної траси зусилля на процес транспортування суттєво відрізняються від відповідних значень на прямолінійних ділянках. Для металевих скребків відхилення зусиль становить 3-7%, для полікарбонатних – 5-8% залежно від коефіцієнта завантаження направляючої труби *K*, що необхідно враховувати при виборі матеріалу робочих органів для конкретних умов експлуатації.

3.За результатами багатофакторного експерименту *Q=f(D, Kз, V)* встановлено, що визначальний вплив на продуктивність транспортера-змішувача мають внутрішній діаметр труби *D* та поступальна швидкість руху робочого органу *V*. Максимальна продуктивність транспортування сипкого матеріалу при вологості 14–17% становила *Q*=3,8 т/год. Також встановлено, що зміна кута α робочої поверхні шайб у межах 22–40° спричиняє несуттєве збільшення продуктивності, тоді як подальше збільшення кута до 53° призводить до її зниження внаслідок клинення матеріалу між скребками і стінкою труби.

Список літератури

1. Hevko, R.B., Strishenets, O.M., Lyashuk, O.L., Tkachenko, I.G., Klendii, O.M., Dzyura, V.O., Development of a Pneumatic Screw Conveyor Design and Substantiation of its Parameters, *INMATEH*: *Agricultural Engineering*, 2018. Vol. 54, № 1. P. 153-160.
2. Hevko, R. B., Baranovsky, V. M., Lyashuk, O. L., Pohrishchuk, B. V., Gumeniuk, Y. P., Klendii, O. M., Dobizha, N. V., The Influence of Bulk Material Flow on Technical and Economical Performance of a Screw Conveyor, *INMATEH: Agricultural Engineering*, 2018. Vol. 56, № 3. P. 175-184.
3. Merritt, A. S., Mair, R. J., Mechanics of Tunnelling Machine Screw Conveyors: a Theoretical Model, *Geotechnique*, 2008. Vol. 58, № 2. P. 79-94.
4. Roberts, A. W., Bulk Solids: Optimizing Screw Conveyors, *Chemical engineering*, 2015. Vol. 122, № 2. P. 62.-67.
5. Xiaoxia, S., Wenjun, M., Yuan, Y., Design Method of a Vertical Screw Conveyor Based on Taylor–Couette–Poiseuille Stable Helical Vortex, *Advances in Mechanical Engineering*, 2017. Vol. 9, № 7. P. 1-11.
6. Fernandez, J. W., Cleary, P. W., Mcbride, W., Effect of Screw Design on Hopper Drawdown of Spherical Particles in a Horizontal Screw Feeder, Chemical engineering science, 2011. Vol. 66, № 22. P. 5585-5601.
7. Owen, P. J., Cleary, P. W., Screw Conveyor Performance: Comparison of Discrete Element Modelling with Laboratory Experiments, *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2010. Vol. 10, № (5-6). P. 327-333.
8. Hevko, R. B., Liubin, M. V., Tokarchuk, O. A., Lyashuk, O. L., Pohrishchuk, B. V., Klendii, O. M., Determination of the Parameters of Transporting and Mixing feed Mixtures Along the Curvilinear Paths of Tubular Conveyors*, INMATEH: Agricultural Engineering*, 2018. Vol. 55, № 2. P. 97-104.
9. Lyashuk, O., Dyachun, A., Zolotuy, R., Oleksyshyn, O., Zamora, Y., Tkáč, Z., Results of Experimental Research of Granular Materials Transportation by Tubular Scraper Conveyors. *In acta Technologica Agriculturae*, 2013. Vol. 16, № 4. P. 101-105.
10. Aulin, V.V., Chernovol, M.I., Pankov, A.O., Zamota, T.M., Panayotov, K.K., Sowing machines and systems based on the elements of fluidics*, INMATEH: Agricultural Engineering*, 2017. Vol. 53, № 3. P. 21-28.
11. Rohatynskyi, R., Gevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Skyba, O., Melnychuk, A., Feasibility Study of Improving the Transport Performance by Means of Screw Conveyors with Rotary Casings, *Acta Technologica Agriculturae*, 2019. Vol. 22, № 4. P. 141-146.
12. Yao, Y.P., Kou, Z.M., Meng, W.J., Han, G., Overall Performance Evaluation of Tubular Scraper Conveyors Using a TOPSIS-Based Multi-attribute Decision-Making Method, *Scientific World Journal*, New York/USA, 2014.
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. Ляшук О.Л. , Гевко Р.Б., Дзюра В.О., Кирик О.М., Довбиш А.П. Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання: монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 169 с.

References

1. Hevko, R.B., Strishenets, O.M., Lyashuk, O.L., Tkachenko, I.G., Klendii, O.M., & Dzyura, V.O. (2018). Development of a Pneumatic Screw Conveyor Design and Substantiation of its Parameters. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 54(1), 153-160.
2. Hevko, R. B., Baranovsky, V. M., Lyashuk, O. L., Pohrishchuk, B. V., Gumeniuk, Y. P., Klendii, O. M., & Dobizha, N. V. (2018). The Influence of Bulk Material Flow on Technical and Economical Performance of a Screw Conveyor. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 56(3), 175-184.
3. Merritt, A. S., Mair, R. J. (2008). Mechanics of Tunnelling Machine Screw Conveyors: a Theoretical Model*, Geotechnique*, 58(2), 79-94.
4. Roberts, A. W. (2015). Bulk Solids: Optimizing Screw Conveyors. *Chemical engineering*, 122(2), 62.-67.
5. Xiaoxia, S., Wenjun, M., Yuan, Y. (2017). Design Method of a Vertical Screw Conveyor Based on Taylor–Couette–Poiseuille Stable Helical Vortex, *Advances in Mechanical Engineering*, 9(7), 1-11.
6. Fernandez, J. W., Cleary, P. W., Mcbride, W. (2011). Effect of Screw Design on Hopper Drawdown of Spherical Particles in a Horizontal Screw Feeder. *Chemical engineering science*, 66 (22), 5585-5601.
7. Owen, P. J., Cleary, P. W. (2010). Screw Conveyor Performance: Comparison of Discrete Element Modelling with Laboratory Experiments. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 10(5-6), 327-333.
8. Hevko, R. B., Liubin, M. V., Tokarchuk, O. A., Lyashuk, O. L., Pohrishchuk, B. V., Klendii, O. M. (2018). Determination of the Parameters of Transporting and Mixing feed Mixtures Along the Curvilinear Paths of Tubular Conveyors*. INMATEH: Agricultural Engineering*, 55(2), 2018, 97-104.
9. Lyashuk, O., Dyachun, A., Zolotuy, R., Oleksyshyn, O., Zamora, Y., Tkáč, Z. (2013). Results of Experimental Research of Granular Materials Transportation by Tubular Scraper Conveyors. *In acta Technologica Agriculturae,* 16(4), 101-105.
10. Aulin, V.V., Chernovol, M.I., Pankov, A.O., Zamota, T.M., Panayotov, K.K. (2017). Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. *INMATEH: Agricultural Engineering*, 53(3), 21-28.
11. Rohatynskyi, R., Gevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Skyba, O., Melnychuk, A. (2019). Feasibility Study of Improving the Transport Performance by Means of Screw Conveyors with Rotary Casings, Acta Technologica Agriculturae, 22(4), 141-146.
12. Yao, Y.P., Kou, Z.M., Meng, W.J., Han, G. (2014). Overall Performance Evaluation of Tubular Scraper Conveyors Using a TOPSIS-Based Multi-attribute Decision-Making Method. *Scientific World Journal*, New York/USA.
13. Rohatynskyi, R. M., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., et al. (2019). Perspective screw conveyors: monograph. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
14. Rohatynskyi, 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. Puliuia [in Ukrainian].
15. Lyashuk, O.L., Gevko, R.B., Dzyura, V.O., Kyryk, O.M. & Dovbysh, A.P. (2019). Creation and modernization of transport and technological mechanisms of machines and equipment. Ternopil: FOP Palyanytsya V.A. [in Ukrainian].

Oleg Lyashuk, Prof., Doc. Tec. Sci.**, Yuriy Omelyansky**
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Study of Dynamic Characteristics of a Screw Scraper Tubular Conveyor-Mixer When Transporting Bulk Materials in Curved Routes

A mathematical model of longitudinal oscillations of the "drive rope–grain mass" system of a screw scraper tubular conveyor-mixer has been developed, which is based on a quasi-linear description of the elastic properties of the drive element and the transition to Euler variables. The model takes into account the continuous nature of the system mass distribution along the route and allows analytically describing the dynamic state of the conveyor in a steady state of transportation. Based on the constructed model, analytical expressions for the amplitude of resonant oscillations of the working body at a given transportation speed and for the resonant speed at a given amplitude of oscillations were obtained. It was established that with an increase in the nonlinearity parameter at a constant amplitude, the natural frequency of oscillations of the system decreases, and the amplitude when passing through resonance increases with an increase in the speed of movement of the working body and its linear mass, which is physically due to a larger value of the kinetic energy of the system with an increased distance between the scrapers.

drive rope, screw scraper tubular conveyor-mixer, mathematical model, design parameters

Одержано (Received) 23.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 02.04.2026

УДК 62-236.58 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).125-130

І.А. Валявський, канд. техн. наук, **О.В. Лисенко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: valiavskyiia@kntu.kr.ua

Підвищення ефективності сонячної енергогенерації за допомогою механізмів паралельної структури

Запропоновано використання механізму паралельної структури типу «гексапод» для зміни кута нахилу сонячної панелі з метою забезпечення перпендикулярності її поверхні до сонячних променів. Визначено аналітичні залежності між положенням виконавчого органу «гексапода» (сонячної панелі) і довжиною його кінематичних ланок, які використовуються в системі керування зазначеного механізму. Показано, що сонячний трекер на основі механізму паралельної структури може генерувати на 30% більше енергії у порівнянні з системами з постійним кутом встановлення панелей.
сонячна енергогенерація, сонячний трекер, гексапод, механізм паралельної структури, платформа Стюарта

Постановка проблеми. Одним з напрямків розвитку енергетики з використанням альтернативних джерел є сонячна енергетика. Підвищення продуктивності сонячних електростанцій (СЕС) є важливою науково-практичною проблемою. Сонячні панелі функціонують найефективніше у випадку, коли сонячні промені перпендикулярні їх поверхням. Чим гостріший кут між поверхнею панелі і напрямком сонячних променів, тим більші втрати ККД [1]. Тому розробка ефективного механізму керування кутом нахилу сонячних панелей є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для досягнення максимальної продуктивності сонячні панелі повинні бути змонтовані так, щоб сонячні промені падали на робочу поверхню під кутом 90°. Двохосьові трекерні системи це забезпечують, проте є дорогими, споживають енергію та вимагають великої площі. Тому у більшості фотоелектричних систем використовують стаціонарні конструкції як компроміс між продуктивністю та вартістю. Продуктивність енергії фотоелектричної системи залежно від монтажної конструкції наведена в табл. 1 [2]. Аналіз впливу кута нахилу на ефективність СЕС описаний у [3, 4]. Підхід до керування механізмами з паралельною кінематикою розглянуто у [5].

Таблиця 1 – Продуктивність енергії фотоелектричної системи залежно від типу монтажної конструкції

Тип монтажної конструкції	**Відносна продуктивність, %**
Фіксований кут	80–95
Регулювання кута 2 рази на рік	95–99
Регулювання кута 4 рази на рік	98–99
Двохосьовий трекер	100 (база)

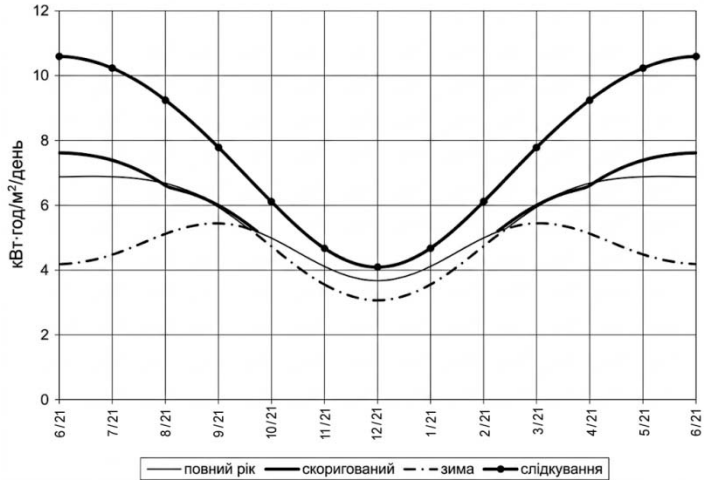
Джерело: складено на підставі [2]

© І. А. Валявський, О. В. Лисенко, 2026

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності сонячних електростанцій шляхом зміни положення сонячної панелі залежно від положення сонця за допомогою механізмів паралельної структури. Для досягнення мети необхідно: 1) розглянути вплив кута нахилу сонячних панелей на енергогенерацію; 2) розробити механізм паралельної структури для керування положенням сонячних панелей; 3) вирішити зворотну задачу кінематики для запропонованого механізму.

Виклад основного матеріалу.

1) Оптимальне значення куту нахилу залежить від широти місцевості та сезону. При зміні кута два рази на рік на широті 25°–50° кращим кутом для літа є: широта × 0,93 − 21°; для зими: широта × 0,875 + 19,2°. Взимку панелі при зимовому куті нахилу захоплюють від 81 до 88% енергії двохосьової трекерної системи [2]. Графік впливу регулювань кута нахилу на продуктивність наведений на рис. 1. Таблиця кутів нахилу для різних сезонів представлена в табл. 2.



повний рік – кількість енергії при встановленні сонячної батареї з фіксованим оптимальним кутом нахилу; скоригований – кількість енергії при регулюванні кута нахилу чотири рази на рік; зима – кількість енергії, коли сонячні панелі встановлені на зимовий кут; слідкування – кількість енергії, що можна отримати від двохосьової трекерної системи стеження, яка орієнтує панелі перпендикулярно до сонячних променів

Рисунок 1 – Графік впливу регулювань кута нахилу сонячних панелей на їх продуктивність

Джерело: складено на підставі [2]

Таблиця 2 – Кути нахилу сонячних панелей для різних сезонів (широта 40°)

Сезон	**Оптимальний кут, °**	**% від трекерної системи**
Зима	44°	81–88%
Весна / Осінь	34°	74–75%
Літо	16°	68–74%
Регулювання 4 рази/рік	змінний	98–99%

Джерело: складено на підставі [2]

2) З метою оптимізації кута падіння сонячних променів пропонується використовувати гексапод, який завдяки паралельній структурі дозволяє ефективно керувати положенням панелі (рис. 2) [6]. Механізм складається з рухомого виконавчого органу ABC, який шарнірно пов’язаний з нерухомим елементом механізму KNM за

допомогою шести кінематичних ланок змінної довжини KA, MA, MC, NC, NB і KB. Регулюючи довжини кінематичних ланок, можна забезпечувати необхідний просторовий рух (орієнтацію) виконавчого органу, на якому закріплюється сонячна панель [5]. Механізм побудований на основі просторової ферми, що забезпечує його високу жорсткість і дозволяє встановлення панелей значного розміру та маси.

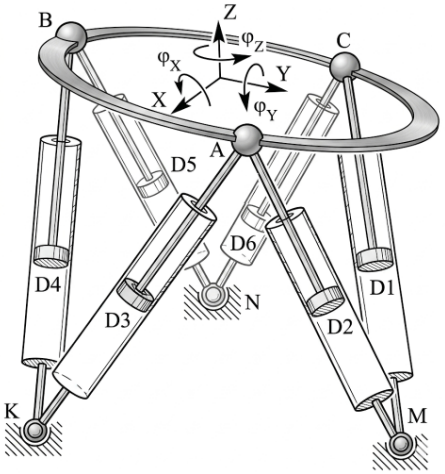


Рисунок 2 – Шестикоординатний механізм паралельної структури («гексапод»)
Джерело: складено на підставі [5]

3) Для керування гексаподом необхідно вирішити зворотну задачу кінематики — визначити довжини кінематичних ланок, що відповідають заданому положенню виконавчого органу [9]. Розглянемо розрахункову схему механізму (рис. 3): $O_нX_нY_нZ_н$ — нерухома система координат; A, B, C, D, E, F — центри опорних шарнірів несучої системи; $o_рx_рy_рz_р$ — рухома система координат, пов’язана з виконавчим органом; a, b, c, d, e, f — центри шарнірів виконавчого органу у рухомій системі координат.

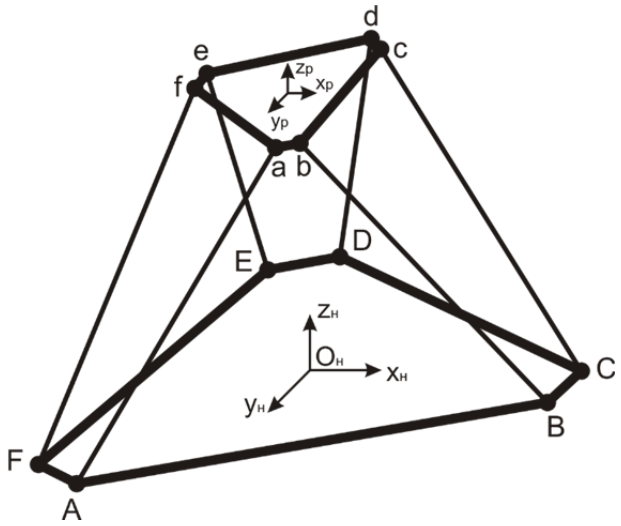


Рисунок 3 – Розрахункова схема механізму
Джерело: розроблено авторами

Положення рухомої системи координат $o_рx_рy_рz_р$ відносно нерухомої $O_нX_нY_нZ_н$ задається трьома лінійними координатами (x, y, z) та трьома кутами Ейлера (φ, θ, ψ). Згідно з положеннями аналітичної геометрії координати точки y нерухомій системі визначаються за формулою (1):

$$\bar{r}_{\text{н}} = M\bar{r}_p + \bar{r}_p^{\text{н}}, \quad (1)$$

де $\bar{r}_{\text{н}} = (x_{\text{н}} \quad y_{\text{н}} \quad z_{\text{н}})^T$ – радіус-вектор, що визначає положення деякої точки у нерухомій системі координат; $\bar{r}_{\text{р}} = (x_{\text{р}} \quad y_{\text{р}} \quad z_{\text{р}})^T$ – радіус-вектор, що визначає положення цієї точки у рухомій системі координат; M – матриця послідовних поворотів на кути Ейлера φ, θ, ψ; $\bar{r}_{\text{р}}^{\text{н}} = (x_{\text{р}}^{\text{н}} \quad y_{\text{р}}^{\text{н}} \quad z_{\text{р}}^{\text{н}})^T$ – радіус-вектор, що визначає положення початку координат рухомої системи у нерухомій.

Розрахункова схема кінематичної ланки показана на рис. 4. Довжина кінематичної ланки визначається як відстань між точками несучої системи та виконавчого органу за формулою (2):

$$\bar{r}_{Aa} = M \cdot \bar{r}_{\text{a}(p)} + \bar{r}_{M(\text{н})} - \bar{r}_{A(\text{н})}, \quad (2)$$

де $\bar{r}_{M(\text{н})}$ – радіус-вектор, що визначає задану точку *M* у нерухомій системі координат; $\bar{r}_{\text{a}(p)}$ – радіус-вектор, що визначає точку *a* у рухомій системі координат; $\bar{r}_{A(\text{н})}$ – радіус-вектор, що визначає точку *A* несучої системи у нерухомій системі координат.

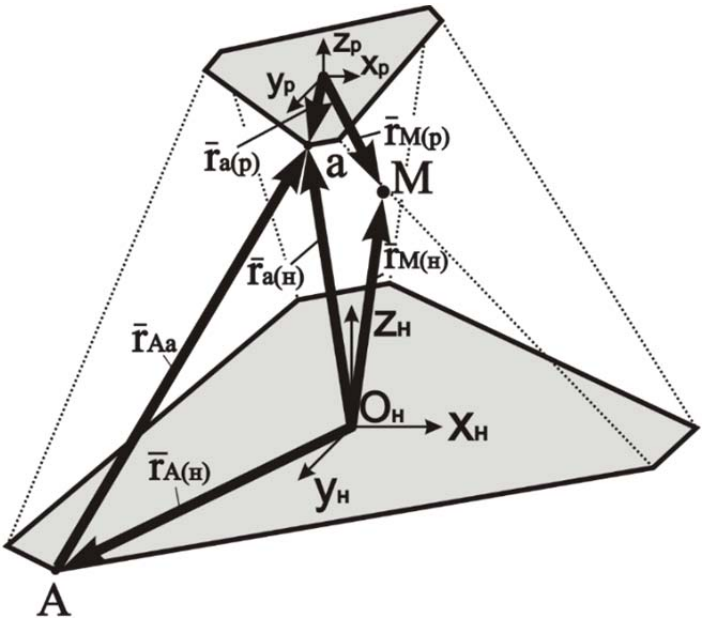


Рисунок 4 – Розрахункова схема кінематичної ланки

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, довжина ланки Aa буде дорівнювати (3):

$$l_{Aa} = \sqrt{x_{Aa}^2 + y_{Aa}^2 + z_{Aa}^2}, \quad (3)$$

де

$$x_{\text{Aa}} = x_{\text{A(н)}} - x_{\text{M(н)}} - cos\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot \left(x_{\text{a(р)}} - x_{\text{M(р)}}\right) + \\ + cos\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot \left(y_{\text{a(р)}} - y_{\text{M(р)}}\right) - sin\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot \left(z_{\text{a(р)}} - z_{\text{M(р)}}\right);$$

$$y_{\text{Aa}} = y_{\text{A(н)}} - y_{\text{M(н)}} - \left(cos\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}} + sin\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}}\right) \cdot \left(x_{\text{a(р)}} - x_{\text{M(р)}}\right) - \\ -\left(cos\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}} - sin\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}}\right) \cdot \left(y_{\text{a(р)}} - y_{\text{M(р)}}\right) + \\ + sin\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot \left(z_{\text{a(р)}} - z_{\text{M(р)}}\right);$$

$$z_{\text{Aa}} = z_{\text{A(н)}} - z_{\text{M(н)}} - \left(sin\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}} + cos\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}}\right) \cdot \left(x_{\text{a(p)}} - x_{\text{M(p)}}\right) - \\ -\left(sin\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}} - cos\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot sin\,\psi_{\text{р}}^{\text{н}}\right) \cdot \left(y_{\text{a(p)}} - y_{\text{M(p)}}\right) + \\ + cos\,\theta_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot cos\,\phi_{\text{р}}^{\text{н}} \cdot \left(z_{\text{a(p)}} - z_{\text{M(p)}}\right).$$

Аналогічно за формулою (3) визначаються довжини всіх шести кінематичних ланок Aa, Bb, Cc, Dd, Ee, Ff. Виведені формули однозначно визначають залежність між довжинами ланок та положенням (кутом нахилу) виконавчого органу і можуть бути використані при програмуванні алгоритмів керування запропонованим механізмом.

Висновки. 1) Теоретичні дослідження впливу кута нахилу сонячних панелей на енергогенерацію з урахуванням статистичних даних [3, 4] підтверджують, що сонячний трекер на основі механізму паралельної структури може генерувати на 30% більше енергії у порівнянні з системами з постійним кутом встановлення панелей. 2) Запропонований метод керування за допомогою механізму з паралельною кінематикою типу «гексапод» дозволяє швидко змінювати орієнтацію сонячної панелі залежно від положення сонця. Механізм забезпечує високу жорсткість та допускає встановлення панелей значного розміру і маси. 3) Виведені аналітичні залежності між положенням виконавчого органу та довжинами кінематичних ланок гексапода можуть бути безпосередньо використані при розробці алгоритмів керування.

Список літератури

1. Як правильно встановити сонячні панелі. *Axiomplus* : веб-сайт. URL: https://axiomplus.com.ua/news/ustanovka-solnechnyh-panelej/ (дата звернення: 27.04.2024).
2. Встановлення сонячних батарей. Варіанти конструкцій під монтаж сонячних батарей. URL: https://mysolarenergyua.blogspot.com/2017/03/blog-post_30.html (дата звернення: 27.04.2024).
3. Кут нахилу сонячних батарей та його вплив на техніко-економічні показники експлуатації сонячної електростанції. URL: https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/Енергетична-ефективність-1.pdf (дата звернення: 27.04.2024).
4. Mustafa Engin. Controller Design for Parallel Mechanism Solar Tracker. Machines. 2023. Vol. 11, No. 3. P. 372. URL: https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/372 (дата звернення: 27.04.2024).
5. Валявський І.А., Лисенко О.В., Лисенко І.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навч. посіб. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 281 с.
6. The use of parallel structure mechanisms to ensure efficient solar energy generation / O. V. Lysenko, I. A. Valiavskyi, O. I. Skibinskyi . *Development areas of modern technical sciences for a secure future society* : International scientific conference (December 25-26, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 19-22.
7. Weck M., Staimer D. Parallel Kinematic Machines Tools - Current State and Future Potentials, *Annals of CIRP,* 51/2/2002, p.671-683.
8. Zhang Dan. Parallel Robotic Machine Tools . New York : Springer US, 2010. XII, 219 p.
9. Merlet J.-P. Parallel Robots . Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers ; Springer, 2012. XVII, 372 p.

References

1. *Axiomplus*. (2024). How to properly install solar panels. URL: https://axiomplus.com.ua/news/ustanovka-solnechnyh-panelej/ [in Ukrainian].
2. Mysolarenergyua. (2024). Solar battery installation options. URL: https://mysolarenergyua.blogspot.com/2017/03/blog-post_30.html [in Ukrainian].
3. The tilt angle of solar batteries and its effect on the economic performance of a solar power plant. (2024). URL: https://events.pstu.edu/konkurs-energy/ [in Ukrainian].
4. Mustafa, Engin. (2023). Controller Design for Parallel Mechanism Solar Tracker. *Machines,* 11(3), 372. https://doi.org/10.3390/machines11030372.
5. Valiavskyi, I.A., Lysenko, O.V., & Lysenko, I.A. (2023). Technological equipment with parallel kinematics. Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi [in Ukrainian].

6. Lysenko, O. V., Valiavskyi, I. A., & Skibinskyi, O. I. (2024). The use of parallel structure mechanisms to ensure efficient solar energy generation . Development areas of modern technical sciences for a secure future society : International scientific conference (December 25-26, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : Baltija Publishing, P. 19-22.
7. Weck, M., & Staimer, D. (2002). Parallel Kinematic Machines Tools - Current State and Future Potentials, *Annals of CIRP*, 51/2/2002, p.671-683
8. Zhang, Dan. (2010). Parallel Robotic Machine Tools . New York : Springer US, XII, 219 p.
9. Merlet, J.-P. (2012). Parallel Robots . Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers ; Springer, XVII, 372 p.

Ivan Valiavskyi, PhD tech. sci., **Oleksandr Lysenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Efficiency of Solar Energy Generation Using Parallel Structure Mechanisms

The purpose of this article is to improve the efficiency of solar power plants by changing the position of the solar panel depending on the position of the sun using parallel structure mechanisms, and to determine analytical dependencies between the position of the executive body (solar panel) and the lengths of the kinematic links of the hexapod mechanism for use in the control system.

Solar panels operate most efficiently when their surface is perpendicular to the sun's rays. The greater the angle between the panel surface and sunlight direction, the greater the efficiency losses. Two-axis solar tracking systems satisfy the 90° requirement but are expensive, consume energy, and require large areas. Therefore, stationary structures are predominantly used as a compromise. Statistical data show that adjusting the tilt angle four times a year allows capturing 98–99% of the energy of a full tracking system. The article proposes using a hexapod-type parallel structure mechanism as the basis for a solar tracker. The mechanism consists of a movable actuator ABC hinged to the fixed element KNM via six single-movable kinematic links. By adjusting the lengths of these links, the required spatial orientation of the solar panel is achieved. The mechanism is built on a spatial truss, ensuring high structural rigidity and the ability to support large and heavy panels. The inverse kinematics problem was solved to derive control equations. The position of the moving coordinate system is described by three linear coordinates (x_0, y_0, z_0) and three Euler angles (φ, θ, ψ). Using coordinate transformation matrices, closed-form formulas for calculating all six kinematic link lengths (Aa, Bb, Cc, Dd, Ee, Ff) from the given panel position were derived.

Theoretical research confirms that a solar tracker based on a parallel structure mechanism can generate 30% more energy compared to systems with a fixed installation angle. The derived formulas uniquely determine the relationship between kinematic link lengths and the panel's tilt angle and can be directly used in programming control algorithms for the proposed mechanism. The approach combines adequate energy efficiency with high structural rigidity and can serve as the basis for developing cost-effective solar tracking systems.

solar energy generation, solar tracker, hexapod, parallel structure mechanism, Stewart platform

Одержано (Received) 11.04.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 20.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 23.04.2026

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.77:620.9 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).131-136

І. С. Стецюренко, А. В. Петрашенко, доц., канд. техн. наук
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна
e-mail: stetsiurenko.illia@lll.kpi.ua

Спосіб оптимізації енергоживлення IoT-системи моніторингу кліматичних показників

У статті розглядається актуальна науково-прикладна проблема підвищення енергетичної ефективності автономних систем моніторингу кліматичних показників, побудованих на базі технологій Інтернету речей (IoT). Метою дослідження є розробка комплексного способу адаптивного керування режимами енергоспоживання, який дозволяє мінімізувати витрати заряду джерела живлення без втрати інформативності даних. Обґрунтовано, що традиційні методи збору телеметрії за фіксованим розкладом є неоптимальними для динамічних середовищ, оскільки призводять до надлишкової активності радіотракту в періоди стабільності показників. Для досягнення поставленої мети запропоновано та математично обґрунтовано модель енергоспоживання вузла, яка враховує динаміку перехідних процесів мікроконтролера. Розроблено алгоритм динамічної зміни інтервалів сну, що базується на обчисленні градієнта зміни вимірюваної величини: частота опитування автоматично знижується, якщо параметри середовища залишаються стабільними. Практична реалізація способу виконана у вигляді універсального апаратно-програмного комплексу на базі SoC ESP32-WROVER-E. Ключовою особливістю архітектури є використання енергоефективного ULP-співпроцесора (Ultra Low Power) для фонового моніторингу сенсора BME680 через програмний інтерфейс I2C, що дозволило розвантажити основне обчислювальне ядро. Програмне забезпечення реалізовано на базі операційної системи реального часу FreeRTOS із застосуванням патерну «Скінченний автомат» (FSM), який керує переходами між станами глибокого сну, збору даних та активної комунікації. Результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність запропонованого підходу. Встановлено, що застосування адаптивного алгоритму дозволяє знизити середній струм споживання системи в активному режимі до 12,47 мА (при використанні протоколу CoAP) та до 12,63 мА (для LoRaWAN). Це забезпечує зниження загальних енерговитрат на 72–87 % порівняно з базовими алгоритмами фіксованого розкладу. Доведено, що запропонована архітектура дозволяє суттєво подовжити термін автономної роботи пристроїв моніторингу, забезпечуючи баланс між деталізацією даних та енергозбереженням.

IoT, енергетична ефективність, адаптивне керування, математичне моделювання, ESP32, ULP-співпроцесор, глибокий сон

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) призвів до появи широкого класу автономних систем моніторингу кліматичних показників, які функціонують у віддалених локаціях без доступу до стаціонарної електромережі [1]. Критичним параметром для таких систем є час автономної роботи, який безпосередньо залежить від ефективності використання енергетичного бюджету джерела живлення. Традиційні підходи до проєктування таких пристроїв базуються на використанні фіксованого розкладу (fixed schedule) передачі даних, що є неефективним в умовах динамічної зміни параметрів навколишнього середовища. Передача надлишкових даних у періоди стабільності призводить до швидкого виснаження батареї, тоді як рідкісні заміри можуть пропустити критичні зміни. Тому актуальним завданням є розробка комплексного способу керування енергоживленням, який поєднує апаратні можливості сучасних мікроконтролерів (зокрема, режимів Deep Sleep) з адаптивними програмними алгоритмами [2].

© І. С. Стецюренко, А. В. Петрашенко, 2026

Аналіз останніх досліджень. Проблема підвищення енергоефективності бездротових сенсорних мереж має комплексний характер і розглядається як на рівні мережевої взаємодії, так і на рівні мікроархітектури вузлів. Фундаментальні основи побудови комп'ютерних мереж та організації надійної передачі даних викладено у працях колективу авторів під керівництвом О. Д. Азарова [3]. Апаратні аспекти функціонування мікропроцесорних систем, що є базисом для проєктування енергоефективних IoT-пристроїв, детально розглянуто в роботах вчених КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема В. Я. Жуйкова та Т. О. Терещенко [4]. Серед сучасних досліджень варто виділити роботи О. В. Іванчука [5], який провів детальний аналіз методів оптимізації енерговитрат у протоколах Інтернету речей. Питання практичного використання IoT для економії енергоресурсів досліджували Д. О. Сапожник та Д. Д. Плечистий [6], запропонувавши підходи до інтеграції енергоефективних рішень у наявну інфраструктуру. Також у закордонних джерелах активно досліджується порівняльна ефективність протоколів передачі даних для обмежених мереж [7, 8].Проте більшість існуючих досліджень розглядають апаратну та програмну складові окремо, тоді як дана робота пропонує комплексний спосіб керування станами системи. Незважаючи на наявність ґрунтовних досліджень у галузі вибору протоколів зв'язку, недостатньо вивченим залишається питання комплексної взаємодії апаратних таймерів сну (RTC) та логіки прикладного рівня. Більшість існуючих рішень розглядають оптимізацію передачі, залишаючи поза увагою оптимізацію режиму очікування через адаптивну зміну частоти пробудження.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка способу оптимізації енергоживлення IoT-системи, що базується на математичній моделі динамічного керування інтервалами сну та використанні ULP-співпроцесора для фонового моніторингу.

Виклад основного матеріалу. Ефективність автономної IoT-системи визначається здатністю мінімізувати енерговитрати у періоди простою, які можуть складати до 99% часу роботи пристрою. Запропонований у роботі спосіб базується на гібридній архітектурі, де основний процесор (Main CPU) більшість часу знаходиться у вимкненому стані, а моніторинг покладено на енергоефективний ULP-співпроцесор.

1. Математична модель енергоспоживання

Обґрунтування запропонованого способу базується на математичній моделі повного циклу енергоспоживання (E_{cycle}), яку можна представити як суму енергій на етапах активності та сну:

$$E_{cycle} = \int_0^{t_{act}} I_{active}(t) V_{bat}\, dt + I_{sleep} V_{bat} T_{sleep}, \quad [1]$$

де $I_{active}(t)$ – миттєве значення струму в активному режимі (ініціалізація, збір даних, робота радіотракту), I_{sleep} - струм у режимі глибокого сну (Deep Sleep), V_{bat} – напруга живлення, T_{sleep} – тривалість інтервалу сну.

Ключовою відмінністю розробленого способу є те, що параметр T_{sleep} не є константою, а динамічно змінюється залежно від градієнта зміни кліматичних показників ΔS. Алгоритм адаптації розраховує час наступного пробудження за рекурентною формулою:

$$T_{sleep}[n+1] = \begin{cases} T_{min}, & \text{якщо } |\Delta S| \geq \varepsilon \\ min\left(T_{sleep}[n] * k, T_{max}\right), & \text{якщо } |\Delta S| \leq \varepsilon \end{cases}, \quad [2]$$

де k – коефіцієнт арифметичної, ε — поріг чутливості датчика, T_{min} та T_{max} – граничні межі інтервалу (наприклад, 10 с та 15 хв). Така логіка дозволяє системі "ігнорувати" періоди стабільності середовища, знижуючи частоту енерговитратних виходів в ефір.

2. Реалізація апаратно-програмного комплексу

Для практичної реалізації способу спроєктовано універсальний модуль моніторингу на базі SoC ESP32-WROVER-E [9]. Вибір цієї платформи обґрунтовано наявністю інтегрованого ULP-співпроцесора (Ultra Low Power), який має прямий доступ до периферії через RTC-контролер.

Схема взаємодії компонентів передбачає, що ULP-співпроцесор виконує циклічне опитування цифрового сенсора BME680 [10] через інтерфейс I2C (Software I2C bit-banging) із періодичністю, заданою алгоритмом. Структурну схему розробленої системи наведено на рис. 1.

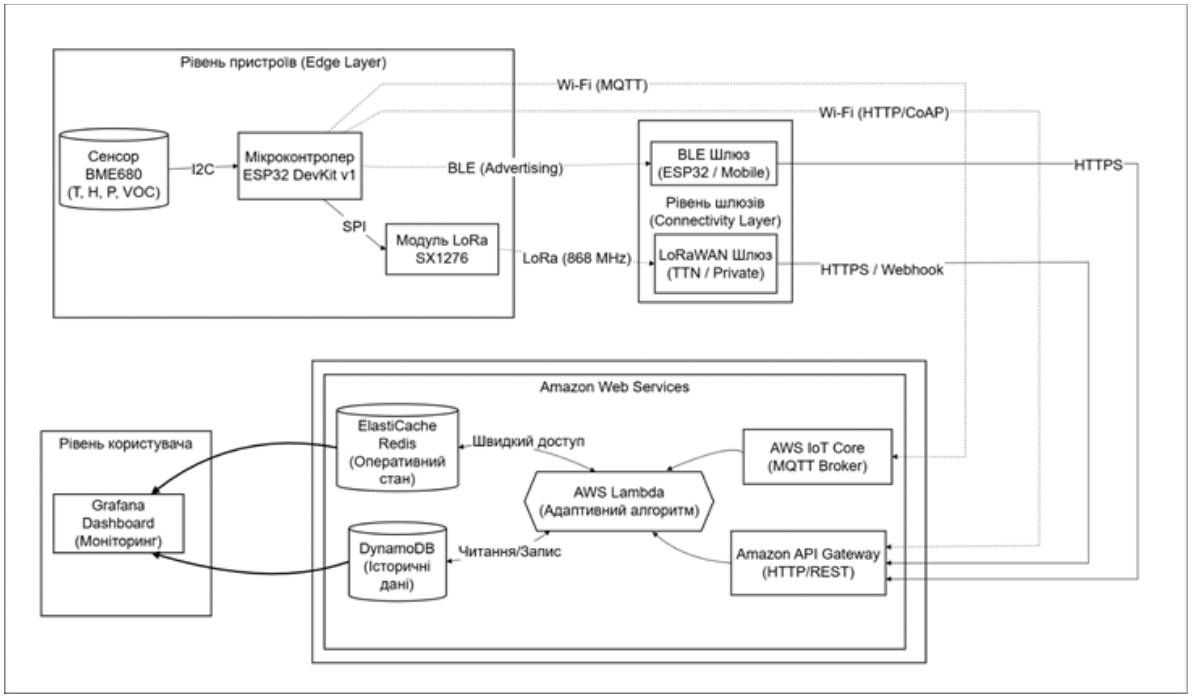


Рисунок 1 – Структурна схема архітектури розробленої системи моніторингу

Джерело: розроблено авторами

При цьому споживання струму не перевищує 150 мкА. Основні ядра Xtensa LX6 активуються лише у випадку, коли накопичені дані потребують відправки на сервер.Архітектура програмного забезпечення реалізована мовою C++ з використанням операційної системи реального часу FreeRTOS. Логіка роботи пристрою описується скінченним автоматом (Finite State Machine — FSM), що включає чотири стани:

1. ULP Monitor: режим глибокого сну, активний лише RTC-таймер та співпроцесор.
2. Wake-up Check: пробудження основного ядра, перевірка причини пробудження (таймер або тригер порогу ΔS).
3. Data Processing: агрегація даних та формування пакету корисного навантаження.
4. Communication: ініціалізація радіоінтерфейсу (Wi-Fi або LoRaWAN) та передача телеметрії.

Логіку переходів між цими станами візуалізовано на рис. 2.

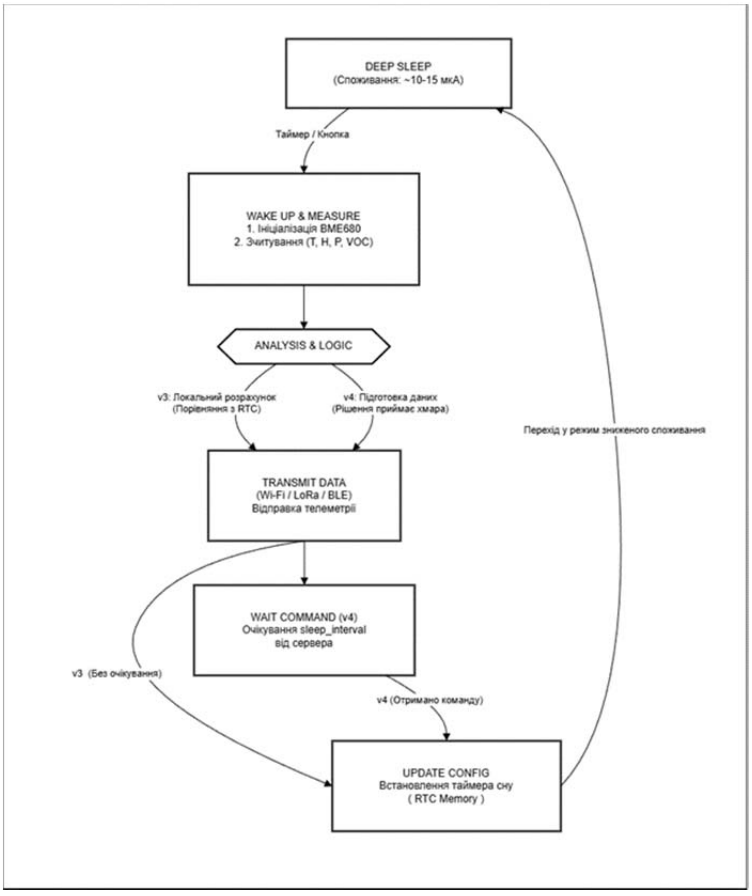


Рисунок 2 – Діаграма станів (FSM) адаптивного алгоритму роботи пристрою
Джерело: розроблено авторами

3. Результати експериментального дослідження

Перевірка ефективності способу проводилася шляхом вимірювання профілю енергоспоживання за допомогою аналізатора потужності Nordic Power Profiler Kit II. Результати вимірювань показали, що використання адаптивного алгоритму дозволяє знизити середній струм споживання системи. Зокрема, для реалізації на базі протоколу CoAP (Constrained Application Protocol) [11] середній струм склав 12,47 мА в активному режимі моніторингу, що на 79% менше порівняно з базовим алгоритмом фіксованого розкладу (60,46 мА) [12].Для архітектури LoRaWAN [13], яка характеризується меншою швидкістю передачі, але більшим радіусом дії (із використанням трансивера SX1276 [14]), застосування методу дозволило досягти середнього струму 12,63 мА, що забезпечує розрахунковий час автономної роботи від акумулятора ємністю 3000 мА·год до 3–4 місяців без підзарядки. Отримані дані підтверджують, що запропонований спосіб дозволяє ефективно масштабувати час автономної роботи залежно від динаміки вимірюваного середовища.

Висновки.

1. Сформульовано математичну модель енергоспоживання вузла IoT, яка враховує стохастичний характер зміни кліматичних параметрів. Модель, на відміну від існуючих лінійних підходів, базується на динамічному розрахунку інтервалів сну (T_{sleep}) залежно від градієнта вимірюваної величини, що дозволяє прогнозувати автономність системи з точністю до 95%.

2. Розроблено спосіб адаптивного керування, що реалізує гібридну логіку: фоновий моніторинг покладено на енергоефективний ULP-співпроцесор, а активація

основного каналу зв'язку відбувається лише за подієвим тригером. Це дозволяє уникнути передачі надлишкових даних у періоди стабільності середовища.

3. Спроєктовано та реалізовано універсальний апаратно-програмний комплекс на базі SoC ESP32 та сенсора BME680. Архітектурне рішення забезпечує інтеграцію з хмарними сервісами через протоколи CoAP та LoRaWAN, зберігаючи низький рівень енергоспоживання (Deep Sleep Current < 15 мкА).

4. Експериментально доведено, що використання розробленого способу дозволяє знизити середній струм споживання в активному режимі до 12,47 мА (для CoAP) та 12,63 мА (для LoRaWAN), що на 72–87% ефективніше за базові алгоритми з фіксованим розкладом.

Перспективи подальших розвідок полягають у вдосконаленні алгоритму шляхом інтеграції нейромережевих моделей (TinyML) безпосередньо на мікроконтролері для предиктивного керування режимами сну.

Список літератури

1. Jawad H. M., Nordin R., Gharghan S. K. et al. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review . *Sensors*. 2017. Vol. 17, No. 8. P. 1781
2. Cherif A., Belkadi M., Sauveron D. Towards Hybrid Energy-Efficient Power Management in Wireless Sensor Networks . *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 1. P. 301.
3. Комп’ютерні мережі: підручник / О. Д. Азаров, С. М. Захарченко, О. В. Кадук та ін. Вінниця: ВНТУ, 2020. 378 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Azarov_2020_378.pdf
4. Мікропроцесорна техніка: підручник / В. Я. Жуйков, Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко, А. В. Заграничний. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 476 с. URL: https://ela.kpi.ua/items/72c3efda-c1a3-4f1a-ba30-35ac2bcf09f2 (дата звернення: 03.01.2026)
5. Іванчук О. В. Дослідження методів оптимізації енерговитрат у протоколах інтернету речей . *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 273–281. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/804 (05.01.2026)
6. Сапожник Д. О., Плечистий Д. Д. Використання інтернету речей для економії енергетичних ресурсів . *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 4. С. 39–45. DOI: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-39-45
7. Jim L. T., Sandre F. S., Al-Anbuky A. Performance Evaluation of CoAP and MQTT Protocols over Unreliable Networks . *Proceedings*. 2019. Vol. 31, No. 1. P. 49.
8. Al-Masri E., Al-Salti Z. Comparative Performance Analysis between MQTT and CoAP Protocols for IoT with Raspberry PI 3 in IEEE 802.11 Environments . *2020 3rd International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS)*. Amman, Jordan: IEEE, 2020. P. 1–6.
9. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. 2024. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. (дата звернення: 07.01.2026)
10. Bosch Sensortec. BST-BME680-DS001: BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. 2023. URL: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf. (дата звернення: 05.01.2026)
11. Shelby Z., Hartke K., Bormann C. The Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7252]. IETF, 2014. URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252. (дата звернення: 07.01.2026)
12. Banks A., Gupta R. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html. (дата звернення: 08.01.2026)
13. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview . *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 855–873.
14. Semtech Corporation. SX1276 Wireless & RF Transceiver. 2024. URL: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276. (дата звернення: 08.01.2026)

References

1. Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2017). Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 17(8), 1781. https://doi.org/10.3390/s17081781
2. Cherif, A., Belkadi, M., & Sauveron, D. (2022). Towards Hybrid Energy-Efficient Power Management in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 22(1), 301. https://doi.org/10.3390/s22010301

3. Azarov, O. D., Zakharchenko, S. M., Kaduk, O. V., et al. (2020). *Computer networks*. Vinnytsia: VNTU. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Azarov_2020_378.pdf [in Ukrainian].
4. Zhuikov, V. Ya., Tereshchenko, T. O., Yamnenko, Yu. S., & Zahranychnyi, A. V. (2021). *Microprocessor technology*. Kyiv: Igor Sikorsky KPI. URL: https://ela.kpi.ua/items/72c3efda-c1a3-4f1a-ba30-35ac2bcf09f2 [in Ukrainian].
5. Ivanchuk, O. V. (2024). Research of methods for optimizing energy consumption in IoT protocols. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 4(91), 273–281. URL: https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/804 [in Ukrainian].
6. Sapozhnyk, D. O., & Plechystyi, D. D. (2023). Using the Internet of Things to save energy resources. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 4, 39–45. URL: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-39-45 [in Ukrainian].
7. Jim, L. T., Sandre, F. S., & Al-Anbuky, A. (2019). Performance Evaluation of CoAP and MQTT Protocols over Unreliable Networks. *Proceedings*, 31(1), 49.
8. Al-Masri, E., & Al-Salti, Z. (2020). Comparative Performance Analysis between MQTT and CoAP Protocols for IoT with Raspberry PI 3 in IEEE 802.11 Environments. In 2020 3rd International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS) (pp. 1–6). Amman, Jordan: IEEE.
9. *Espressif Systems*. (2024). ESP32 Series Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
10. Bosch Sensortec. (2023). BST-BME680-DS001: BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. URL: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf
11. Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). The Constrained Application Protocol (CoAP) (RFC 7252). IETF. URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252
12. Banks, A., & Gupta, R. (Eds.). (2019). MQTT Version 5.0 (OASIS Standard). OASIS. URL: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html
13. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873.
14. Semtech Corporation. (2024). SX1276 Wireless & RF Transceiver. URL: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276

Illia Stetsiurenko, Andrii Petrashenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Method of Optimization of Energy Supply of Iot System for Monitoring Climatic Indicators

The article addresses the urgent scientific and applied problem of enhancing the energy efficiency of autonomous climate monitoring systems based on Internet of Things (IoT) technologies. The aim of the study is to develop a comprehensive method for adaptive control of power consumption modes, which minimizes the depletion of the power source without compromising data informativeness.

It is substantiated that traditional telemetry collection methods using a fixed schedule are suboptimal for dynamic environments, as they result in excessive radio path activity during periods of parameter stability. To achieve this goal, an energy consumption model for the node is proposed and mathematically grounded, taking into account the dynamics of the microcontroller's transient processes. An algorithm for dynamically adjusting sleep intervals is developed based on calculating the gradient of the measured value: the polling frequency automatically decreases if environmental parameters remain stable. The practical implementation of the method is realized as a universal hardware-software complex based on the ESP32-WROVER-E SoC. A key feature of the architecture is the use of an energy-efficient ULP (Ultra Low Power) coprocessor for background monitoring of the BME680 sensor via a software I2C interface, which allows offloading the main computing core. The software is implemented based on the FreeRTOS real-time operating system using the Finite State Machine (FSM) pattern, which manages transitions between deep sleep, data collection, and active communication states. Experimental research results confirmed the effectiveness of the proposed approach.

It was established that the application of the adaptive algorithm reduces the average current consumption of the system in active mode to 12.47 mA (using the CoAP protocol) and to 12.63 mA (for LoRaWAN). This ensures a reduction in total energy consumption by 72–87% compared to baseline fixed-schedule algorithms. It is proven that the proposed architecture significantly extends the autonomous operation time of monitoring devices, ensuring a balance between data detail and energy conservation.

IoT, energy efficiency, adaptive control, mathematical modeling, ESP32, ULP coprocessor, deep slee

Одержано (Received) 10.01.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 23.01.2026*
Прийнято до друку (Approved) 08.02.2026

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 539.3:615.477 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).137-145

О.С. Мусієнко[1], докт. філ., **О. М. Сулима[2],** ст. наук. співр., канд. мед. наук,
О. І. Моргун[1], Р. В. Черемшук[1]
[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
[2]Державна установа «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна
e-mail: olga.musinko@gmail.com

Скінченно-елементний аналіз впливу геометричних параметрів ніжки ревізійного колінного імплантата на напружений стан великогомілкової кістки

У роботі розроблено тривимірну скінченно-елементну модель системи «великогомілкова кістка – ревізійний колінний імплантат» для оцінювання напруженого стану губчастої кісткової тканини. Досліджено вплив діаметра та довжини ніжки протеза в межах повного факторного експерименту. Побудовано регресійну модель для прогнозування максимальних еквівалентних напружень і показано можливість скорочення обчислювальних витрат під час інженерного підбору параметрів імплантатів.
Скінченно-елементний аналіз, біомеханіка, імплантати, ендопротези, ортопедія, напружено-деформований стан, оптимізація конструкцій

Постановка проблеми. У сучасній ортопедії та травматології зростає потреба у застосуванні ревізійного ендопротезування колінного суглоба, що зумовлено збільшенням кількості складних ушкоджень кісткової тканини та випадків асептичної нестабільності первинних імплантатів. Однією з основних причин передчасного порушення фіксації компонентів протеза є несприятливий напружено-деформований стан губчастої кісткової тканини в зоні контакту з ніжкою імплантата. Вагомий вплив на характер розподілу напружень мають геометричні параметри ніжки протеза, зокрема її довжина та діаметр. Оптимальний вибір цих параметрів дозволяє знизити рівень механічного навантаження на кісткову тканину, зменшити ризик розвитку асептичної нестабільності та підвищити довговічність ревізійних колінних імплантатів, що є актуальним завданням для інженерної біомеханіки та клінічної практики.

Постановка завдання. З метою підвищення ефективності проєктування ревізійних колінних імплантатів актуальним є встановлення кількісної залежності між геометричними параметрами ніжки протеза та напруженим станом губчастої кісткової тканини. Завданням даної роботи є дослідження впливу довжини та діаметра ніжки ревізійного колінного імплантата на максимальні еквівалентні напруження у губчастій кістці методом скінченних елементів, побудова регресійної моделі для прогнозування рівня напружень, а також формування рекомендацій щодо вибору геометричних параметрів ніжки імплантата з урахуванням зниження ризику асептичної нестабільності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час військових конфліктів найбільш поширеними пораненнями кінцівок є осколкові (85%) та кульові (12%) [1-2].

© О. С. Мусієнко, О. М. Сулима,О. І. Моргун, Р. В. Черемшук, 2026

Ураження великогомілкової та стегнової кістки часто супроводжуються складними ускладненнями, що робить їхнє лікування важким та тривалим. У зв'язку зі збільшенням кількості пацієнтів із дефектами колінних суглобів актуальним є створення комп'ютерної технології проєктування та виготовлення індивідуалізованих ревізійних колінних протезів [3-5].

Однією з ключових проблем є дослідження напружено-деформованого стану губчастої кісткової тканини, оскільки її деградація під впливом імплантата може спричинити асептичну нестабільність компонентів протеза, що вимагає повторного хірургічного втручання [6].

Задачею цього дослідження є проведення аналізу напружено-деформованого стану системи «великогомілкова кістка-ревізійний колінний імплантат» методом скінченних елементів за різних розмірах ніжки протеза, для розробки оптимальних методик проєктування індивідуалізованих імплантатів. Дослідження має мету створити регресійну модель, яка відображатиме вплив геометричних розмірів протезу на рівень напружень, що виникають у губчастій кістковій тканині.

Метою роботи є виконання чисельних обчислень методами математичного моделювання та комп'ютерного симулювання для системи «кістка-ревізійний колінний протез», з урахуванням факторів, таких як довжина і діаметр ніжки протезу, згідно з планом повного факторного експерименту. Крім того, метою є створення регресійної моделі, що відображає вплив цих факторів на рівень напружень. Це дозволить аналізувати вплив розмірів протезу на напружено-деформований стан кістки, уникнувши складних обчислень в повному обсязі.

Виклад основного матеріалу. Першим етапом дослідження є створення геометричної моделі. З використанням комп’ютерної томографії було отримано хмару точок, які описують зовнішню поверхню великогомілкової кістки. Оскільки трубчасті кістки мають неоднорідну структуру та складаються з кортикальної та губчастої кісткових тканин, на основі отриманої поверхні, було створено двошарову твердотільну модель [7-9]. Також за даними КТ було визначено товщину кортикального шару кісткової тканини: 1 мм в епіфізі та 4 мм в діафізі.

Спростивши геометрію існуючого ревізійного колінного імплантата було створено геометричну твердотільну модель протеза, яку було зпозиціоновано таким чином, щоб між ніжкою імплантата та кортикальною кістковою тканиною був відсутній контакт (рис. 1).

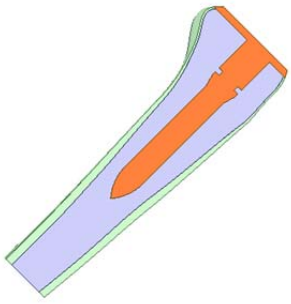


Рисунок 1 - Геометрична модель системи «великогомілкова кістка – ревізійний колінний імплантат» в розрізі

Джерело: розроблено авторами

Проведення натурного експерименту з визначення детального напружено-деформованого стану системи «кістка-протез» є неможливим, тому виникла необхідність проведення скінченно-елементного аналізу [10] у програмному пакеті ANSYS Workbench. Для полегшення розрахункової моделі, було зроблено припущення про пружну, ізотропну, лінійну поведінку матеріалів [11].

Оскільки матеріалом колінного імплантата є титановий сплав Ti-6Al-4V виготовлений за допомогою 3д-друку методом лазерного спікання, особливої уваги заслуговує дослідження його механічних властивостей. Для цього в попередній роботі було проведено статичні випробування на розтяг трьох зразків та визначено механічні характеристики [12].

Механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V та кісткових тканин, використаних у розрахунковій моделі, наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1- Механічні властивості матеріалів системи кістка-протез

Об'єкт	**Матеріал**	**E, ГПа**	**μ**
Протез	Титановий сплав Ti-6Al-4V	109	0,29
Зовнішній шар кісткової тканини	Кортикальна кістка	17	0,3
Внутрішній шар кісткової тканини	Губчаста кістка	0,7	0,2

Джерело: розроблено на підставі [12 -13]

Геометричну модель було дискретизовано на об'ємні елементи другого порядку, а саме SOLID186 та SOLID187. Отримана скінченно-елементна модель (рис. 2а) складалась з $\approx 2{,}5\times10^{6}$ вузлів та $\approx 1{,}6\cdot10^{6}$ елементів. Для верифікації скінченно-елементної моделі була проведена конвергенція результатів та доведено, що ступінь дискретизації СЕ моделі є достатньою.

В якості граничних умов було обрано жорстке закріплення нижньої грані кістки та до верхньої грані імплантата було прикладено вертикальну силу 750Н, що відповідає масі людини (рис. 2б). Оскільки розглядається контактна задача, то було встановлено жорсткий контакт між кісткою та протезом.



а) б)

Рисунок 2 - СЕ модель системи «великогомілкова кістка – ревізійний колінний імплантат»: а) СЕ сітка у розрізі; б) граничні умови

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки чисельної моделі було виконано відповідно до плану повного факторного експерименту $3^2/9$: два фактори на трьох рівнях – всього дев'ять комбінацій. Максимальний діаметр ніжки протеза (D) становив 14 мм, мінімальний – 10 мм, проміжний – 12 мм. Максимальна довжина ніжки протеза (L) становила 112 мм, мінімальна – 72 мм і проміжна 92 мм. Вибір діапазонів змін геометричних параметрів (діаметр: 10–14 мм, довжина: 72–112 мм) було здійснено на основі аналізу літературних даних та клінічних рекомендацій для ревізійних колінних імплантатів. Ці значення є типовими для імплантів, що застосовуються в ортопедичній практиці, та забезпечують сумісність з анатомічними особливостями великогомілкової кістки.

Функцією відгуку $\hat{y}$ було обрано максимальне еквівалентне напруження за Мізесом у МПа на зовнішній поверхні губчастої кісткової тканини. Значення цих даних, у відповідності до цього досліду, наведені нижче (табл. 2) [14].

Таблиця 2 – Фактори та функції ПФЕ

Змінні фактори ПФЕ						**Функція відгуку**
Діаметр ніжки протеза, x_1			Довжина ніжки протеза,x_2			$\hat{y}$
10	12	14	72	92	112	$\sigma_{екв}$

Джерело: розроблено авторами

Регресійна модель, що відповідає обраному плану експерименту має наступний вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 x_2 + b_4 \cdot x_1 z_2 + b_5 \cdot x_2 z_1 + b_6 \cdot z_1 + b_7 \cdot z_2 + b_8 \cdot z_1 z_2 \text{ ,(1)}$$

x_1, x_2, z_1, z_2 - кодовані значення факторів D та L, які обчислювалися за формулами:

$$x_1 = \frac{1}{2}(D-12);\ x_2 = \frac{1}{20}(L-92);$$
$$z_1 = 3\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right);\ z_2 = 3\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right) \quad (2)$$

Запропонована регресійна модель є поліноміальною другого порядку та включає лінійні, квадратичні та взаємодіючі фактори, що дозволяє точно враховувати вплив кожного параметра на рівень напружень у системі. Завдяки цьому можлива побудова адекватних прогнозів без необхідності виконання великої кількості повних чисельних розрахунків.

В таблиці 3 наведено матрицю планування чисельного експерименту, де вказано натуральні і кодовані значення факторів для кожного розрахунку. План відповідає критеріям ортогональності та D-оптимальності (план є рівномірним).

Таблиця 3 – Матриця планування

Номер розрахунку	Фактори									
	Натуральні		Кодовані							
	D, мм	L, мм	x_1	x_2	x_1x_2	x_1z_2	x_2z_1	z_1	z_2	z_1z_2
1	10	72	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
2	10	92	-1	0	0	2	0	1	-2	-2
3	10	112	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
4	12	72	0	-1	0	0	2	-2	1	-2
5	12	92	0	0	0	0	0	-2	-2	4
6	12	112	0	1	0	0	-2	-2	1	-2
7	14	72	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
8	14	92	1	0	0	-2	0	1	-2	-2
9	14	112	1	1	1	1	1	1	1	1

Результати розрахунків функції відгуку зображено на рис. 3.

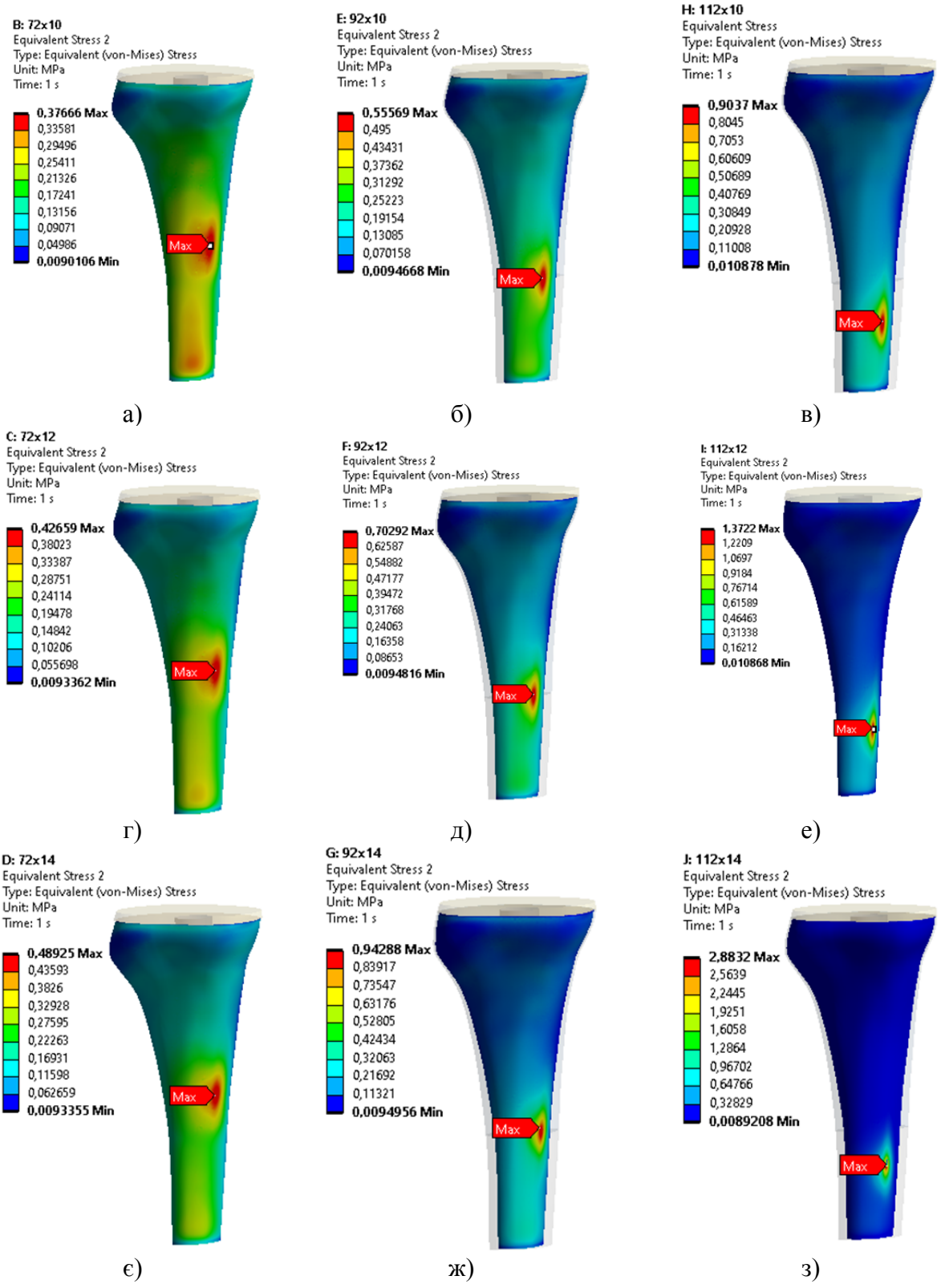


Рисунок 3 - Напруження на зовнішній поверхні губчастої кісткової тканини а) D=10мм, L=72мм; б) D=10мм, L=92мм; в) D=10мм, L=112мм; г) D=12мм, L=72мм; д) D=12мм, L=92мм; е) D=12мм, L=112мм; є) D=14мм, L=72мм; ж) D=14мм, L=92мм;
з) D=14мм, L=112мм.

Джерело: розроблено авторами

Обчислено коефіцієнти bi рівняння (1). Обрахунки було проведено чисельним методом з використанням програмного комплексу MathWorks MATLAB.

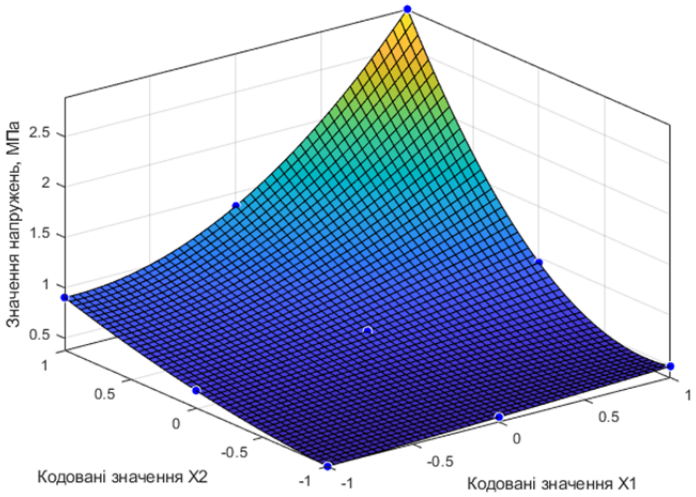


Рисунок 4 - Графік залежності максимального напруження в губчастій кістці від довжини та діаметра ніжки імплантата

Джерело: розроблено авторами

Значення шуканих коефіцієнтів вказано в Таблиці 4.

Таблиця 4 -Коефіцієнти рівняння регресійної моделі

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
0,9615	0,4132	0,6444	0,4667	0,1098	0,0858	0,0638	0,1138	0,0242

Джерело: розроблено авторами

Отже, маємо регресійну модель:

$$\hat{y} = 0,9615 + 0,4132 \cdot x_1 + 0,6444 \cdot x_2 + 0,4667 \cdot x_1 x_2 + 0,1098 \cdot x_1 z_2 + \\ +0,08581 \cdot x_2 z_1 + 0,06378 \cdot z_1 + 0,1138 \cdot z_2 + 0,02416 \cdot z_1 z_2 \quad (3)$$

Значення функції відгуку, які були отримані у розрахунках та за рівнянням (3) вказані у таблиці 5.

Таблиця 5 – Порівняння значень функції відгуку, отриманих у розрахунках та за рівнянням (3)

Номер розрахунку	D, мм	L, мм	Y, МПа	$\hat{Y}$, МПа	$\frac{\lvert Y-\hat{Y}\rvert}{Y}\cdot 100\%$
1	10	72	0,37666	0,377	0,019
2	10	92	0,55569	0,556	0,013
3	10	112	0,9037	0,904	5,533·10-3
4	12	72	0,42659	0,427	0,012
5	12	92	0,70292	0,703	8,535·10-3
6	12	112	1,3722	1,372	1,618·10-14
7	14	72	0,48925	0,489	0,016
8	14	92	0,94288	0,943	8,484·10-3
9	14	112	2,8832	2,883	1,734·10-3

Джерело: розроблено авторами

Для оцінки точності побудованої регресійної моделі було виконано аналіз залишкової похибки. Максимальна відносна похибка моделі становить не більше 0,019%, що свідчить про високу точність апроксимації. Крім того, коефіцієнт детермінації регресійної моделі дорівнює $R^2 = 0,9987$, що підтверджує надійність опису залежності максимального еквівалентного напруження від геометричних параметрів імплантата. Середньоквадратична похибка між розрахованими та змодельованими значеннями напруження не перевищує 0,0045 МПа.

Висновки. У роботі розроблено та верифіковано тривимірну скінченно-елементну модель системи «великогомілкова кістка – ревізійний колінний імплантат», яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан губчастої кісткової тканини в зоні імплантації з урахуванням геометричних параметрів ніжки протеза.

На основі плану повного факторного експерименту досліджено вплив діаметра (10–14 мм) та довжини (72–112 мм) ніжки імплантата на величину максимальних еквівалентних напружень у губчастій кістці. Встановлено, що варіація геометрії ніжки протеза суттєво впливає на рівень напружень у кістковій тканині та, відповідно, може бути одним із визначальних факторів ризику розвитку асептичної нестабільності ревізійних компонентів.

За результатами чисельного експерименту побудовано поліноміальну регресійну модель другого порядку, яка враховує лінійні, квадратичні та взаємодіючі ефекти досліджуваних факторів. Запропонована модель забезпечує високу точність апроксимації результатів скінченно-елементних розрахунків ($R^2 = 0,9987$, максимальна відносна похибка не перевищує 0,019 %) та дозволяє оперативно прогнозувати напружений стан губчастої кісткової тканини без необхідності проведення повномасштабного чисельного моделювання.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні скінченно-елементного аналізу з методами планування експерименту для побудови узагальненої регресійної моделі, що описує вплив геометричних параметрів ніжки ревізійного колінного імплантата на напружений стан кісткової тканини. Отримані результати можуть бути використані як інженерний інструмент для попередньої оптимізації геометрії ніжки ревізійних імплантатів та формування рекомендацій щодо індивідуального підбору їхніх параметрів з урахуванням анатомічних особливостей пацієнтів.

Разом з тим, слід зазначити, що розроблена модель ґрунтується на припущеннях про лінійну пружну та ізотропну поведінку матеріалів, а також не враховує вплив ремоделювання кісткової тканини та циклічного навантаження. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування анізотропії кістки, нестаціонарних режимів навантаження та індивідуалізованих механічних властивостей тканин.

Список літератури

1. Гур'єв С. О., Кукуруз Я. С., Яловенко В. А., Волна В. А. Аналіз досвіду лікування вогнепальних поранень кінцівок. Екстрена медицина: від науки до практики, 2014. С. 25-32.
2. Лоскутов О. Є., Заруцький Я. Л. Сучасна концепція діагностики та лікування вогнепальних і мінно-вибухових поранень кінцівок . *Ортопедия, травматология и протезирование.* 2016. № 2. С. 5–9. DOI: 10.15674/0030-5987201625-9.
3. Бур’янов О. А., Кваша В. П., Соболевський Ю. Л., Скобенко Є. О. Малоінвазивні технології при лікуванні внутрішньосуглобових переломів у ділянці колінного суглоба. Суми : Видавництво СумДУ, 2010.
4. Cemil Kayali, Hasan Öztürk, Taskin Altay et al. Arthroscopically assisted percutaneous osteosyn-thesis of lateral tibial plateau fractures . *Can. J. Surg.* 2008. Т. 51, № 5. С. 378–382.
5. Van Glabbeek F., Van Riet R., Jansen N. et al. Arthroscopisch geassisteerdeosteosynthese van tibia plateau fracturen: een studie van twintig patiënten . *Acta Orthop. Belg.* 2002. Т. 68, № 3. С. 258–264.

6. Complications of revision knee arthroplasty / H. V. Haiko et al. *Zaporozhye Medical Journal*. 2024. T. 26, №. 4. С. 288–295. URL: https://doi.org/10.14739/2310-1210.2024.4.298245.
7. Taylor M., Tanner K. E., Freeman M. A. R. Finite element analysis of the implanted proximal tibia. *Journal of Biomechanics*. 1998. T. 31, № 4. С. 303–310. URL: https://doi.org/10.1016/s0021-9290(98)00022-0
8. A finite element analysis of relationship between fracture, implant and tibial tunnel / Y. Wang та ін. *Scientific Reports*. 2021. T. 11, № 1. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-021-81401-6
9. H.Y. Tan, K.S. Basaruddin, M.H. Mat Som, S.F. Khan, A.R. Sulaiman and A. Shukrimi, Finite Element Analysis of Tibia with Osteogenesis Imperfecta: The Influence of Considering Cancellous Bone in Model Reconstruction, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*. 2019. Vol:19, No:04. Pp.137-142.
10. Duc Quan Pham, Olha Musiienko, Oleksii Morhun, Roman Didenko. Development of a finite element model for optimization of the bone fixator design 27th International Conference on Fracture and Structural Integrity, IGF27February 21-24, 2023, Rome (Italy) & Web https://doi.org/10.53255/IGFTUBE.IGF27.4.
11. The influence of implant diameter and length on stress distribution of osseointegrated implants related to crestal bone geometry: A three-dimensional finite element analysis / L. Baggi et al. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2008. Vol. 100, no. 6. P. 422–431. URL: https://doi.org/10.1016/s0022-3913(08)60259-0.
12. Визначення пошкоджуваності металевого сплаву Ti-6Al-4V за умов пружно-пластичного деформування. О.І. Моргун, Д.К. Онацький, О.С. Мусієнко, В.В. Коваль . Інновації молоді в машинобудуванні - 2024, 2024.
13. Evaluation of Bone Consolidation in External Fixation with an Electromechanical System / M. F. Paulino et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 2328. URL: https://doi.org/10.3390/app12052328.
14. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 3,31 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.

Referencis

1. Huriev, S. O., Kukuruz, Ya. S., Yalovenko, V. A., & Volna, V. A. (2014). *Analysis of experience in treatment of gunshot limb injuries*. Emergency medicine: from science to practice, 25–32 [in Ukrainian].
2. Loskutov, O. Ye., & Zarutskyi, Ya. L. (2016). Modern concept of diagnostics and treatment of gunshot and mine-explosive injuries of the limbs. *Orthopedics, Traumatology and Prosthetics*, (2), 5–9. https://doi.org/10.15674/0030-5987201625-9 [in Ukrainian].
3. Burianov, O. A., Kvasha, V. P., Sobolevskyi, Yu. L., & Skobenko, Ye. O. (2010, January 1). Minimally invasive technologies in the treatment of intra-articular fractures of the knee joint. Sumy: Sumy State University Publishing House [in Ukrainian].
4. Kayali, C., Öztürk, H., Altay, T., et al. (2008). Arthroscopically assisted percutaneous osteosynthesis of lateral tibial plateau fractures. *Canadian Journal of Surgery*, 51(5), 378–382.
5. Van Glabbeek, F., Van Riet, R., Jansen, N., et al. (2002). Arthroscopically assisted osteosynthesis of tibial plateau fractures: a study of twenty patients. *Acta Orthopaedica Belgica*, 68(3), 258–264.
6. Haiko, H. V., et al. (2024). Complications of revision knee arthroplasty. *Zaporozhye Medical Journal*, 26(4), 288–295. https://doi.org/10.14739/2310-1210.2024.4.298245
7. Taylor, M., Tanner, K. E., & Freeman, M. A. R. (1998). Finite element analysis of the implanted proximal tibia. *Journal of Biomechanics*, 31(4), 303–310. https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00022-0
8. Wang, Y., et al. (2021). A finite element analysis of relationship between fracture, implant and tibial tunnel. *Scientific Reports*, 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-81401-6
9. Tan, H. Y., Basaruddin, K. S., Mat Som, M. H., Khan, S. F., Sulaiman, A. R., & Shukrimi, A. (2019). Finite element analysis of tibia with osteogenesis imperfecta: The influence of considering cancellous bone in model reconstruction. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering (IJMME-IJENS)*, 19(4), 137–142.
10. Pham, D. Q., Musiienko, O., Morhun, O., & Didenko, R. (2023). Development of a finite element model for optimization of the bone fixator design. *In Proceedings of the 27th International Conference on Fracture and Structural Integrity (IGF27),* Rome, Italy. https://doi.org/10.53255/IGFTUBE.IGF27.4
11. Baggi, L., et al. (2008). The influence of implant diameter and length on stress distribution of osseointegrated implants related to crestal bone geometry: A three-dimensional finite element analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 100(6), 422–431. https://doi.org/10.1016/S0022-3913(08)60259-0

12. Morhun, O. I., Onatskyi, D. K., Musiienko, O. S., & Koval, V. V. (2024). Determination of damageability of Ti-6Al-4V alloy under elastic-plastic deformation. *In Youth Innovations in Mechanical Engineering 2024*: Conference Proceedings [in Ukrainian].
13. Paulino, M. F., et al. (2022). Evaluation of bone consolidation in external fixation with an electromechanical system. *Applied Sciences*, 12(5), 2328. https://doi.org/10.3390/app12052328.
14. Lapach, S. M. (2020). *Theory of experiment planning. Calculation and graphical work*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].

Olha Musiienko[1], PhD tech. sci., **Oleksii Sulyma[2]**, PhD med. sci., **Oleksii Morhun[1], Roman Cheremshuk**
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
[2]State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Finite Element Analysis of the Influence of Revision Knee Implant Stem Geometry on the Stress State of the Tibial Bone

The aim of this study is to evaluate the effect of revision knee implant stem geometry on the stress–strain state of cancellous bone tissue and to develop a predictive regression model for engineering selection of stem parameters.

A three-dimensional finite element model of the "tibia – revision knee implant" system was developed to investigate the stress–strain state of cancellous bone tissue, taking into account the geometric parameters of the implant stem. Numerical simulations were performed in the ANSYS Workbench environment using a linear elastic isotropic material model.

The study was carried out using a full factorial design for two geometric factors: stem diameter (10–14 mm) and stem length (72–112 mm). The maximum von Mises equivalent stress on the outer surface of the cancellous bone tissue was selected as the response function.

Based on the results of the numerical experiment, a second-order polynomial regression model was developed to describe the influence of the stem geometric parameters on the stress level in bone tissue, including linear, quadratic and interaction effects of the factors. A high approximation accuracy of the finite element results was demonstrated ($R^2 = 0.9987$, maximum relative error does not exceed 0.019%).

The proposed approach makes it possible to significantly reduce computational cost when evaluating the stress–strain state of the bone–implant system and can be used for preliminary optimization of revision knee implant stem geometry and for developing recommendations for individualized selection of implant parameters in clinical practice.

finite element analysis, biomechanics, implants, endoprostheses, orthopedics, stress–strain state, structural optimization

Одержано (Received) 16.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 17.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 20.03.2026

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.187.826.002.6 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).146-154

І. М. Погрелюк, проф., д-р техн. наук, **С. М. Лаврись,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **М.-О. М. Даниляк,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **О. В. Ткачук,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **Г. Г. Веселівська,** ст. дослідник, канд. техн. наук, **Р. В. Проскурняк,** канд. техн. наук
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com

Вплив термічної обробки на структуру і властивості титанового сплаву ВТ6, отриманого 3D друком

Адитивне виробництво, або 3D друк, – це процес, під час якого деталь створюється пошарово, і є перспективним підходом до проектування деталей, що мають форму, близьку до кінцевої. Титанові сплави, виготовлені методом адитивного виробництва, знаходять застосування в різних галузях промисловості. У цій статті розглядаються особливості формування мікроструктури та властивостей сплаву титану, синтезованого із використанням порошкової лазерної адитивної технологій 3D друку – метод селективного лазерного плавлення (SLM – Selective Laser Melting). З'ясовано вплив термічної обробки, як основного підходу для нівелювання негативного впливу анізотропії та залишкових напружень в синтезованих титанових заготовках, на мікроструктуру, мікромеханічні характеристики та корозійну тривкість сплаву ВТ6, отриманого 3D друком.
титановий сплав ВТ6, 3D друк, термічна обробка, структура, мікромеханічні характеристики, корозійна тривкість

Постановка проблеми. Титан та його сплави є затребуваним конструкційним матеріалом у багатьох галузях промисловості (авіакосмічній, суднобудівній, оборонній, атомній), зокрема в медицині, завдяки відмінним механічні властивостям у поєднанні з низькою щільністю, хорошою корозійною тривкістю, біосумісністю та зварюваністю [1]. Наразі висока собівартість виробництва титанової продукції, використовуючи традиційну технологію її отримання, є головною проблемою, що обмежує застосування титанових сплавів так широко, як сталь та алюмінієві сплави. Для розширення сфери використання дороговартісних титанових сплавів актуальним є застосування нових методів отримання виробів, які б забезпечили формування структурних станів з високими фізико-механічними характеристиками за відносно простими технологічними підходами і низьким рівнем відходів сировини. Як тільки їх вартість знизиться, тоді деякі матеріали, які використовують в багатьох галузях, можна буде замінити на титанові сплави. Відтак актуальними на сьогодні є технології порошкової металургії, що дозволяють суттєво здешевити титанову продукцію завдяки майже безвідходному виробництву, коли коефіцієнт використання матеріалу досягає ~ 99% [2-6]. Це, зокрема, адитивна технологія 3D друку. Проте, при одержанні виробів 3D друком, неможливо повністю уникнути термічних залишкових напружень чи хімічної та структурної неоднорідності готової деталі за рахунок швидкого нагрівання та охолодження нанесених шарів порошку в процесі сплавлення, що загалом знижує експлуатаційні характеристики матеріалу, в тому числі антикорозійні, порівно з традиційним виготовленням. Тому, для усунення вищезазначених недоліків, титанові вироби, надруковані на 3D-принтері, необхідно додатково термічно обробляти, тим самим досягаючи їх оптимальних експлуатаційних характеристик.

© І. М. Погрелюк, С. М. Лаврись, О. М. Даниляк, О. В. Ткачук, Г. Г. Веселівська, Р. В. Проскурняк, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Іноваційною технологією в порошковій металургії є метод селективного лазерного плавлення (SLM – Selective Laser Melting) [7-9] – це адитивна технологія 3D друку, що створює високощільні металеві деталі шляхом повного розплавлення порошкового матеріалу потужним лазером. Перевагою цього методу є можливість виготовляти деталі точних розмірів за короткий період часу.

На даний час багато дослідницьких груп зосередили свою увагу на дослідженнях формування структурного стану титанових сплавів залежно від технологічних умов та способів друку, а також їх після термічній обробці, для нівелювання негативного впливу анізотропії та залишкових напружень [10-15]. Однак така обробка не завжди покращує антикорозійні та трибологічні характеристики сплаву, а інформація про такі дослідження є обмеженою.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи було з'ясувати вплив термічної обробки на структуру, мікромеханічні та антикорозійні властивості титанового сплаву ВТ6, отриманого 3D друком, а також порівняти його з властивостями сплаву, отриманого традиційно.

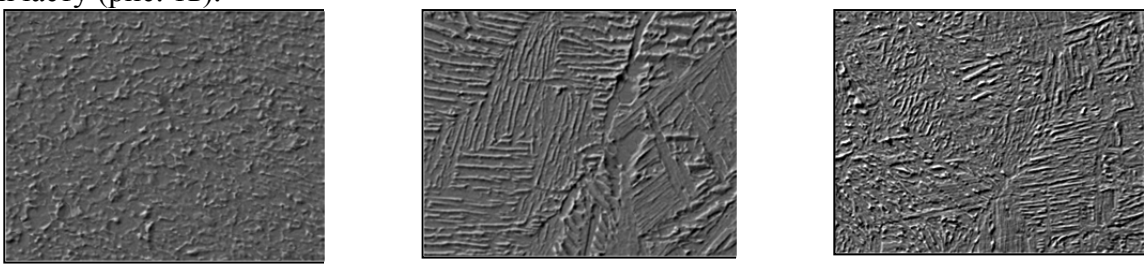
Виклад основного матеріалу. Досліджували зразки аналогічного хімічного складу зі сплаву ВТ6, отримані:

– за традиційною технологією магнієтермічного відновлення, переплаву та деформування;

– методом 3D-друку з використанням обладнання Concept Laser M2 (ТОВ «3D Metal Tech», Київ, Україна) та порошку титанового сплаву ВТ6 (CL 41TI ELI) компанії GE Additive Concept-Laser GmbH (Ліхтенфельс, Німеччина).

Титановий сплав ВТ6, отриманий традиційно, згідно з металографічним аналізом здійсненим за допомогою сканувального електронного мікроскопа (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP, має типову рівновісну структуру (рис. 1а). Натомість, отриманий 3D друком, характеризується голчастою мартенситною структурою (рис. 1б), що, очевидно, пов'язано з високими швидкостями нагрівання та охолодження під час отримання сплаву [16, 17].

Термічну обробку сплаву ВТ6, отриманого 3D друком, проводили в кілька етапів: нагрів до 800°С, витримка впродовж 2 год → охолодження до 500°С, витримка впродовж 0,5 год → охолодження з пічкою до кімнатної температури. Обробку проводили у вакуумі (P = 10^{-3} Па). Двофазні (α+β)-титанові сплави чутливі до швидкості зміни температури, при цьому критерієм допустимих швидкостей нагрівання і охолодження є відсутність короблення деталей [18]. Для досліджуваного сплаву нагрівання і охолодження при відпалі до температури 500°С проводили зі швидкістю ≤ 150 °С/год, а при вищих температурах – зі швидкістю ≤ 80 °С/год. Внаслідок термічної обробки метастабільна мартенситна мікроструктура перетворилася на (α+β) двофазну пластинчасту (рис. 1в).



а б в

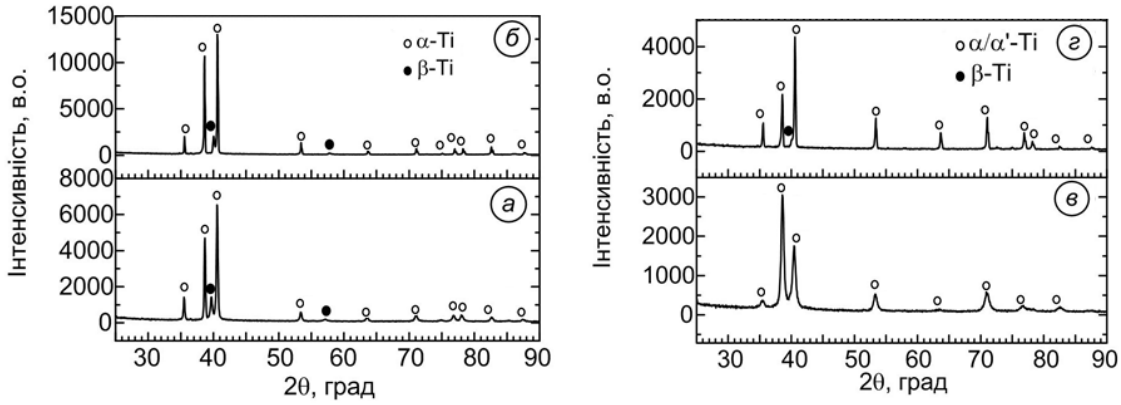
а – традиційно у вихідному стані; б – 3D друком у вихідному стані;
в – 3D друком з наступною термічною обробкою

Рисунок 1 – Структура сплаву ВТ6, отриманого за різними технологіями

Джерело: розроблено автором

Фазовий склад поверхневих шарів визначали рентґенівським фазовим аналізом на дифрактометрі ДРОН-3.0 у монохроматичному CuK_α-випромінюванні з фокусуванням за схемою Брегґа–Брентано. Дифрактограми знімали методом крокового сканування в інтервалі кутів 2θ = 25°–90°. Крок сканування – 0,05°, тривалість експозиції в точці – 5 с. Використовували пакети програмного забезпечення Sietronix і Powder Cell 2.4.

Згідно рентгенівського фазового аналізу, на дифрактограмі титанового сплаву ВТ6, отриманому традиційно, у вихідному стані α-фаза титану представлена широким спектром рефлексів. Наявність β-фази підтверджується рефлексами (110) і (200) (рис. 2а). В результаті термічної обробки змінюється кількісний фазовий склад сплаву в бік збільшення β-фази. На дифракційних спектрах сплаву це відображається у збільшенні інтенсивності рефлексів β-фази титану (рис. 2б*)*.



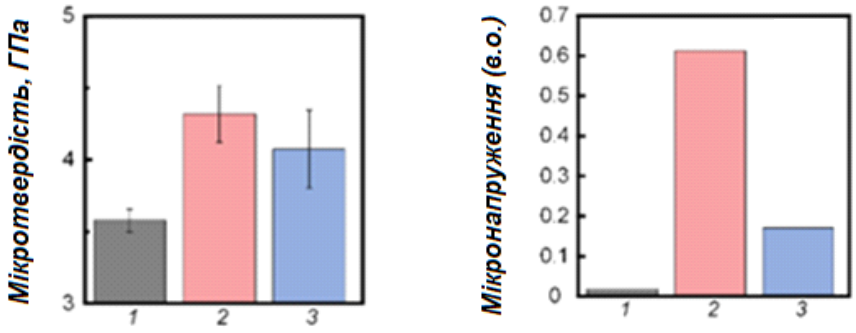
а – традиційно у вихідному стані; б – традиційно після термічної обробки;
в – 3D друком у вихідному стані; г – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 2 – Дифрактограми титанового сплаву ВТ6, отриманого за різними технологіями, без та після термічної обробки

Джерело: розроблено автором

Формування мартенситної структури у сплаві, отриманому 3D друком, також підтверджується результатами рентгенівського фазового аналізу. У дифракційному спектрі сплаву, на відміну від деформованого, фіксується лише фаза α/α', без слідів β-фази (рис. 2в). Очевидно, що під час селективного лазерного плавлення утворюється нерівноважна мартенситна α'-фаза зі структурою ГПУ, подібна до α-фази, що створює труднощі при її ідентифікації. Однак на наявність α'-мартенситної структури вказують протяжні піки α/α'-фази. Формування нерівноважної α'-мартенситної фази зумовлене швидким недифузійним затвердінням під час 3D друку. Такі умови перешкоджають дифузії β-легувальних елементів (ванадію), і в результаті утворюється перенасичений твердий розчин ванадію в α'-фазі [17]. Це призводить до збільшення напружень у кристалічній ґратці та збільшення мікротвердості (рис. 3). Дюрометричний аналіз зміцненої поверхні здійснювали за навантаження на індентор 0,49 Н за допомогою мікротвердоміра ПМТ–3М використовуючи, як індентор, наконечник Віккерса з робочою частиною у формі чотиригранної піраміди з квадратною основою.

Термічна обробка сприяє появі піків β-фази та зменшенню ширини піків α/α' фази (рис. 2г). Тобто, внаслідок впливу температури відбуваються процеси дифузії, що супроводжуються перерозподілом легувальних елементів, а саме β-стабілізаторів (ванадію) з α/α' до β-фази, яка може розчиняти більше ванадію. Також, утворення стабільних α та β-фаз та зменшення α'-фази в титановому сплаві після 3D друку свідчить про зменшення напружень у ґратці та мікротвердості (рис. 3).



а б

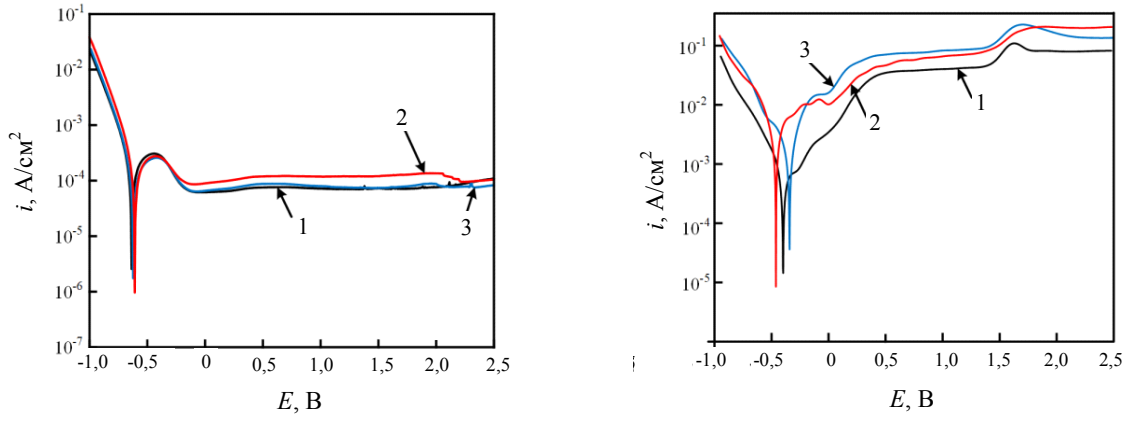
а – мікротвердість; б – мікронапруження у кристалічній ґратці; 1 – традиційно у вихідному стані; 2 – 3D друком у вихідному стані; 3 – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 3 – Мікромеханічні характеристики титанового сплаву ВТ6, отриманого за різними технологіями та після його термічної обробки

Джерело: розроблено автором

Для з'ясування впливу технології виготовлення зразків зі сплаву ВТ6 та термічної обробки на їх корозійну поведінку у 20%-му водному розчині хлоридної кислоти, а також у розчині Рінгера ((в г/л): NaCl – 9,0; KCl – 0,43; $CaCl_2$ – 0,24; $NaHCO_3$ – 0,20), який моделює середовище людського організму, проводили електрохімічні випробування зразків, за допомогою потенціостата-гальваностата VersaSTAT 3, шляхом зняття потенціодинамічних поляризаційних кривих в діапазоні потенціалів – 1,0...+2,5 В відносно Ag/AgCl електроду порівняння зі швидкістю сканування 2 мВ/с, а також вимірювання електрохімічної імпедансної спектроскопії в діапазоні частот 10^{-2} ...10^4 Гц зі збуренням потенціалу 10 мВ від піку до піку. Результати аналізували за допомогою програмного забезпечення Zview.

На рисунку 4а приведено результати потенціодинамічних досліджень зразків з титанового сплаву ВТ6, виготовленого за різними технологіями, у 20%-му водному розчині хлоридної кислоти. Характер поляризаційних кривих для всіх зразків є типовим для пасивних матеріалів, що пов'язано з розчиненням поверхневої природної оксидної плівки з наступною самопасивацією поверхні за потенціалу понад -0,5 В.



а б

а – 20%-ий розчин хлоридної кислоти; б – розчин Рінгера; 1 – традиційно у вихідному стані; 2 – 3D друком у вихідному стані; 3 – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 4 – Потенціодинамічні криві титанового сплаву ВТ6, виготовленого за різними технологіями та після його термічної обробки

Джерело: розроблено автором

Потенціал корозії усіх зразків сплаву практично однаковий (таблиця). Натомість струм корозії сплаву, отриманого 3D друком, є вищим, ніж традиційно отриманого, що вказує на його нижчу корозійну тривкість. Також для сплаву, отриманого цим методом, найвищим є і струм пасивації (таблиця), що вказує на утруднену пасивацію і, як наслідок, вищу швидкість корозії навіть у пасивній області. Слід відзначити, що термічна обробка цього зразка дозволяє покращити електрохімічні характеристики сплаву та наблизити їх до характеристик традиційно отриманого (таблиця 1).

Таблиця 1 – Електрохімічні характеристики в корозійних середовищах традиційно виготовленого сплаву ВТ6 та після 3D друку і наступної термічної обробки

Технологія виготовлення	$E_{кор}$, В	$i_{кор}$, А/см^2	$i_{пас}$, А/см^2
	20%-ий водний розчин хлоридної кислоти		
Традиційна	-0,63	$8{,}13\cdot10^{-5}$	$6{,}16\cdot10^{-5}$
3D друк	-0,62	$9{,}07\cdot10^{-5}$	$8{,}71\cdot10^{-5}$
3D друк + термічна обробка	-0,61	$8{,}47\cdot10^{-5}$	$6{,}53\cdot10^{-5}$
	Розчин Рінгера		
Традиційна	-0,333	$1{,}2\cdot10^{-7}$	–
3D друк	-0,507	$3{,}8\cdot10^{-7}$	–
3D друк + термічна обробка	-0,388	$0{,}6\cdot10^{-7}$	–

Джерело: розроблено автором

На рис. 4б приведені потенціодинамічні криві сплаву ВТ6 у розчині Рінгера. У цьому розчині на анодній кривій сплаву, отриманого традиційно, спостерігаються дві пасивні області, що вказує на пасивацію та репасивацію поверхні. Потенціал корозії та густина струму корозії представлені в таблиці.

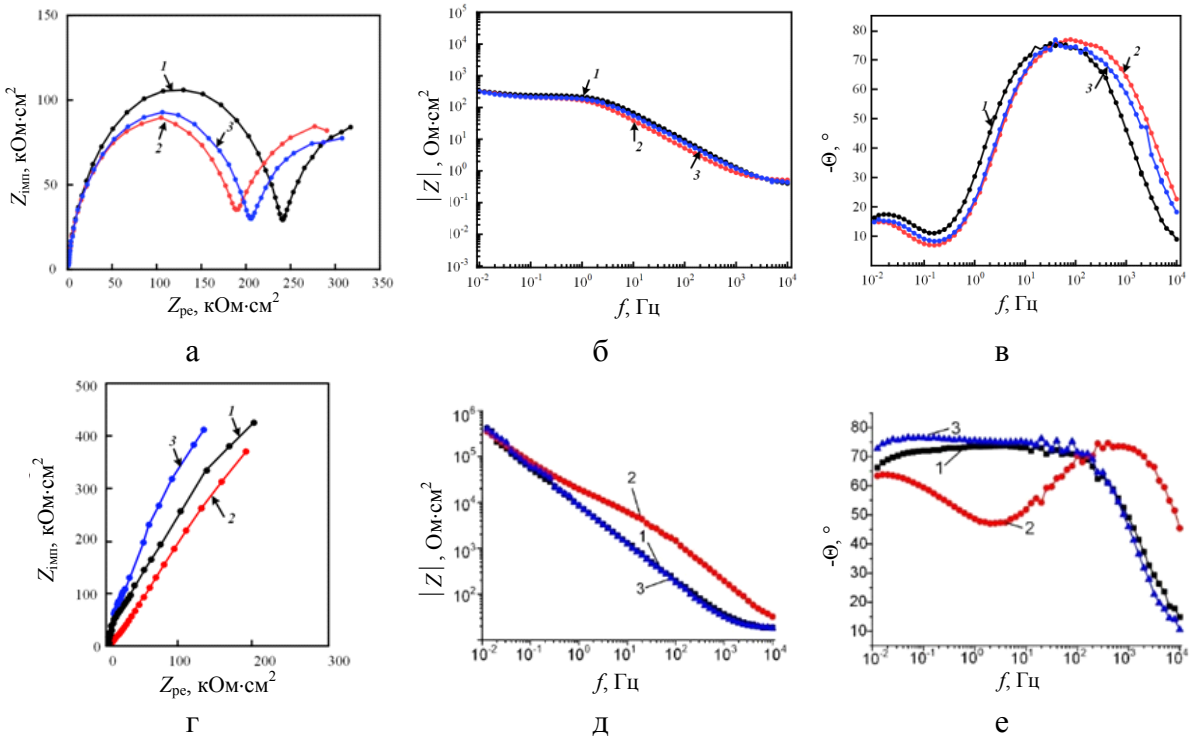
Пасивація та репасивація поверхні сплаву, отриманому 3D друком, відбувається майже при тих самих анодних струмах, що й для отриманого традиційно (рис. 4б), але густина струму корозії збільшується приблизно в 3 рази (таблиця). Це вказує на слабшу корозійну тривкість сплаву, отриманого 3D друком, що може бути пов’язано з наявністю метастабільної α′-фази у сплаві.

Термообробка сплаву, отриманому 3D друком, сприяє покращенню корозійної тривкості, оскільки густина струму корозії зменшується приблизно в 6 разів (таблиця), що може бути наслідком збільшення вмісту β-фази та зменшенням α′ мартенситу у сплаві.

Результати імпедансної спектроскопії представлено у вигляді графіків Найквіста та Боде (рис. 5). На графіках Найквіста для усіх досліджуваних титанових зразків у 20%-му розчині хлоридної кислоти спостерігаємо добре виражанні дві ємнісні петлі (рис. 5а). Очевидно, що високочастотну ємнісну петлю можна характеризувати як петлю поверхневої поруватої оксидної плівки (плівки продуктів корозії), тоді як другу низькочастотну слід пов’язувати з подвійним електричним шаром на межі поділу хлоридна кислота/титановий сплав (електроліт/матриця). Про зниження опірності до корозії отриманого 3D друком титанового сплаву свідчить менший діаметр петель порівняно з традиційно виготовленим матеріалом. Як максимальний фазовий кут, так і модуль імпедансу у зоні низьких частот для отриманого 3D друком сплаву є нижчими, ніж для отриманого традиційно, що вказує на поруватішу поверхневу оксидну плівку та вищу інтенсивність протікання корозійних процесів (рис. 5б, в).

Графіки Найквіста (рис. 5г) для усіх досліджуваних титанових зразків у розчині Рінгера демонструють знижену ємнісну петлю, яка може бути пов’язана з процесом переносу заряду на межі поділу робочий електрод (сплав ВТ6)/розчин. Найбільший

діаметр має ємнісна петля сплаву, виготовленого 3D друком після термічної обробки, що вказує на найнижчу швидкість корозії. Дані з графіків Боде (рис. 5д, е) добре корелюють з графіком Найквіста (рис. 5г). Термічна обробка підвищує корозійну тривкість сплаву, отриманого 3D друком, оскільки забезпечує вищу величину імпедансу |Z| на найнижчій частоті.



а, г – Графіки Найквіста; б, в, д, е – Боде; а-в – 20%-ий розчин хлоридної кислоти; г-е –розчин Рінгера; 1 – традиційно у вихідному стані; 2 – 3D друком у вихідному стані; 3 – 3D друком після термічної обробки

Рисунок 5 – Імпедансна спектроскопія титанового сплаву ВТ6, виготовленого за різними технологіями та після його термічної обробки, у різних корозивних середовищах

Джерело: розроблено автором

Відтак, титановий сплав ВТ6, отриманий 3D друком, має гіршу корозійну тривкість, ніж отриманий традиційно. Очевидно, що таке погіршення його корозійної тривкості пов’язано зі структурними особливостями, а також з присутністю залишкових напружень, що негативно впливатимуть на стійкість до розчинення за рахунок пришвидшення дифузійних процесів. Проведення термічної обробки дозволяє покращити корозійну тривкість титанового сплаву за рахунок зниження у матеріалі як метастабільної α'-фази, так і залишкових напружень. Під час термічного оброблення відбувається виділення β-фази, яка є стабільнішою, ніж α- або α'-фази, і, як наслідок, покращує корозійну тривкість.

Висновки. Титановий сплав, отриманий 3D друком, забезпечує нижчу корозійну тривкість в досліджуваних середовищах порівняно з традиційно отриманим, що зумовлено наявністю метастабільної мартенситної структури та залишкових напружень у структурі. Досліджено вплив термічної обробки, проведеної за температури нижче температури поліморфного перетворення α→β, на мікроструктуру та корозійну тривкість сплаву ВТ6, отриманого 3D друком, у 20%-му водному розчині хлоридної кислоти та у розчині Рінгера. Було встановлено, що така термічна обробка призводить до покращення втричі показників корозійної тривкості сплаву в розчині Рінгера, порівняно з традиційно отриманим сплавом, і наближує до рівня традиційно

отриманого у 20%-му розчині хлоридної кислоти завдяки зменшенню нерівноважної фази мартенситу α′ та росту β-фази, а також зменшенню мікродеформації в α/α′ ґратці.

Роботу виконано за часткової фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.07/0035 за конкурсом «Передова наука в Україні 2026-2028».

Список літератури

1. Titanium for consumer applications / In: F. Froes and M. Qian, M. Niinomi (Eds). An introduction to titanium in consumer applications / F.H. (Sam) Froes, M. Qian, and M. Niinomi. Elsevier, 2019. P. 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00001-0
2. Comparative study on the densification process of different titanium powders / S. Dong, G. Ma, P. Lei, T. Cheng, D. Savvakin, O. Ivasishin . *Advanced Powder Technology.* 2021. 32. P. 2300-2310. DOI: 10.1016/j.apt.2021.05.009
3. Chen T., Suryanarayana C., Yang C. Advanced titanium materials processed from titanium hydride powder. *Powder Technol.* 2023. 423. Article number 118504. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118504
4. Titanium powder metallurgy / In: M. Qian, and F.H. (Sam) Froes (Eds). Low-cost titanium hydride powder metallurgy / O. Ivasishin and V. Moxson. Butterworth-Heinemann, 2015. P. 117-148. DOI: 10.1016/B978-0-12-800054-0.00008-3
5. Corrosion behavior of near-alpha titanium alloy fabricated by additive manufacturing / S. Lavrys, I. Pohrelyuk, H. Veselivska, A. Skrebtsov, J. Kononenko, and Y. Marchenko . *Materials and Corrosion.* 2022. 73. P. 2063-2070. DOI: 10.1002/maco.202213105
6. Additive manufacturing of titanium-based alloys. A review of methods, properties, challenges, and prospects / T.S. Tshephe, S.O. Akinwamide, E. Olevsky, and P.A. Olubambi . *Heliyon.* 2022. 8. e09041. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09041
7. Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation / Z. Shao, B. Wu, P. Li, W. Ma, H. Tan, H. Li . *Materials Characterization*. 2023. 199. 112844. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112844.
8. Dutta B. and (Sam) Froes F.H.. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys . *Metal Powder Report.* 2017. 72. P. 96-106. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.12.062
9. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties / A. Azarniya, X.G. Colera, M.J. Mirzaali, S. Sovizi, F. Bartolomeu, M.S. Weglowski, W.W. Wits, C.Y. Yap, J. Ahn, G. Miranda, F.S. Silva, H.R.M. Hosseini, S. Ramakrishna, and A.A. Zadpoor. . *Journal of Alloys and Compounds.* 2019. 804. P. 163-191. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.255
10. Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries / P. Nyamekye, S. Rahimpour Golroudbary, H. Piili, P. Luukka, A. Kraslawski . *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023. 6. 100112. DOI: 10.1016/j.aime.2023.100112
11. Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique / F. Pixner, F. Warchomicka, P. Peter, A. Steuwer, M. Colliander, R. Pederson, and N. Enzinger . *Materials*. 2020. 13(15). 3310. DOI: 10.3390/ma13153310
12. Review on Electron Beam Based Additive Manufacturing / S. Negi, A.A. Nambolan, S. Kapil, P.S. Joshi, R. Manivannan, K.P. Karunakaran, P. Bhargava . *Rapid Prototyping Journal*. 2020. 26(3). P. 485-498. DOI: 10.1108/RPJ-07-2019-0182
13. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Cruciform Structure Fabricated by Coaxial Electron Beam Wire-Feed Additive Manufacturing / M. Wang, J. Hu, J. Zhu, K. Zhang, D. Kovalchuk, Y. Yang, H. Wang, L. Zhang, A. Huang . *Journal of Alloys and Compounds.* 2023. 960. 170943. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170943
14. Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A review / S. Liu, Y.C. Shin . *Materials & Design*. 2019. 164. 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
15. Yumak N. Post-processing heat treatment of titanium alloys manufactured by additive manufacturing technologies. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier. 2024. DOI: 10.1016/B978-0-323-96020-5.00257-0
16. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С.Л. Антонюк, А.Г. Моляр, А.Н. Калинюк, В.Н. Замков . *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2003. №1. С. 10-14. https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/94055

17. Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting after the applied post-process treatment methods. / P. Szymczyk-Ziółkowska, V. Hoppe, J. Gąsiorek, M. Rusińska, D. Kęszycki, Ł. Szczepański, R. Dudek-Wicher, J. Detyna . *Biocybernetics and Biomedical Engineering.* 2021. 41. P. 1575-1588. DOI: 10.1016/j.bbe.2021.10.002
18. Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post annealing / A.H. Ettefagh, C. Zeng, S. Guo, J. Raush . *Additive Manufacturing*. 2019. 28. P. 252-258. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.011

References

1. Froes, F., Qian, M., & Niinomi, M. (Eds). 2019. Titanium for consumer applications / An introduction to titanium in consumer applications . Elsevier, P. 1-12. DOI: 10.1016/B978-0-12-815820-3.00001-0
2. Dong, S., Ma, G., Lei, P., Cheng, T., Savvakin, D., & Ivasishin, O. (2021). Comparative study on the densification process of different titanium powders . *Advanced Powder Technology,* 32, pp. 2300-2310. DOI: 10.1016/j.apt.2021.05.009
3. Chen T., Suryanarayana C., &Yang C. (2023). Advanced titanium materials processed from titanium hydride powder. *Powder Technol,* 423. Article number 118504. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118504
4. Ivasishin, O., & Moxson, V. (2015). *Titanium powder metallurgy* . M. Qian, & F.H. (Sam) Froes (Eds). Low-cost titanium hydride powder metallurgy . Butterworth-Heinemann, P. 117-148. DOI: 10.1016/B978-0-12-800054-0.00008-3
5. Lavrys, S., Pohrelyuk, I., Veselivska, H., Skrebtsov, A., Kononenko, J., & Marchenko, Y. (2022). Corrosion behavior of near-alpha titanium alloy fabricated by additive manufacturing . *Materials and Corrosion,* 73, P. 2063-2070. DOI: 10.1002/maco.202213105
6. Tshephe, T.S., Akinwamide, S.O., Olevsky, E., & Olubambi, P.A. (2022). Additive manufacturing of titanium-based alloys. A review of methods, properties, challenges, and prospects . *Heliyon,* 8, e09041. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09041
7. Shao, Z., Wu, B., Li, P., Ma, W., Tan, H. & Li, H. (2023). Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation . *Materials Characterization,* 199, 112844. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112844.
8. Dutta, B., & (Sam) Froes, F.H. (2017). The additive manufacturing (AM) of titanium alloys . *Metal Powder Report,* 72, P. 96-106. DOI: 10.1016/j.mprp.2016.12.062
9. Azarniya, A., Colera, X.G., Mirzaali, M.J., Sovizi, S., Bartolomeu, F., Weglowski, M.S., Wits, W.W., et al. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties . *Journal of Alloys and Compounds,* 804, P. 163-191. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.255
10. Nyamekye, P., Rahimpour Golroudbary, S., Piili, H., Luukka, P., & Kraslawski, A. (2023). Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries . *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering,* 6, 100112. DOI: 10.1016/j.aime.2023.100112
11. F. Pixner, F. Warchomicka, P. Peter, A. Steuwer, M. Colliander, R. Pederson, and N. Enzinger (2020). Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique. *Materials,* 13(15). 3310. DOI: 10.3390/ma13153310
12. Negi, S., Nambolan, A.A., Kapil, S., Joshi, P.S., Manivannan, R., Karunakaran, K.P., & Bhargava, P. (2020). Review on Electron Beam Based Additive Manufacturing *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), P. 485-498. DOI: 10.1108/RPJ-07-2019-0182
13. Wang, M., Hu, J., Zhu, J., Zhang, K., Kovalchuk, D., Yang, Y., Wang, H., Zhang, L., & Huang, A. (2023). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Cruciform Structure Fabricated by Coaxial Electron Beam Wire-Feed Additive Manufacturing . *Journal of Alloys and Compounds,* 960, 170943. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.170943
14. Liu, S., & Shin, Y.C. (2019). Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A review . *Materials & Design,* 164, 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
15. Yumak, N. (2024). Post-processing heat treatment of titanium alloys manufactured by additive manufacturing technologies. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-323-96020-5.00257-0
16. Antoniuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N., & Zamkov, V.N. (2003). Titanium Alloys for the Ukrainian Aviation Industry . *Modern Electrometallurgy*, 1, 10-14.
17. Szymczyk-Ziółkowska, P., Hoppe, V., Gąsiorek, J., Rusińska, M., Kęszycki, D., Szczepański, Ł., Dudek-Wicher, R., & Detyna, J. (2021). Corrosion resistance characteristics of a Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated

by electron beam melting after the applied post-process treatment methods . *Biocybernetics and Biomedical Engineering,* 41, P. 1575-1588. DOI: 10.1016/j.bbe.2021.10.002

18. Ettefagh, A.H., Zeng, C., Guo, S., & Raush, J. (2019). Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post annealing . *Additive Manufacturing*, 28, P. 252-258. DOI: 10.1016/j.addma.2019.05.011

Iryna Pohrelyuk, Prof., D. tech. sci., **Serhii Lavrys,** Senior research fellow, PhD tech. sci., **Olena-Mariia Danyliak,** Senior research fellow, PhD chem. sci., **Oleh Tkachuk,** Senior research fellow, PhD tech. sci., **Halyna Veselivs'ka,** Senior research fellow, PhD tech. sci., **Roman Proskurnyak,** PhD tech. sci.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of a 3D-Printed VT6 Titanium Alloy

The article aims to investigate the effect of heat treatment on the structure, micromechanical properties, and corrosion resistance of the 3D-printed VT6 titanium alloy, compared to those of the conventionally produced alloy.

This study examined samples of VT6 titanium alloy with identical chemical compositions, produced using selective laser melting (SLM) and conventional magnesium-thermal reduction, remelting, and deformation processes. The heat treatment of the 3D printed alloy was carried out in several stages: heating to 800°C at a rate of ≤ 80°C/h, holding for 2 hours → cooling to 500°C at a rate of ≤ 150°C/h, holding for 0.5 hours → cooling with the furnace to room temperature. The treatment was performed in a vacuum ($P = 10^{-3}$ Pa). According to metallographic analysis, the conventionally produced VT6 titanium alloy exhibits a typical equiaxed structure. In contrast, the microstructure of the titanium alloy produced by 3D printing is characterized by a needle-like martensitic structure, which is evidently due to the high heating and cooling rates during the alloy's production. As a result of heat treatment, the metastable martensitic microstructure transforms into an (α+β) two-phase lamellar structure

The research revealed that the titanium alloy produced by 3D printing exhibits lower corrosion resistance in the tested environments compared to the conventionally produced alloy, which is attributed to the presence of a metastable martensitic structure and residual stresses within the structure. The effect of heat treatment performed at a temperature below the α→β polymorphic transformation temperature on the microstructure and corrosion resistance of the 3D-printed VT6 alloy in a 20% aqueous hydrochloric acid solution and in Ringer's solution was investigated. It was found that such heat treatment leads to a threefold improvement in the alloy's corrosion resistance in Ringer's solution compared to the conventionally produced alloy, and brings it closer to the level of the conventionally produced alloy in a 20% hydrochloric acid solution due to the reduction of the non-equilibrium α′ martensite phase and the growth of the β-phase, as well as the reduction of microdeformation in the α/α′ lattice.

VT6 titanium alloy, 3D printing, heat treatment, microstructure, micromechanical properties, corrosion resistance

Одержано (Received) 06.11.2025 *Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2025*
Прийнято до друку (Approved) 30.01.2026

УДК 621.74 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).155-163

В.М. Ломакін, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов,** доц., канд. техн. наук,
Л.А. Молокост
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vik284333@gmail.com

Методологічні аспекти моделювання та розрахунку теплових процесів у багатомісних кокілях

У статті розглянуто окремі аспекти спрощеного чисельного моделювання теплових процесів у ливарних багатомісних кокілях, зокрема затвердіння виливків чавунних мелючих куль.

Перший аспект моделювання стосується зменшення обчислювальної складності процесу за рахунок переходу від багатомісної ливарної форми до одномісної сферичної моделі, шляхом введення у багатомісному кокілі вертикальних серединних площин симетрії з умовою нульового теплового потоку. Це дозволило аналізувати лише сегмент форми з одним виливком кулі, вільний від теплообміну через умовні межі, з охолодженням через відкриті зовнішні поверхні, які не межують із сусідніми сегментами форми і контактують з навколишнім повітрям. Для коректного переходу до сферичної моделі кокіля запропоновано методику прирівнювання її об'єму до об'єму виокремленого сегмента ливарної форми з коригуванням коефіцієнта тепловіддачі конвекцією для забезпеченням рівності теплових потоків з зовнішніх поверхонь таких тіл.

Другий аспект моделювання присвячено опису фазових переходів у виливку, що твердне в кокілі, без явного введення граничних умов між фазами. При застосуванні чисельного методу скінченних різниць виключили з розгляду міжфазні границі, залишивши лише приграничні вузли (об'єми) просторово-часової сітки. Це дозволило за допомогою прямої і зворотної рекурентної прогонки обчислювати температурне поле в межах кожної фази, змінюючи коефіцієнт теплопровідності при переході між фазами.

Досить специфічною особливістю процесів затвердіння сплавів у металевих формах є вплив термічного опору зазору з газом між виливком і кокілем на швидкість охолодження поверхневого шару виробу і на теплообмін загалом. Для врахування динаміки утворення зазору при моделюванні запропоновано ввести уявлення про фіктивний контрольний об'єм у точці контакту виливка кулі зі стінкою ливарної форми. Поточна ширина зазору визначалася на кожному кроці чисельного інтегрування як сукупний ефект термічного розширення стінки кокіля і усадки виливка. Типові розрахункові формули коефіцієнтів прогонки були модифіковані саме для контрольного граничного об'єму. Такий підхід дозволив описати гальмівний вплив газового прошарку на теплообмін без необхідності адаптації розрахункової сітки або перерахунку розмірів моделі кокіля.

чавунна куля, кокіль, газовий зазор, кінетика затвердіння, моделювання, чисельне дослідження

Постановка проблеми. Процеси лиття чавунних виробів у багатомісних кокілях набули значного розвитку та широкого поширення. Переважно це виробництво однотипних виливків, як-от чавунних мелючих куль і цильпебсів, що використовуються у великих кількостях у млинах для подрібнення і розмелювання гірських порід [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Механізація і автоматизація такого виробництва досягається з використанням конвеєрів різних типів. Ливарні форми – чавунні, з вертикальною площиною роз'єму півформ.

Експлуатаційні характеристики мелючих куль значною мірою залежать від хімічного складу чавуну, проте важливу роль відіграє також кінетика затвердіння, яка визначає формування внутрішньої мікроструктури литих виробів. Саме це зумовлює науковий інтерес до розробки інструментарію для дослідження термічного стану та кінетики затвердіння кульових виливків у багатомісних ливарних формах.

© В. М. Ломакін, В. В. Пукалов, Л. А. Молокост, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розрахунку кінетики затвердіння виливків у багатомісних металевих формах може бути використаний типовий інструментарій. На основі створеної 3D-моделі кокіля з виливками у системі комп'ютерного проектування SolidWorks можна виконати розрахунок процесу затвердіння та охолодження твердих виливків у системі комп'ютерного моделювання LVMFlow, із врахуванням шару вогнетривкої кокільної фарби, характеристики якої присутні в базі системи [7, 8].

Але, при такому підході ігнорується цікава особливість процесу, а саме, виникнення зазору з газовим прошарком між виливком і стінкою кокіля, який здатен значною мірою уповільнити теплопередачу і пригальмувати процес затвердіння. Це гальмування є не менш важливим фактором структуроутворення у виливку, ніж склад чавуну та вуглецевий еквівалент, і його необхідно оцінити.

У роботах [9, 10, 11] відзначається, що вирішення подібних задач є надзвичайно складним. Тому при проектуванні ливарних технологій цю проблему зазвичай ігнорують, керуючись результатами аналітичних розрахунків і практичних досліджень.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення взаємозв'язку ключових факторів теплового процесу, що впливають на формування структури литих виливків чавунних куль Ø40 мм у багатомісному кокілі.

З огляду на зазначене було поставлено такі завдання:

1. Розробити методику чисельного дослідження.
2. Дослідити на ЕОМ термічний стан та кінетику затвердіння виливків чавунних куль Ø40 мм у багатомісному кокілі з урахуванням динаміки утворення зазору з газовим прошарком.
3. Виконати розрахунки при різній товщині стінки ливарної форми.
4. Спрогнозувати структуру та величину вибіленого поверхневого шару в литих виробах.

Виклад основного матеріалу. Після заливки розплаву в багатомісний кокіль відбувається складний тепловий процес. Внаслідок взаємного теплового впливу виливків теплота передається вздовж ширини, довжини і висоти ливарної форми. Для аналізу термічного стану багатомісного кокіля у формі паралелепіпеда з симетрично розташованими виливками ливарну форму можна умовно поділити на окремі сегменти за допомогою **вертикальних площин (серединних)**, які проходять **посередині між сусідніми виливками**. Такий підхід дозволяє при моделюванні теплообміну зменшити обчислювальну складність і розглядати кожну секцію форми, що містить один виливок, як самостійну частину.

У зв'язку із симетричним розташуванням виливків у багатомісному кокілі на умовних граничних площинах виділених сегментів визначено граничні умови симетрії ($\frac{\partial T}{\partial n} = 0$), що відповідають нульовому тепловому потоку (n — нормаль до граничної поверхні).

Виокремлена частина форми акумулює теплоту від одного виливка. Одночасно, в навколишнє середовище віддається теплота тільки з тих поверхонь, що контактують з оточуючим повітрям. Такий підхід є досить вдалим.

Для випадку лиття виливків куль при моделюванні можна перейти до сферичної теплової моделі кокіля з одним виливком в центрі, для якої буде справедливою одновимірна система координат, що характеризується радіус-векторм з єдиного центра. Для коректності такого переходу необхідне виконання двох умов: 1) однакова теплоакумулююча здатність форми і сферичної моделі; 2) однакова швидкість тепловіддачі з граничних зовнішніх поверхонь таких тіл. Для виконання першої умови

достатньо прирівняти об'єм сферичної моделі кокіля до об'єму виокремленої частини ливарної форми. Виконати другу умову складніше. При рівності об'ємів величина зовнішньої поверхні сферичної моделі ($S_{\text{сф}}$), неминуче відрізняється від сукупної граничної поверхні виокремленої частини кокіля ($S_{\text{к}}$), що контактує з навколишнім повітрям, і теплові потоки з граничних поверхонь будуть відмінними:

$$\alpha_0(T_0 - T_c)S_{\text{к}} \neq \alpha_1(T_5 - T_c)S_{\text{сф}}, \quad (1)$$

де $S_{\text{к}}$ – величина зовнішньої поверхні виокремленої частини кокіля, що контактує з навколишнім середовищем (повітрям); $S_{\text{сф}}$ – величина поверхні (зовнішньої) сферичної моделі кокіля; α_0 – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з граничної поверхні ($S_{\text{к}}$) виокремленої частини кокіля; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з поверхні сферичної моделі кокіля ($S_{\text{сф}}$); T_0 – певна середня (середньоінтегральна) температура на зовнішній поверхні ($S_{\text{к}}$) виокремленої частини кокіля; T_5 – температура на зовнішній поверхні сферичної моделі кокіля ($S_{\text{сф}}$); T_c – температура навколишнього повітря.

Можна підібрати умови за яких нерівність (1) перетворюється в рівність. Очевидно, з кожної одиничної поверхні сферичної теплової моделі кокіля має віддаватися кількість теплоти, що пропорційна відношенню величин поверхонь ($\frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{сф}}}$). Це можна врахувати в ефективному коефіцієнті тепловіддачі конвекцією:

$$\alpha_1 = \alpha_0 \frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{сф}}}. \quad (2)$$

Як видно, при використанні α_1 в нерівності (1) досягаються однакові умови тепловіддачі. Наслідком цього буде рівність температур на граничних поверхнях ($T_0 = T_5$) для будь-якого поточного моменту часу процесу, а отже і рівність правої і лівої частин.

Іншим аспектом дослідження теплових процесів у багатомісних кокілях є методологія чисельних розрахунків на ЕОМ.

Зазвичай при литті сплавів у виливку утворюється декілька фаз. У математичному формулюванні теплової задачі затвердіння на міжфазних границях призначаються відповідні граничні умови. Проте при реалізації чисельних розрахунків процесу на ЕОМ виникає необхідність визначення положення таких границь у просторі. Використання апроксимації температурного розподілу призводить до ускладнення алгоритму розрахунку.

Більш доцільним є алгоритм без явного виокремлення міжфазних переходів. При цьому ігноруються границі: розплав – двофазна частина виливка і двофазна частина виливка – тверда кірка. Алгоритм ґрунтується на чисельній методиці, зокрема методі скінченних різниць, що передбачає неявний розрахунок температурного поля тіл. Для будь-якого елементарного об’єму сплаву, що перебуває в певній фазі безпосередньо біля границі фазового переходу, теплові потоки, що входять і виходять з нього вздовж нормалі, допустимо визначати за допомогою коефіцієнта теплопровідності цієї фази (λ_i). При переході через границю до наступного елементарного об'єму, в іншій фазі, результуючий тепловий потік визначається аналогічно, через коефіцієнт теплопровідності саме цієї фази. Симетричність чисельного підходу до приграничних вузлів просторово-часової сітки з обох боків від границі дозволяє відкинути граничні умови та значно спрощує алгоритм розв'язання задачі затвердіння виливка при реалізації наскрізної прогонки.

Нарешті, мабуть самим цікавим аспектом розрахунку процесів затвердіння і охолодження виливків у кокілях є гальмування теплопередачі тонким газовим

прошарком у зазорі між виливком і стінкою ливарної форми. Зазор утворюється внаслідок термічного розширення стінки, після заливки розплаву, так і в результаті усадки виливка при охолодженні у формі. Динаміка утворення зазору досить складна і залежить від багатьох факторів, а врахування цих факторів робить розв'язання задачі надзвичайно громіздким.

Незважаючи на малі розміри зазору, його вплив може бути значущим для структуроутворення у виливку. Разом з цим, зазор руйнує при моделюванні класичну різницеву схему і призводить до необхідності адаптації розрахункової просторово-часової сітки, якою покривається тіло виливка і стінка ливарної форми. Базова математична модель теплового процесу значно ускладнюється.

Для подолання таких труднощів було запропоновано застосувати на границі між виливком і стінкою кокіля **фіктивний контрольний об'єм**, як модель ідеалізованого тіла для акумуляції теплоти, в який вбудувати газовий зазор з його поточною шириною і теплофізичними властивостями. Типові розрахункові формули коефіцієнтів прогонки скінченно-різницевої методики, що застосовуються для всіх вузлів розрахункової області, можуть бути **модифіковані** саме для граничного контрольного об'єму.

Це штучна локальна адаптація, яка, з одного боку, дає змогу врахувати термічний опір зазору, а з іншого – забезпечує незмінність схеми дискретизації розрахункової області, що є критично важливим для адекватного розрахунку температурного поля тіл. При цьому усадка виливка та розширення стінки кокіля на схемі безпосередньо не відображаються.

Усі розглянуті прийоми застосували при моделюванні процесу затвердіння виливка чавунної кулі Ø40 мм у сферичній тепловій моделі кокіля з товщиною стінки 40 мм.

Рівняння процесу теплопровідності в сферичній системі координат для виливка кулі і моделі металевої форми має такий вигляд [12, 13]:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i(r,t)}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_i(r,t)}{\partial r} \right), \tag{3}$$

де c_i – теплоємність; ρ_i – густина; λ_i – коефіцієнт теплопровідності; T_i – температура; r – радіус-вектор ($r = 0$ в центрі кулі); t – час; i – ідентифікатор (1 – рідка фаза у виливку, 2 – двофазна частина виливка; 3 – тверда фаза (кірка) у виливку; 4 – шар кокільної фарби; 5 – стінка кокіля).

Хімічний склад чавуну виливка враховано при адитивному визначенні теплофізичних констант (c_i, ρ_i, λ_i).

Прийняті початкові умови ($t = 0$) мають такий вигляд:

$$T_1(r, 0) = T_{\text{зал.}},\ 0 < r < r_{\text{в}}, \tag{4}$$

$$T_4(r_{\text{в}}, 0) = T_{\text{зал.}}, \tag{5}$$

$$T_5(r, 0) = T_{\text{п.к.}},\ r_{\text{в}} < r < (r_{\text{в}} + l), \tag{6}$$

де $r_{\text{в}}$ – радіус виливка кулі; l – товщина стінки кокіля; $T_{\text{зал.}}$ – температура заливки сплаву; $T_{\text{п.к.}}$ – початкова температура кокіля.

Прийняті граничні умови мають такий вигляд:

- в центрі виливка при $r = 0$ (умова симетричного охолодження)

$$\frac{\partial T_i(0,t)}{\partial r} = 0; \tag{7}$$

- на зовнішній поверхні сферичного кокіля при $r = r_{\text{в}} + l$ (теплообмін конвекцією):

$$-\lambda_5 \frac{\partial T_5(r_{\text{в}}+l,t)}{\partial r} = \alpha_1 (T_5(r_{\text{в}} + l, t) - T_c). \tag{8}$$

Ширину зазору – $\Delta z(t)$, між виливком та стінкою металевої форми визначали як сукупний ефект процесів розширення та усадки:

$$\Delta z(t) = \Delta f + \Delta\varepsilon(t) + \Delta u(t), \quad (9)$$

де Δf – товщина шару антипригарної вогнетривкої кокільної фарби; $\Delta\varepsilon(t)$ – поточне значення розширення стінки кокіля для умов неоднорідного температурного розподілу, як сумарний ефект розширення всіх елементів довжиною Δr кожний, що складають стінку:

$$\Delta\varepsilon(t) = \Delta r\beta_5 \sum(T_5(r,t) - T_{\text{п.к.}}), \quad (10)$$

де Δr – скінченно-малий приріст радіус-вектора r; β_5 – коефіцієнт термічного розширення матеріалу кокіля; $\Delta u(t)$ – поточне значення лінійної усадки виливка кулі у ливарній формі:

$$\Delta u(t) = \Delta r\beta_3 \sum(T_{SOL} - T_3(r,t)), \quad (11)$$

де β_3 – коефіцієнт лінійної усадки матеріалу виливка кулі; T_{SOL} – температура солідуса сплаву; $\sum(T_{SOL} - T_3(r,t))$ – по поточній товщині твердої кірки виливка.

Математичну постановку задачі (2)–(11) розв'язано на ЕОМ із використанням попередньо розробленої програми. Алгоритм програми реалізовано згідно з типовою неявною скінченно-різницевою методикою і включає пряму і зворотну рекурентну прогонку при розрахунку температурного поля тіл на сукупності вузлів просторово-часової сітки, якою покрили переріз половини виливка і стінку металевої сферичної форми. Для випадку $i = 4$ рівняння (3) описує теплопередачу одночасно через шар кокільної фарби та газовий прошарок. Граничні умови (7) та (8) апроксимовані методом скінченних різниць і повністю узгоджені із загальною схемою чисельного розрахунку на ЕОМ.

На рис. 1 показано розрахункову зміну температури поверхневого шару виливка кулі та газового зазору (вуглекислий газ і повітря) з шаром вогнетривкої кокільної фарби на основі графіту. Розрахунок проведено від початку теплового процесу до моменту видалення виливка з кокіля (температура на поверхні кулі – 550 °С).

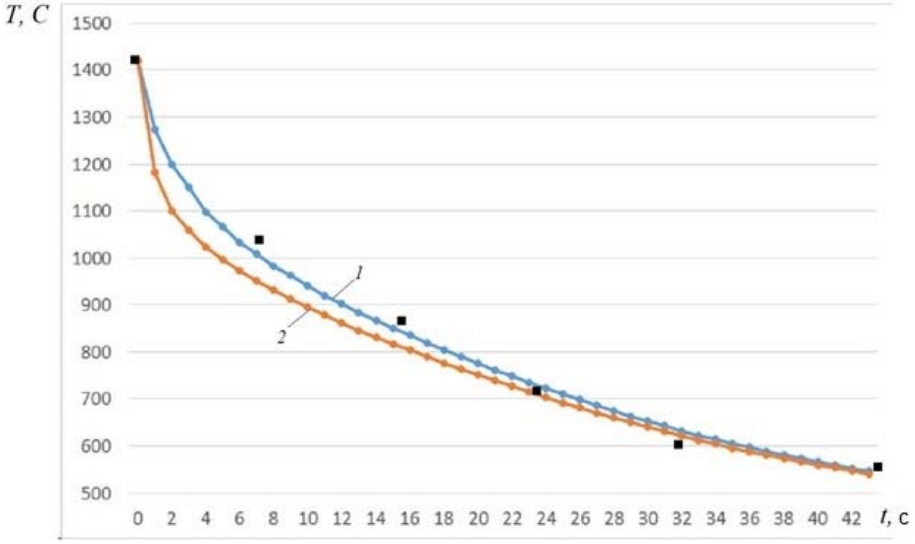


Рисунок 1 – Розрахункова зміна температури поверхневого шару виливка кулі Ø40 мм та зазору з газом і кокільною фарбою (чавун виробу: 2,5 % С, 1 % Si; товщина стінки сферичної моделі чавунного кокіля – 40 мм).

1 – поверхневий шар виливка (базовий варіант моделювання - шар фарби 0,5 мм); 2 – зазор;
■ – показання платинової термопари типу R у поверхневому шарі виливка (отримані на промисловому зразку чотиримісного кокіля з порожнинами Ø40 мм та товщиною стінки 40 мм).
Джерело: розроблено авторами

Як видно, швидкість охолодження поверхневого шару виливка уповільнюється з часом, що є наслідком нагрівання кокіля і зменшення градієнта температури по перерізу його стінки.

Досить цікавим виявилося питання ступеня гальмування теплопередачі через зазор. На рис. 2 показано розподіл температури у виливку від центра до поверхні при повному затвердінні для різних варіантів лиття.

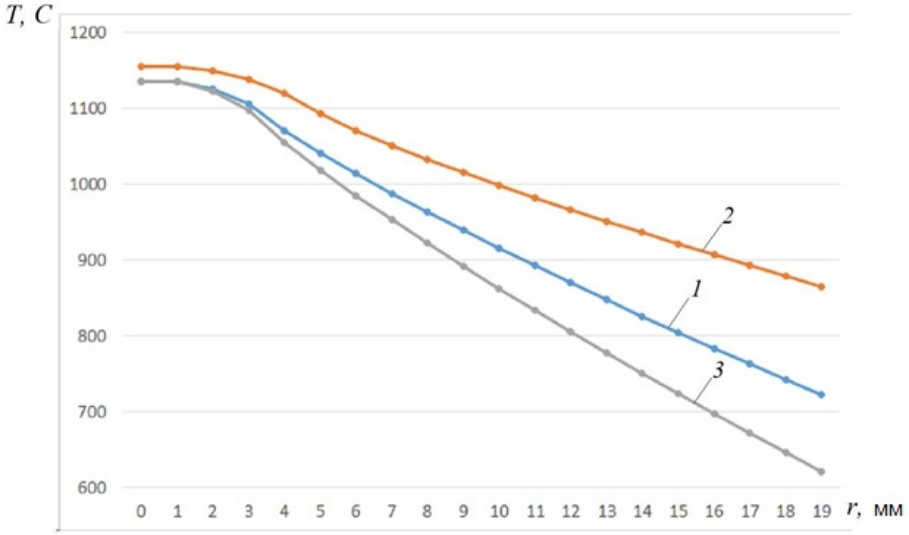


Рисунок 2 – Розподіл температури у виливку кулі Ø40 мм при повному затвердінні (чавун виробу: 2,5 % С, 1 % Si; товщина стінки сферичної моделі чавунного кокіля – 40 мм)
1 – базовий варіант моделювання (шар фарби 0,5 мм з розрахунком газового зазору);
2 – варіант порівняння (товщина облицювання 1 мм з розрахунком газового зазору);
3 – нефарбований кокіль (без розрахунку газового зазору).
Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 показано розрахункову зміну температури поверхневого шару виливка до повного затвердіння для різних варіантів лиття.

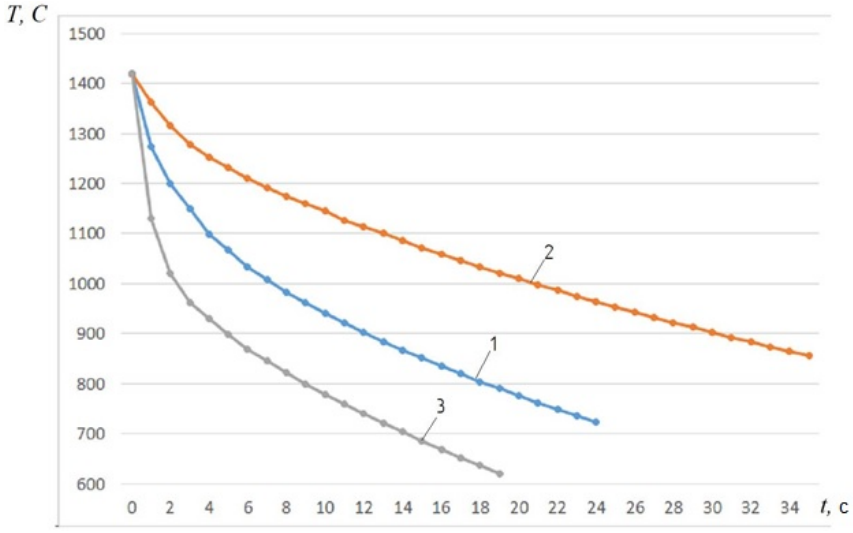


Рисунок 3 – Розрахункова зміна температури поверхневого шару виливка чавунної кулі Ø40 мм до повного затвердіння (чавун виробу: 2,5 % С, 1 % Si; товщина стінки сферичної моделі чавунного кокіля – 40 мм)
1 – базовий варіант моделювання (шар фарби 0,5 мм з розрахунком газового зазору);
2 – варіант порівняння (товщина облицювання 1 мм з розрахунком газового зазору);
3 – нефарбований кокіль (без розрахунку газового зазору).
Джерело: розроблено авторами

Результати розрахунків на ЕОМ свідчать про адекватність та широку функціональність розробленої програми.

Висновки. Запропонований комбінований метод моделювання дозволив дослідити безпосередньо в ливарній формі взаємний вплив процесів розширення стінки кокіля, усадки виливка кулі та кінетику його затвердіння. Введення фіктивного контрольного об'єму на границі між виливком і металевою формою дозволило отримати універсальну схему розрахунку, врахувати фізичний ефект проміжного шару (гальмування теплопередачі) й уникнути ускладнень, пов'язаних з рухомими границями та адаптивними сітками.

Основними результатами виконаної роботи є:

1) швидкість затвердіння по перерізу виливка кулі Ø40 мм знаходиться в межах 0,5–0,8 мм/с, що при вуглецевому еквіваленті сплаву ∑(C + Si) = 3,5 % забезпечує формування структури білого чавуну;

2) гальмування теплопередачі газом в зазорі між виливком і стінкою кокіля недостатнє для графітизації чавуну;

3) у центральній частині сферичного виливка швидкість затвердіння підвищується до рівня ≈3,5 мм/с внаслідок симетрії тіла;

4) при збільшенні товщини стінки кокіля з 40 до 70 мм кінетика затвердіння, через невеликі розміри виливка та швидке охолодження, не змінилася ні якісно, ні кількісно. Тривалість охолодження затверділого виливка в кокілі до температури вибивки зменшилась на ≈14 %, що пояснюється більшою акумуляцією теплоти більш масивної ливарної форми.

Загалом, чавунні кулі Ø40 мм при експлуатації в млинах зазнають значно менших динамічних навантажень порівняно з мелючими тілами Ø100–120 мм, що зумовлює економічну доцільність використання білого чавуну для їх виробництва.

Список літератури

1. Campbell J. Castings. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2003. 336 p.
2. Górny M., Kawalec M. Manufacturing scheme of spherical grinding bodies from abrasion-resistant cast iron. *Archives of Foundry Engineering.* 2014. Vol. 14. No. 3. P. 45–50.
3. Aubakirov M., Kulikov V. Wear-Resistant Cast Iron Grinding Media for Ore Grinding Mills. *Metallurgist.* 2020; 63(9-10): 853–860. https://doi.org/10.1007/s11041-020-00349-5.
4. Ломакін В.М., Молокост Л.А. Ударостійкий чавун для молольних тіл. *Центральноукрїнський науковий всінник. Технічні науки :* зб. наук. праць 2020. Вип. 3 (34). С. 65-72.
5. Albertin E., Sinatora A. The properties and performance of cast iron grinding media. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1991. Vol. 8. P. 39–46.
6. Suslo N., Panchenko H., Huk Y. Study of the Influence of Modification and Heat Treatment of Cast Iron Grinding Balls on Their Operational Properties. *Economics and Technical Engineering.* 2024;2(2):94–101.
7. Prykhodko, O. V., Linnik, I. E., & Abdulov, A. R. (2013). Development of the foundry technology: from working drawing to the process modeling in the mold. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19312
8. Malinovsky, A. Improvement of gating systems with the purpose of reducing defects in large-size castings from gray iron. *Helix – The Scientific Explorer.* 2019. 9(04), 5197–5208.
9. Дослідження впливу кінетики кристалізації на властивості кокільних виливків чавунних цильпебсів. / В.М. Ломакін, В.В. Клименко, В.В. Пукалов, А.В. Ломакін . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць.*. 2016. Вип. 29. С. 132-139.
10. Дослідження процесу затвердіння та прогнозування структури литих чавунних молольних тіл. / Ломакін В.М., Клименко В.В., Пукалов В.В. ті ін. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць.* 2018. Вип. 31. С. 66-74.
11. Ломакін В. М., Кропівний В. М., Афтанділянц Є. Г., Гнилоскуренко С. В. Моделювання та чисельне дослідження кінетики затвердіння чавунних мелючих куль у кокілі [Електронний ресурс] // Литво. Металургія. 2024 : матеріали 20-ї, 13-ї ювілейної міжнар. наук.-практ. конф., 28-30 травня 2024 р. – Харків; Київ : Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т», 2024. – С. 154-156. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79794 :contentReference[oaicite:0]{index=0}
12. Stefanescu D. M. Science and Engineering of Casting Solidification. 2nd ed. Springer, 2009. 550 p.
13. Flemings M. C. Solidification Processing. New York: McGraw-Hill, 1974. 364 p.

References

1. Campbell, J. (2003). Castings. 2nd ed. Butterworth-Heinemann. 336 p. [in English].
2. Górny, M. & Kawalec, M. (2014). Manufacturing scheme of spherical grinding bodies from abrasion-resistant cast iron. *Archives of Foundry Engineering.* Vol. 14 (3), 45–50. [in English].
3. Aubakirov, M. & Kulikov, V. (2020). Wear Resistant Cast Iron Grinding Media for Ore Grinding Mills. *Metallurgist.* 63(9–10), 853–860. https://doi.org/10.1007/s11041-020-00349-5 [in English].
4. Lomakin, V. M. & Molokost, L. A. (2020). Udarostijkyj chavun dlya molol'nyh til [Research and comparative analysis of wear resistance of cast grinding media from chromium cast irons]. Zbirnyk naukovyh prac' Central'noukrains'koho nacional'noho tehnichnoho universytetu. 3(34), 65–72. [in Ukrainian].
5. Albertin, E. & Sinatora, A. (1991). The properties and performance of cast iron grinding media. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 8, 39–46. [in English].
6. Suslo, N., Panchenko, H. & Huk, Y. (2024). Study of the Influence of Modification and Heat Treatment of Cast Iron Grinding Balls on Their Operational Properties. Economics and Technical Engineering. 2(2), 94–101. [in English].
7. Prykhodko, O. V., Linnik, I. E. & Abdulov, A. R. (2013). Development of the foundry technology: from working drawing to the process modeling in the mold. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19312 [in English].
8. Malinovsky, A. (2019). Improvement of gating systems with the purpose of reducing defects in large size castings from gray iron. Helix – The Scientific Explorer, 9(04), 5197–5208. [in English].
9. Lomakin, V. M., Klymenko, V. V., Pukalov, V. V. & Lomakin, A. V. (2016). Doslidzhennya vplyvu kinetyky krystalizatsii na vlastyvosti kokil'nykh vylivkiv chavunnykh cyl'pebsiv [Investigation of the effect of crystallization kinetics on the properties of chill castings of cast iron grinding bodies]. Zbirnyk naukovyh prac' Kirovograds'koho nacional'noho technichnoho universytetu. 29, 132–139. [in Ukrainian].
10. Lomakin, V. M., Klymenko, V. V., Pukalov, V. V., Kuzyk, O. V., Dubodelov, V. I. & Goryuk, M. S. (2018). Doslidzhennya procesu zatverdinnya ta prognozuvannya struktury lytykh chavunnykh molol'nykh til [Investigation of the process of solidification and prediction of the structure of cast iron grinding bodies]. Zbirnyk naukovyh prac' Central'noukrains'koho nacional'noho technichnoho universytetu. 31, 66–74. [in Ukrainian].
11. Lomakin, V. M., Kropivnyi, V. M., Aftandilyants, Ye. H., & Hnyloskurenko, S. V. (2024). Modeliuvannia ta chyselne doslidzhennia kinetiky zatverdinnia chavunnykh melyuchykh kul u kokili [Modeling and numerical study of the solidification kinetics of cast iron grinding balls in a mold] [Electronic resource]. Lytvo. Metaluriia. Materials of the 20th, 13th Jubilee International Scientific-Practical Conference, 28–30 May 2024. Kharkiv; Kyiv: National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2024, 154–156. [in Ukrainian].
12. Stefanescu, D. M. (2009). Science and Engineering of Casting Solidification. 2nd ed. Springer. 550 p. [in English].
13. Flemings, M. C. (1974). Solidification Processing. New York: McGraw-Hill. 364 p. [in English].

Viktor Lomakin, Assos. Prof., PhD in tech. sci., **Viktor Pukalov,** Assos. Prof., PhD in tech. sci., **Lyudmyla Molokost**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskiy, Ukraine

Methodological Aspects of Modeling and Calculation of Thermal Processes in Multi-Seat Chill Molds

Calculation of the hardening kinetics of cast iron castings in multi-place molds is of great practical importance. The results of such a study can help optimize casting technology while ensuring high quality of cast products.

The article considers some aspects of simplified numerical modeling of thermal processes in multi-seat casting molds, in particular, the solidification of castings iron grinding balls.

The first aspect of modeling concerns the reduction of the computational complexity of the process by moving from a multi-cavity casting mold to a single-cavity spherical model by introducing vertical mid-planes of symmetry in the multi-cavity chill mold with the condition of zero heat flux. This allowed us to analyze only a segment of the mold with one ball casting, free from heat exchange through conditional boundaries, with cooling through open outer surfaces that do not border on adjacent mold segments and are in contact with the surrounding air. To ensure a correct transition to a spherical model of the chill mold, a method is proposed for equating its volume to the volume of a selected segment of the casting mold with an adjustment of the convection heat transfer coefficient to ensure equality of heat flows from the external surfaces of such bodies.

The second aspect is devoted to the description of phase transitions in casting without explicitly introducing boundary conditions between phases. Using a numerical finite difference method, it is proposed to exclude interphase boundaries from consideration, retaining only the near-boundary nodes (volumes). This allows recurrently calculating the temperature fields within each phase, changing the thermal conductivity coefficient during the transition between phases.

The central issue of the work was a numerical study of the reduction of heat transfer rate of heat transfer by a gap with a gas layer, due to thermal expansion of the chill mold material, and of casting shrinkage, and its effect on

the kinetics of solidification and the structure of the cast product. To do this, a fictitious layer (volume) is introduced between the metal and the mold wall, which allows describing the effect of the gas gap on heat transfer without the need to adapt the mesh or model geometry.

Computer calculations indicate a distribution of the solidification rate across the cross-section of the ball casting (0.5-0.8 mm/s), at which a white cast iron structure is formed across the entire cross-section of the cast product. Based on the calculated data, graphical dependencies were constructed for changes in the casting surface layer temperature and gas gap over time. The calculations were performed for various casting regimes (painted chill mold, lined chill mold, unpainted chill mold).

When the thickness of the chill mold wall increased from 40 to 70 mm, the kinetics of curing, due to the small size of the casting and rapid cooling, did not change qualitatively or quantitatively. At the same time, the cooling time of the solidified casting in the chill mold to the knockout temperature was somewhat reduced (~14%), which can be explained by the greater accumulation of heat in the more massive casting mold.

In general, Ø40 mm cast iron balls receive significantly lower dynamic loads when operated in mills compared to Ø100-120 mm grinding bodies, and white cast iron may be an economically viable material for their production.

cast iron ball, chill mold, gas gap, solidification kinetics, modeling, numerical study

Одержано (Received) 19.01.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 11.02.2026*
Прийнято до друку (Approved) 26.02.2026

УДК 621.432 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).163-171

А. В. Рутковський, ст. наук. співр., канд. техн. наук,
О.Г. Трапезон, пров. наук. співр., д-р. техн. наук,
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна
С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук,
О.В. Бевз, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: rut2000@ukr.net, coating@ipp.kiev.ua, marko60@ukr.net, oleg_bevz@ukr.net

Дослідження втомної міцності титанових сплавів, модифікованих вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі, при високочастотному навантаженні

В роботі проведено експериментальні дослідження з визначення втомної міцності тонколистового титану ВТ1-0 до та після модифікування поверхневого шару вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі. Втомні випробування призматичних зразків при їх резонансних згинних коливаннях проведено при високій частоті навантаження – (11-12) кГц. Побудовані в результаті проведених випробувань втомні криві на базі 10^7 циклів навантаження. Проведено випробування п'яти груп зразків – одна група в стані поставки без обробки і чотири групи після технологічного модифікування шару. З кривих втоми отримано значення меж витривалості σ_{-1} при симетричному змінному навантаженні. Показано, що незалежно від варіації параметрів технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі в заданому їх діапазоні, значення межі витривалості σ_{-1} титану ВТ1-0 з модифікованою поверхнею вище на (12-17)% порівняно зі значенням σ_{-1} не модифікованого титану ВТ1-0.

іонне азотування, імпульсний режим, титановий сплав, межа витривалості, навантаження

© А. В. Рутковський, О. Г. Трапезон, С. І. Маркович, О. В. Бевз, 2026

Постановка проблеми. Модифікацією поверхневого шару титанових сплавів методом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі (ВІАвІР) можна досягти підвищення їх міцності. Від результатів обробки залежать властивості як основного металу, так і поверхневого модифікованого шару, котрий буде або зміцненим, або ослабленим, незважаючи на хімічну ідентичність основи і модифікованого шару [1]. Важливе прикладне значення має міцність в умовах змінного навантаження, кількісною характеристикою якої є межа витривалості при симетричному циклі навантаження з максимальним напруженням σ_{-1}. Проблема вибору технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі яка забезпечує підвищення σ_{-1} титанових сплавів є актуальною здачею [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно аналізу літературних даних, метод ВІАвІР не може гарантувати відновлення результатів, якщо не витримано необхідні вихідні технологічні умови. Недостатнє дотримання потрібних оптимальних технологічних параметрів ВІАвІР призводить до небажаних результатів. Згідно [1, 2] можна навіть отримати зниження початкової міцності з зменшенням межі витривалості модифікованих конструкцій при змінних навантаженнях. Разом з тим в роботах [2 - 5] при дослідженні впливу режимів ВІАвІР на міцність конструкцій встановлено, що модифікація поверхонь ЕК ВІАвІР, може суттєво підвищити σ_{-1}, при оптимізації параметрів технологічного процесу.

Проте результати деяких досліджень [6, 7], свідчать про неоднозначність висновків щодо їх впливу на величину σ_{-1}. Так, наприклад, в [6] описано метод створення нітриду Ті та Al-(TiAlN) і визначено таку механічну характеристику як модуль Юнга. Схожим об'єктом є дослідження механічних характеристик модифікованих поверхонь титанових сплавів [7].

Зміцнюючим технологіям на основі азотування поверхневого шару присвячено ряд публікацій [8-10]. Так в [8] викладена технологія зміцнення азотуванням та описано всі етапи її модифікації. Дослідженням доведено значне підвищення твердості поверхні. В [9-10] зазначається, що азотування як ХТО призводить до високої стійкості до зношення та втоми, зниження деформативності.

В роботах [11,12] розроблено теоретичні основи та методичні рекомендації що до визначення характеру впливу технологічних параметрів процесу модифікації на характеристику витривалості σ_{-1} в умовах циклічних навантажень. Зокрема приведена теоретична основа та методика експериментального визначення циклічної міцності титанових сплавів з поверхнею, модифікованою в ВІАвІР при одно вісьовому високочастотному розтязі - стиску на прикладі азотованих зразків модифікованого тонколистового титану ВТ1-0, які були навантаженні згінним циклічним деформуванням з високою частотою біля 10÷12 кГц. Разом з тим виникає необхідність проведення серії експериментів для встановлення залежностей та оптимізації технологічних параметрів, що і обумовило мету і задачі дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження було виявлення можливостей для зміцнення через підвищення межі витривалості сплаву ВТ1 шляхом вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі та з'ясування характеру впливу технологічних параметрів процесу на характеристику витривалості σ_{-1}.

Задачі дослідження.

Провести експерименти з визначення втомної міцності тонколистового титану ВТ1-0 до та після модифікування поверхневого шару ВІАвІР.

Визначити значення межі витривалості σ_{-1} титану ВТ1-0 з модифікованою поверхнею вище на (12-17)% в порівнянні зі значенням σ_{-1} не модифікованого титану ВТ1-0.

На основі аналізу кривих втоми визначити оптимальне значення технологічних параметрів ВІАвІР для гарантованого зміцнення титану ВТ1-0 в даному (вибраному) проміжку параметрів.

Виклад основного матеріалу. Модифікування ВІАвІР виконано за допомогою установки, до складу якої входять вакуумна камера та системи – вакуумування, газопостачання та контролю температури. Змінюючи вихідні технологічні параметри (робочий тиск P в вакуумній камері під час процесу азотування та температура t процесу азотування), можна змінювати властивості модифікованого поверхневого шару титанових сплавів, а отже і їх експлуатаційні властивості в цілому.

В роботі, що представлена, проведено дослідження характеру впливу покриття (з модифікацією поверхневого шару ВІАвІР) на витривалість при високій частоті (біля 10 кГц) змінного навантаження. Зразки довжиною 24,1 мм мали в зоні втомного руйнування поперечній переріз розміром (6×0,5) мм. Цілком обов'язковою є необхідність, щоб для коректного зіставлення майбутніх результатів розмір відповідного поперечного перерізу у зразків для випадку розтягу-стиску повинен бути аналогічним; частота випробувань також.

Розрахунки показують, що резонансна довжина металевого стрижня, який коливається на частоті 10 кГц по основній формі, повинна бути доволі значною – біля 240÷250 мм. Оскільки при таких довжинах забезпечити необхідний розмір (6×0,5) мм перерізу зразка без втрати його стійкості практично неможливо, із-за мінімальної жорсткості при згинанні, то в даному випадку необхідний пошук вирішення цієї проблеми. Пластини з таких матеріалів, що зібрані в пакет, працюють саме в умовах циклічного розтягу-стиску при частотах (3,10,20,40) кГц. Для того, щоб ще більше підвищити стійкість при поздовжніх коливаннях таких зразків, їх випробування було проведено на частотах, більших ніж (3;10) кГц, тому що, наприклад, при 20 кГц довжина зразка буде меншою ніж довжина при 10 кГц рівно в 2 рази.

Експериментальна частина. Як приклад, наведемо послідовність дій при тестовому визначенні втомної міцності по запропонованій методиці. Вихідні дані: робоча номінальна частота випробувальної установки (10÷11) кГц; (ВТ1-0) – титановий сплав у формі тонколистових матеріалів, які підлягають випробуванням на втомну міцність.

Виходячи з заданої частоти розраховано розміри і виготовлено циліндричний напівхвильовий стрижень з вантажами масою G, матеріал якого - титановий сплав ВТ1-0.

Розрахункові характеристики цього стрижню:

$E_1 = 1{,}15\times10^5$ МПа; $F_1 = 38{,}465$ мм^2; $\gamma_1 = 4{,}49$ г/см^3; $g = 981$ см/сек^2; $G = 40{,}989$ г; $2a =$ 48,2 мм.

З урахуванням знайденого розміру $2a$ виготовлена серія зразків без вантажів при загальній довжині $l < 2a$, запас якої потрібний для закріплення на вантажі G.

Розрахункові характеристики зразка: $E = 7{,}2\times10^5$ МПа; $\gamma = 2{,}8$ г/см^3; $2a = 48{,}2$ мм; $F = 2{,}5$ мм^2; $h = 0{,}5$ мм^2; $b = 5$ мм. Після складання коливальної системи, встановлення її на вібратор та збудження резонансних коливань виміряна її частота $f = 10{,}7$ кГц.

Використавши наведені вище характеристики матеріалів, знайдено

$$\xi = \sqrt{\frac{\rho_1 / \rho}{E_1 / E}} = 1{,}001 = 1.$$

З урахуванням цього значення ξ вираз (5.7) матиме вигляд

$$\frac{M_1 + 2M}{G} = katgka, \qquad (1)$$

де $\frac{M_1+2M}{G}=\frac{a\left(F_1\rho_1+2F\rho\right)}{G}=0{,}1098=0{,}11.$

Найменший (основний) корінь трансцендентного рівняння (1) в цьому випадку становить $ka=0{,}326$. Після внесення цього ka в (5.9) з'являється можливість визначити власну частоту системи, яка повинна мало відрізнятись від резонансної частоти $f=10{,}7$ кГц. Отримано

$$f=\frac{ka}{2\pi a}\sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}=10{,}818\times10^3 \text{ 1/сек}=10{,}8 \text{ кГц}.$$

Різниця між експериментальним значенням $f=10{,}7$ кГц і розрахунковим - $f=$ 10,8 кГц становить величину, яка менше 1%. Відповідно до знайденого $ka=0{,}326$ вирази для переміщень і напружень будуть мати вигляд

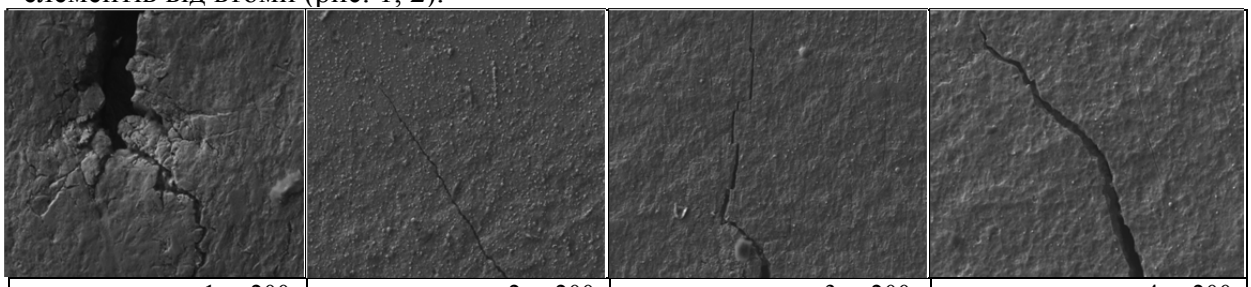
$$W=W_0\frac{\sin kx}{\sin ka}=W_0 3{,}122\sin\left(0{,}326\frac{x}{a}\right);$$

$$\sigma=W_0\frac{kE}{\sin ka}\cos(kx)=W_0 3{,}041\cdot10^2\cos\left(0{,}326\frac{x}{a}\right) \text{ кг/мм}^3,$$

де W_0-переміщення при $x\geq a,$ які вимірюються за допомогою мікроскопа.

Аналогічні розрахункові співвідношення можна отримати для зразків інших металів, наприклад, із титанового сплаву ВТ1-0. Для цього достатньо ввести у відповідні загальні вирази для f,W,σ відповідні характеристики цих матеріалів.

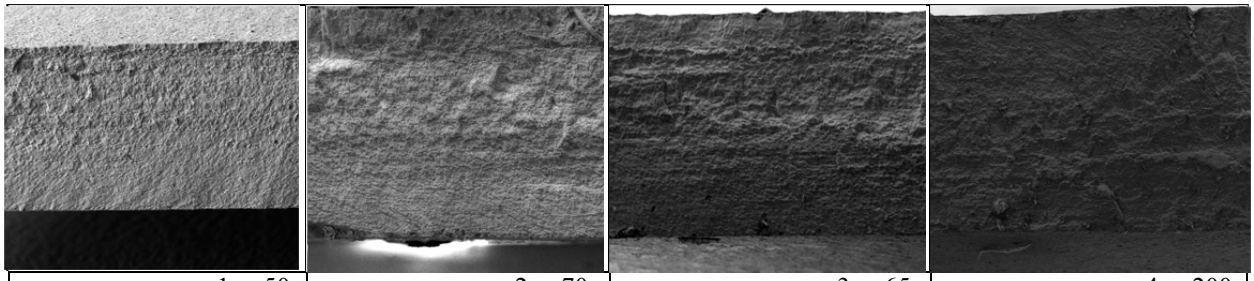
При систематичному повторенні навантаження та розвантаження проходить накопичення дефектів структури матеріалу, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування конструкційних елементів від втоми (рис. 1, 2).



1, x 200	2, x 200	3, x 200	4, x 200

Рисунок 1 - Розвиток тріщини по поверхні зразка з Ті-сплаву: при температурі 750^{0}С:
1 – до азотації (ВТ1-0); *2* – після азотації (ВТ1-00); *3* – до азотації (ВТ1-00);
4 – після азотації (ВТ1-00).

Джерело: розроблено авторами



1, x 50	2, x 70	3, x 65	4, x 200

Рисунок 2 - Злом від втоми титанового сплаву ВТ1-0 після модифікації методом вакуумного іонного азотуванням в імпульсному режимі: – при Т = 390°С; *2* – при Т = 473°С;
3 – при Т = 590°С; *4* – при Т = 750°С.

Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 показані зруйновані від втоми зразки титанового сплаву ВТ1-0 і ВТ1-00. Тестові випробування цих зразків проведено на частоті 10,7 кГц при амплітудних значеннях резонансних коливань маси G приблизно 0,07 мм. Для зразка сплаву ВТ1-0 така амплітуда відповідає напруженню $\sigma(x=0)\approx$ 22 кг/мм^2. Руйнування зразків відбулось після 12 хвилин, тобто після витримки 8×10^6 циклів до моменту появи втомної тріщини.



Рисунок 3 - Зруйновані від втоми зразки із сплавів ВТ1-0 і ВТ1-00

Джерело: розроблено авторами

З рисунку 3 видно, що руйнування зразка не обов'язково відбувається в центрі (при $x=0$). Зона ймовірного руйнування в даному випадку включає в себе практично весь зразок по його довжині, оскільки функція $\cos\left(0{,}326\frac{x}{a}\right)$ в межах $-a\le x\le a$ змінюється вкрай несуттєво – від 1,0 при $x=0$ до 0,9473 при $x=\pm a$. Виходячи з цього, для гарантованого втомного руйнування зразків на віддаленні від граничних перерізів $x=\pm a$ вони виконані з галтелями мінімального радіусу.

Досліджено витривалість п'яти груп зразків, що виготовлені із тонколистового титанового сплаву ВТ-1 в стані поставки товщиною 0,55 мм. Ширина зразків – 6 мм, довжина від вільного краю до вісьової лінії закріплення – близько 21 мм.

Одна група під номером №1 – зразки без обробки, чотири інші групи під номерами №2-5 з модифікованою поверхнею відповідно до змінних параметрів азотування (табл. 1).

Таблиця 1 – Технологічні параметри та границі витривалості для п'яти груп зразків

№ групи зразків	P, 10^{-1} Па	T, °С	σ_{-1}, МПа	δ, %
1	–	–	270	0
2	4,5	530-540	314	16,29
3	32	530-540	317	17,40
4	74	530-540	302	11,85
5	4,5	490-500	317	17,40

Джерело: розроблено авторами

Тривалість процесу технологічної обробки була єдина для зразків всіх чотирьох пар. Втомні криві і межі витривалості σ_{-1}, які отримано на базі 10^7 циклів навантаження, для п'яти груп зразків наведено відповідно на рис. 4 - 8 та в таблиці 1. Крім цього, на рис. 9 для зручності та наочності при порівнянні експериментальних результатів ці криві приведені в їх сукупності.

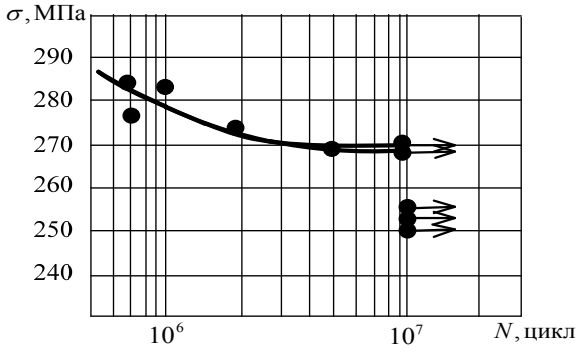


Рисунок 4 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 без обробки азотуванням (група №1)

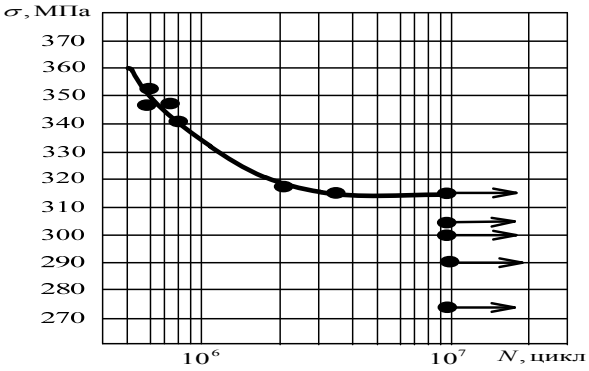


Рисунок 5 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки азотуванням (група №2)

Джерело: Розроблено авторами

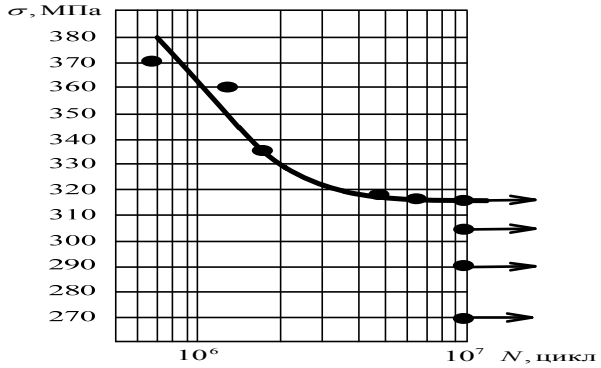


Рисунок 6 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки азотуванням (група №3)

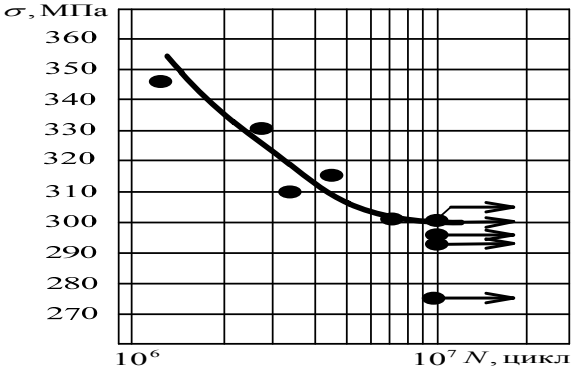


Рисунок 7 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки

Джерело: розроблено авторами

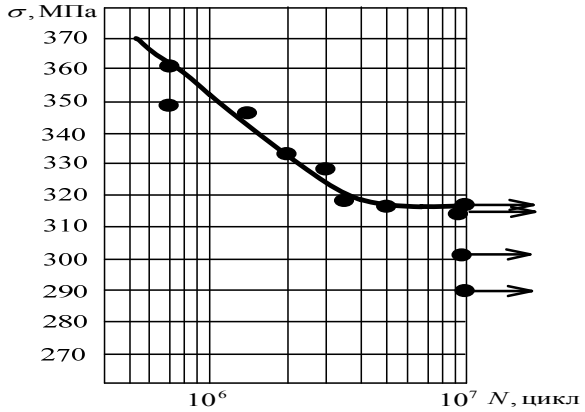


Рисунок 8 - Крива втоми сплаву ВТ1-0 після обробки азотуванням (група №5)

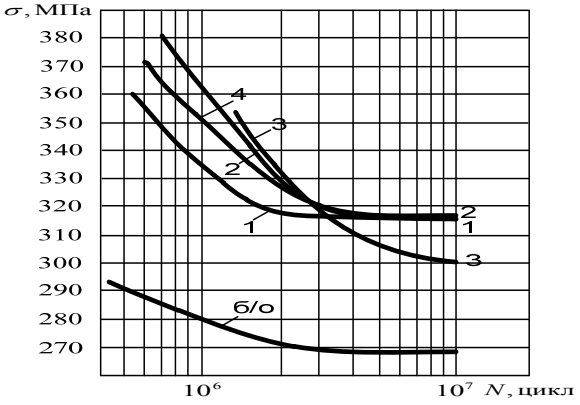


Рисунок 9 - Зведена сукупність кривих втоми сплаву ВТ1-0 без обробки (б/о) та після обробки азотуванням (група №1 та групи №2-5)

Джерело: розроблено авторами

При побудові втомних кривих для обчислення напружень використано величини: x_1 = 3,34 мм; x_2 = 12,21 мм, що отримано шляхом вимірювання при коливаннях на частоті f = 11,9 кГц.

Виходячи з x_1 та x_2, знайдено: x_0 = 7,28 мм; k = 0,3123 1/мм; $U(kx_0)$ + $(B/A)V(kx_0)$=0,761.

Враховуючи $\rho = \gamma/g$, де $\gamma = 4{,}5\times10^{-6}$ кГ/мм^3; $g = 9{,}81\times10^3$ мм/с^2; $h = 0{,}55$ мм отримано значення $\sigma^* = 1{,}54$ кГсек^2/мм^3.

Якщо амплітуда $A = W(x=0)$ вимірюється в мм, частота f в кГц, то при даному σ^* напруження σ будуть мати розмірність кГ/мм^2.

Дані, які наведені на відповідних рисунках 4 - 9 та в таблиці 1, свідчать про цілковиту доцільність обґрунтування підходу, що використовує високочастотний метод експериментального визначення меж витривалості. Висока частота (в нашому випадку 11-12 кГц) змінного навантаження дозволила в реальні терміни провести в повному об'ємі порівняльні втомні випробування п'яти груп зразків. Стосовно результатів власне втомних випробувань, відображених в таблиці 1 та на рисунках 4 - 9, слід відзначити наступне. Видно, що обраний варіант модифікацій, призводять до позитивних результатів – підвищують значення σ_{-1}. Як видно з таблиці 1, величина цього підвищення, вираженого через $\delta=(\sigma_{-1}/\sigma_{-1o}-1)\times100\%$ (σ_{-1o} – границя витривалості не модифікованого матеріалу) становить приблизно (12÷17)%. Цей результат відповідно до мети роботи можна вважати цілком придатним в якості підґрунтя для подальшого використання і розвитку використаної технології поверхневого зміцнення вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі. При розгляді кривих втоми в їх сукупності, як приведено на рисунку 9, впадає в очі практично повна зовнішня тотожність правих гілок кривих (1,2,4) на ділянці починаючи приблизно з $N=(3\div4)\times10^6$ циклів навантаження. В зворотному напрямі ліві гілки цих кривих не співпадають і їх хід носить дещо хаотичний характер. Гіпотетичне пояснення співпадіння кривих в першому випадку можна обґрунтувати несуттєвим впливом на втому тих розбіжностей, що відрізняють групи зразків (2,3,5) між собою. Якщо це так, то внаслідок цього можна дійти до корисного практичного висновку про порівняно широкий проміжок між групами зразків під номерами №2-5, в якому характеристика σ_{-1} буде гарантовано вищою від σ_{-1o}. Що стосується розбіжностей між лівими гілками експериментальних кривих, то оскільки в даному випадку вони знаходяться в зоні змішаного руйнування – частково від втоми і частково від динамічного перевантаження, то можливо внаслідок більшої чутливості статичної міцності до відмінностей між групами зразків під номерами №2-5 порівняно з втомною міцністю маємо значну розбіжність в траєкторії лівих гілок кривих. Має безумовно значення в цьому випадку кількість зразків, що випробувані при одному рівні навантаження – чим більше зразків, тим ближче траєкторія до деякої ідеальної для даного експерименту.

Висновки. 1. Виконано експерименти з визначення втомної міцності тонколистового титану ВТ1-0 до та після модифікування поверхневого шару за допомогою технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі. Втомні випробування призматичних зразків при їх резонансних згинних коливаннях проведено при високій частоті навантаження – (11-12) кГц. Попередня модифікування зразків виконана по технології вакуумного іонного азотування в ізотермічному режимі.

2. Побудовані в результаті проведених випробувань втомні криві на базі 10^7 циклів навантаження. Проведено випробування п'яти груп зразків – одна група в стані поставки без обробки і чотири групи після технологічного модифікування шару. З кривих втоми отримано значення меж витривалості σ_{-1} при симетричному змінному навантаженні. Показано, що незалежно від варіації параметрів технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі в заданому їх діапазоні, значення межі витривалості σ_{-1} титану ВТ1-0 з модифікованою поверхнею вище на (12-17)% порівняно зі значенням σ_{-1} не модифікованого титану ВТ1-0.

3. Зроблено припущення, що виходячи з наочного співпадіння кривих втоми для груп зразків 2,3,5 на ділянці $N\geq3\times10^6$ цикл., можна сподіватись про гарантоване зміцнення титану ВТ1-0 в даному (вибраному) проміжку параметрів.

4. Викладена розрахунково-експериментальна методика визначення витривалості матеріалів на тонкостінних зразках при циклічному навантаженні розтязі-стиску в умовах високої частоти. Враховуючи її підтверджену працездатність та теоретичну обґрунтованість, вона цілком придатна для дослідження втомної міцності тонколистових матеріалів в залежності від впливу різних фізико-механічних та технологічних факторів, в тому числі поверхневої модифікації в інший спосіб. З'являється можливість для порівняння втомної міцності титанових сплавів до та після азотації при циклічному згинанні та однорідному розтязі-стиску в умовах повної ідентичності вихідних характеристик і факторів за виключенням тільки виду даного навантаження.

Список літератури

1. A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, M. O. Lysenkov. Atigue strength of metals with hardening coatings (Review). *Strength of Materials,* 45, №3. P. 284–294 (2013).
2. A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, A. V. Rutkovskii Effect of vacuum deposited coatings on the fatigue strength of commercial-grade titanium. *Strength of Materials.* 27, №11-12. 659–664 (1995).
3. Б. А. Ляшенко, А. Г. Трапезон, А. В. Рутковский. Вакуумно-плазмені покриття як резерв підвищення сопротивления усталеності листових матеріалів. *Вібрації в техніці і технологіях.* 21, № 5. С. 76–79 (2001).
4. A. G. Trapezon, B. A. Lyashenko, N. V. Lipinskaya Fatigue of VT20 titanium alloy with vacuum-plasma coatings at high temperatures. *Strength of Materials.* 41 №4. С. 417–422 (2009).
5. Y. Su, S. Yao, and C. Wei Influence of single- and multilayer TiN films on the axial tension and fatigue performance of ANSI 1045 steel. *Thin Solid Films.* 338, № 1-2. С. 177–184 (1999).
6. S. Das, S. Guha, and R. Ghadai Structural and mechanical properties of CVD deposited titanium aluminum nitride (TiAlN) thin films. *Appl. Phys. A*. 123, №412. P. 1–5 (2017).
7. X. Xing, H. Wang, and T. Jin Scratch and wear behaviours of metallised Ti thin films deposited on Al2O3 substrate. *Appl. Phys. A*.. 124, № 718. P. 1–12 (2018).
8. M. Eshaghpour, I. Ebrahimzadeh, and M. Rafiei Enhanced Surface Properties of Plain Carbon Steel by Duplex Process of Friction Stir Processing and Plasma Nitriding. *JMEPEG*, 30. P. 2991–3002 (2021).
9. Z. Peng, H. Zhao Corrosion Mechanism of a Plasma Nitriding–Treated Alloy. Strength of Materials, 53, №1. 83–87 (2021).
10. I. Pohrelyuk, S. Lavrys, O. Sakharuk, and I. Stasyshyn Pretreatment Influence on Titanium Surface Properties After Gas Nitriding. *JMEPEG.* 26. P. 5072–5078 (2017).
11. Рутковський А.В., Трапезон О.Г., Маркович С.І., Бевз О.В. Розробка методики для експериментального визначення втомної міцності дослідних зразків з титанових сплавів з модифікованими поверхнями. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. II. С. 143-147
12. Рутковский А.В., Трапезон О.Г., Мірненко В.І., Єрмолаєв В.В., Антонюк В.С., Бондар А.О. Методика та результати прискореного визначення циклічної міцності титану з тонко плівковими нітридними покриттями. *6-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*: Тези доповідей (21-23 травня 2003, Львів). Львів: 2013. С. 157-158

References

1. Trapezon, A. G., Lyashenko, B. A., & Lysenkov, M. O.. (2013). Atigue strength of metals with hardening coatings (Review). *Strength of Materials,* 45, №3. 284–294
2. Trapezon, A. G., Lyashenko, B. A., & Rutkovskii, A. V. (1995). Effect of vacuum deposited coatings on the fatigue strength of commercial-grade titanium. *Strength of Materials,* 27, №11-12. 659–664
3. Lyashenko, B. A., Trapezon, A. H., & Rutkovskyy, A. V. (2001). Vakuum-plazmennыe pokrыtyya kak rezerv povыshenyya soprotyvlenyya ustalosty lystovыkh materyalov. *Vybratsyy v tekhnyke y tekhnolohyyakh*, 21, № 5, 76–79
4. Trapezon, A. G., Lyashenko, B. A., & Lipinskaya, N. V. (2009).Fatigue of VT20 titanium alloy with vacuum-plasma coatings at high temperatures. *Strength of Materials,* 41, №4. 417–422
5. Su, Y., Yao, S., & Wei, C. (1999). Influence of single- and multilayer TiN films on the axial tension and fatigue performance of ANSI 1045 steel. *Thin Solid Films.* 338, № 1-2. 177–184
6. Das, S., Guha, S., & Ghada,i R. (2017). Structural and mechanical properties of CVD deposited titanium aluminum nitride (TiAlN) thin films. *Appl. Phys. A.,* 123, №412. 1–5
7. Xing, X., Wang, H., & Jin, T. (2018). Scratch and wear behaviours of metallised Ti thin films deposited on Al2O3 substrate. *Appl. Phys. A.,* 124, № 718. 1–12
8. Eshaghpour, M., Ebrahimzadeh, I., & Rafiei, M. (2021). Enhanced Surface Properties of Plain Carbon Steel by Duplex Process of Friction Stir Processing and Plasma Nitriding. *JMEPEG*, 30. 2991–3002

9. Peng, Z., & Zhao, H. (2021).Corrosion Mechanism of a Plasma Nitriding–Treated Alloy. *Strength of Materials*, 53, №1. 83–87
10. Pohrelyuk, I., Lavrys, S., Sakharuk, O., & Stasyshyn, I. (2017). Pretreatment Influence on Titanium Surface Properties After Gas Nitriding. *JMEPEG*, 26. 5072–5078
11. Rutkovskyi, A.V., Trapezon, O.H., Markovych, S.I., & Bevz, O.V. (2025). Development of a Technique for Experimental Determination of Fatigue Strength of Test Samples of Titanium Alloys with Modified Surfaces. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences,* 12(43), II, 143-147 [in Ukrainian].
12. Rutkovskyi, A.V., Trapezon, O.H., Mirnenko, V.I., Yermolaiev, V.V., Antoniuk, V.S., & Bondar, A.O. (2013). Metodyka ta rezultaty pryskorenoho vyznachennia tsyklichnoi mitsnosti tytanu z tonko plivkovymy nitrydnymy pokryttiamy. 6-y Mizhnarodnyi sympozium ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi: Tezy dopovidei (21-23 travnia 2003, Lviv). Lviv: 157-158 [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher, **Oleksandr Trapezon**, DSc, leading researcher
National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Ukraine
Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Bevz**, Assos. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Study of the Fatigue Strength of Titanium aLloys Modified by Vacuum Ion Nitriding in the Pulse Mode Under High-Frequency Loading

In the work presented, a study was carried out of the effect of the coating (modification of the surface layer by vacuum ion nitriding in the pulse mode on endurance at a high frequency (about 10 kHz) of variable load. Samples with a length of 24.1 mm had a cross section measuring (6x0.5) mm in the fatigue failure zone. It is absolutely necessary that for a correct comparison of future results, the size of the corresponding cross section the cross-section of samples for the case of tension - compression should be similar; the frequency of tests should also be the same.

Calculations show that the resonant length of a metal rod that oscillates at a frequency of 10 kHz along its basic form should be quite significant - about 240÷250 mm. Since with such lengths it is practically impossible to ensure the required size (6x0.5) mm of the cross-section of the sample without losing its stability, due to the minimal stiffness during bending, in this case it is necessary to find a solution to this problem. Plates made of such materials, collected in a package, work exactly under conditions of cyclic stretching-compression at frequencies (3,10,20,40) kHz. In order to further increase the stability during longitudinal oscillations of such samples, their test was carried out at frequencies higher than (3;10) kHz, because, for example, at 20 kHz the length of the sample will be less than the length at 10 kHz by exactly 2 times.

Experiments were performed to determine the fatigue strength of thin sheet titanium VT1-0 before and after modification of the surface layer using vacuum ion nitriding technology in the pulse mode.Fatigue tests of prismatic samples during their resonant bending vibrations were carried out at a high frequency of loading - (11-12) kHz. Preliminary modification of the samples was carried out using the technology of vacuum ion nitriding in isothermal mode.

Fatigue curves based on 107 load cycles were constructed as a result of the tests. Five groups of samples were tested - one group in the state of delivery without processing and four groups after technological modification of the layer. From the fatigue curves, the values of endurance limits σ-1 under symmetrical variable load were obtained. It is shown that regardless of the variation of the parameters of the vacuum ion nitriding technology in the pulse mode in their given range, the value of the endurance limit σ-1 of titanium VT1-0 with a modified surface is higher by (12-17)% compared to the value of σ-1 of unmodified titanium VT1-0.

It is assumed that, based on the apparent coincidence of the fatigue curves for groups of samples 2, 3, 5 in the section $N \geq 3 \times 106$ cycles, one can hope for guaranteed strengthening of titanium VT1-0 in the given (selected) range of parameters.

The calculation-experimental method of determining the durability of materials on thin-walled samples under cyclic tension-compression loading under high-frequency conditions is described. Given its proven performance and theoretical validity, it is quite suitable for studying the fatigue strength of thin-sheet materials depending on the influence of various physical, mechanical and technological factors, including surface modification in another way.There is an opportunity to compare the fatigue strength of titanium alloys before and after nitriding under cyclic bending and homogeneous tension-compression under conditions of complete identity of the initial characteristics and factors, except for the type of the given load.

Одержано (Received) 06.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 04.03.2026

УДК 669.14.018.29:621.785 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).172-184

О. В. Кузик[1], доц., канд. техн. наук, **М. В. Босий**[1], **В. В. Слонь**[2], канд. техн. наук, **С. І. Шматько**, **В. М. Кропівний**[1], проф., канд. техн. наук, **Д. О. Атрощенко**[1]
[1] *Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*
[2] *Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький, Україна*
e-mail: kuzykov1985@gmail.com, bosiymv@ukr.net

Закономірності структурно-фазових перетворень та зміна рівня твердості легованої штампової сталі при ізотермічній обробці

У статті досліджено структурно-фазові перетворення та зміну рівня твердості штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2 під час багатостадійної ізотермічної термічної обробки. Встановлено, що бейнітна витримка не забезпечує необхідного пом'якшення, тоді як подальше нагрівання до температури 550…580 °С спричиняє коагуляцію карбідів і формування феритно-карбідної структури з твердістю 32…34 HRC. Визначено оптимальний режим обробки.

термічна обробка, бейніт, легований ферит, коагуляція карбідів, штампова сталь, кінетика перетворень, знеміцнення

Постановка проблеми. Леговані штампові сталі для гарячого деформування характеризуються підвищеною твердістю та теплостійкістю, що забезпечує їх експлуатаційні характеристики в умовах циклічних термомеханічних навантажень. Водночас після гарячої деформації або гартування такі сталі часто набувають значної твердості та структурної неоднорідності, що ускладнює механічну обробку й знижує технологічність виготовлення інструменту.

Традиційні режими відпалу не завжди забезпечують необхідний рівень пом'якшення у складнолегованих штампових сталях через підвищену стабільність переохолодженого аустеніту та уповільнену кінетику дифузійних перетворень у бейнітному інтервалі температур. Наявність карбідоутворюючих елементів (Cr, Mo, V, Nb, Ti) зумовлює формування термостабільних складних карбідних фаз, які істотно впливають на характер структурно-фазових перетворень і кінцеву твердість матеріалу.

Особливо складним є прогнозування зміни рівня твердості при багатостадійній ізотермічній термічній обробці, що включає тривалу витримку в бейнітній області з подальшим нагріванням у верхній частині температурного інтервалу відпускання. За таких умов одночасно відбуваються розпад переохолодженого аустеніту, виділення та коагуляція карбідних фаз, а також можливе локальне утворення аустеніту в зонах хімічної мікронеоднорідності, що зумовлює нелінійний характер зміни механічних властивостей.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених кінетиці бейнітного перетворення та коагуляції карбідів, закономірності формування пом'якшеного структурного стану у складнолегованих штампових сталях при тривалих ізотермічних витримках залишаються недостатньо систематизованими. Відсутній комплексний аналіз взаємозв'язку між об'ємною часткою бейнітної складової, дисперсністю карбідних фаз, хімічною мікронеоднорідністю та кінцевим рівнем твердості після багатостадійної термічної обробки.

© О. В. Кузик, М.В. Босий, В.В. Слонт, С.І. Шматько, В. М. Кропівний, Д.О. Атрощенко, 2026

У зв’язку з цим актуальним є встановлення закономірностей структурно-фазових перетворень і механізмів зниження твердості легованої штампової сталі при ізотермічній термічній обробці, що забезпечить наукове обґрунтування оптимальних режимів пом’якшувальної термообробки та підвищення технологічності виготовлення інструменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі термічної обробки легованих сталей переважно зосереджені на впливі температури аустенізації, режимів гартування та відпускання на формування мікроструктури й механічні властивості.

У роботі [1] Xia B. та ін. досліджено вплив температури гартування на структуру та ударну в’язкість пружинної сталі 50CrMnSiVNb. Встановлено, що підвищення температури аустенізації призводить до збільшення розміру зерна попереднього аустеніту, зміни морфології мартенситу та суттєво впливає на ударну в’язкість. Однак дослідження було зосереджене переважно на механічних властивостях після гартування, без детального аналізу тривалої ізотермічної витримки у бейнітній області та механізмів пом’якшення.

Pawlak K. та ін. в роботі [2] показали, що температура аустенізації визначає розмір зерна попереднього аустеніту та характер подальших фазових перетворень у низьколегованій борвмісній сталі. Автори встановили залежність між зерном аустеніту та зносостійкістю, проте питання кінетики бейнітного перетворення та зниження твердості при ізотермічній обробці залишилися поза межами дослідження.

Celada-Casero C. та співавтори [3] довели, що розмір зерна аустеніту суттєво впливає на характер мартенситного перетворення в низьковуглецевих сталях. Показано зміну морфології мартенситу та кінетики перетворення залежно від зернистості. Разом з тим не розглянуто процеси тривалого розпаду переохолодженого аустеніту в бейнітній області та подальші зміни структури при повторному нагріванні в міжкритичному інтервалі температур.

У дослідженні Parusov E.V. та ін. [4] проаналізовано кінетику розчинення аустеніту у високовуглецевій сталі залежно від температури нагрівання. Встановлено, що підвищення температури прискорює дифузійні процеси та змінює ступінь гомогенізації структури. Однак ця робота не охоплює ізотермічні перетворення в бейнітному інтервалі та механізми коагуляції карбідних фаз при повторному нагрівання.

Lutsenko V.A. та співавтори [5] дослідили особливості формування структури високовуглецевої сталі при прокатці та подальших термічних впливах. Автори підкреслюють роль хімічної мікронеоднорідності та легуючих елементів у стабілізації фазового складу. Проте питання цілеспрямованого зниження твердості через багатостадійну ізотермічну обробку в роботі не розглядалося.

Окрему увагу слід приділити роботі [6] авторів Lutsenko V.A., Golubenko T.M., Lutsenko O.V., у якій досліджено вплив температури термічної обробки на формування структури сталі Cr-Mo-V. Встановлено, що зміна температури нагріву суттєво впливає на фазовий склад, дисперсність структурних складових та механічні характеристики сталі. Показано, що підвищення температури аустенізації сприяє зростанню зерна попереднього аустеніту та зміні характеру подальших фазових перетворень. Разом з тим у роботі основну увагу приділено структуроутворенню при варіюванні температур нагрівання, тоді як закономірності тривалих ізотермічних витримок у бейнітній області та механізми цілеспрямованого зниження твердості через коагуляцію карбідних фаз детально не розглянуті. Отримані результати створюють теоретичну основу для

подальшого дослідження кінетики структурно-фазових перетворень при багатостадійній ізотермічній обробці.

Фундаментальні положення щодо механізмів фазових перетворень у сталях викладені в роботах Porter D.A., Easterling K.E., Sherif M.Y. [7] та Honeycombe R., Bhadeshia H. [8], де детально описано кінетику дифузійних та бездифузійних перетворень, закономірності формування бейніту та мартенситу, а також процеси коагуляції карбідних фаз при відпуску. Ці роботи формують теоретичну основу для аналізу структурних змін при багатостадійній термічній обробці.

У дослідженні Сидорчука О. М. [9] проаналізовано структуру та механічні властивості штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2, призначеної для гарячого деформування. Показано вплив легування та термічної обробки на формування карбідних фаз і характеристики міцності. У роботах Сидорчука О. М. та співавторів [10-12] досліджено вплив термічної обробки на структуру та теплостійкість штампових сталей системи Cr-Ni-Mo-V. Показано можливість регулювання аустенітного перетворення та підвищення експлуатаційної стійкості інструментальних сталей. Разом з тим питання тривалих ізотермічних витримок у бейнітному інтервалі та механізм зниження твердості через коагуляцію карбідних фаз залишаються недостатньо дослідженими.

У роботі Talebi та ін. [13] детально досліджено розклад залишкового аустеніту та пов’язане з цим виділення карбідів під час ізотермічного відпалу. Проте дослідження обмежене конкретною середньовуглецевою бейнітною сталлю та не охоплює особливості поведінки багатокомпонентних штампових сталей з підвищеним вмістом карбідоутворюючих елементів.

Ju та співавторів [14] проаналізували механізми укрупнення карбідних частинок, однак у роботі не розглянуто вплив тривалих ізотермічних витримок у бейнітному інтервалі температур на подальше структурне переформування при повторному нагріванні.

Chen та ін. [15] систематизували вплив мікролегування на стабільність карбідів, але не встановили кількісного зв’язку між складом складних карбідних фаз, їх дисперсністю та реальним зниженням твердості після багатостадійної термічної обробки.

Xu та співавторів [16] запропонували метод оцінки кінетики бейнітного перетворення, однак дослідження не враховує вплив хімічної мікронеоднорідності та багатоступеневих теплових циклів, характерних для технологічної обробки штампових сталей.

Gramlich та співавт. [17] дослідили процеси інтеркритичного нагріву, проте механізм конкуренції коагуляції карбідів і повторного утворення аустеніту не було проаналізовано з точки зору кількісного впливу на твердість у широкому температурному інтервалі 773…1053К (500…780 °С).

Важливість урахування структурної та хімічної мікронеоднорідності при аналізі фазових перетворень підтверджується роботою [18] Кропівного В. М., Босого М. В., Кузика О. В. та ін. у яких досліджено термодинамічні закономірності формування фазового складу у високоміцному чавуні. Показано, що температурні умови кристалізації суттєво впливають на розподіл легуючих елементів та локальні перетворення.

В роботі [19] Ауліна В.В. та ін. досліджено вплив структурного стану металевої матриці та морфології графітних включень на зносостійкість чавуну з вермикулярним графітом. Показано, що керування процесами формування мікроструктури, зокрема співвідношенням феритної та перлітної складових і дисперсністю структурних елементів, дозволяє суттєво змінювати механічні властивості матеріалу. Отримані

результати підтверджують важливу роль цілеспрямованого керування структурно-фазовим станом металевої матриці у формуванні експлуатаційних характеристик сплавів, що є актуальним і для легованих сталей, де зміна структури під час термічної обробки визначає рівень твердості та інші властивості матеріалу.

У роботі Галика А.В. [20] розглянуто принципи легування та термічної обробки швидкоріжучих сталей. Показано, що карбідна неоднорідність істотно впливає на властивості матеріалу, а її зниження досягається оптимізацією складу та технології обробки. Разом з тим питання ізотермічних перетворень і зниження твердості при багатостадійній термічній обробці не розглянуто, що визначає актуальність даного дослідження.

Таким чином, аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що у достатньому обсязі досліджено вплив температури аустенізації на розмір зерна попереднього аустеніту та встановлено його визначальний вплив на морфологію мартенситу і кінцеві механічні властивості сталей. Проаналізовано кінетику розчинення карбідних фаз та аустенітного перетворення при нагріванні, а також показано роль легуючих і мікролегуючих елементів у формуванні фазового складу, стабільності карбідів і структурної спадковості. Окрему увагу приділено механізмам бейнітного та мартенситного перетворень, а також процесам виділення і укрупнення карбідних частинок під час відпускання.

Водночас питання ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту у бейнітній області для складнолегованих штампових сталей залишаються недостатньо систематизованими. Недостатньо досліджено вплив тривалих ізотермічних витримок на формування феритно-карбідної структури та механізм зниження твердості, пов’язаний із коагуляцією складних карбідних фаз при подальшому нагрівання в інтервалі 823…858К (550…580 °С). Обмеженими залишаються дані щодо нелінійного характеру зміни твердості при нагрівання після бейнітної ізотермічної витримки, коли одночасно протікають процеси коагуляції карбідів і можливі локальні аустенітні перетворення при наближенні до міжкритичних температур. Також відсутній кількісний аналіз взаємозв’язку між об’ємною часткою бейнітної складової, дисперсністю карбідних фаз і рівнем твердості після багатостадійної термічної обробки.

Саме зазначені аспекти визначають наукову новизну та актуальність даного дослідження, спрямованого на встановлення закономірностей структурно-фазових перетворень і механізмів зниження твердості сталі 4Х4Н5М4Ф2 при багатостадійній ізотермічній обробці.

Постановка завдання. Метою роботи є виявлення закономірностей структурно-фазових перетворень легованої штампової сталі, що забезпечують мінімізацію твердості при ізотермічній термічній обробці.

Виклад основного матеріалу. Методичний підхід до аналізу структурної та хімічної мікронеоднорідності досліджуваної сталі ґрунтується на комплексному застосуванні металографічних, мікротвердометричних та мікрорентгеноспектральних методів. Матеріалом дослідження була легована штампова сталь 4Х4Н5М4Ф2 – інструментальна сталь системи Cr–Ni–Mo–V з мікролегуванням Ti та Nb. Такий хімічний склад сприяє утворенню дисперсних легованих карбідів та підвищеній стабільності аустеніту при ізотермічних режимах термічної обробки. Початкова твердість гарячекатаного матеріалу становила 53 HRC, що ускладнювало механічну обробку, у зв’язку з чим було застосовано пом’якшувальну термічну обробку з метою формування технологічно придатного структурного стану.

Для відпрацювання режимів ізотермічної обробки виготовляли зразки квадратного перерізу розміром 15мм × 15 мм та товщиною 10 мм. Термічну обробку

здійснювали в електропечі з використанням кварцової трубки, що забезпечувало стабільність теплового режиму та мінімізувало окиснення поверхні. Контроль температури проводили за допомогою хромель-алюмелевих термопар.

Після завершення термічної обробки зразки піддавали механічній підготовці поверхні: шліфуванню та поліруванню на глибину приблизно 0,5 мм для видалення окалини та можливого зневуглецьованого шару. Така підготовка забезпечувала достовірність подальших досліджень мікроструктури та фазового складу.

Мікротвердість визначали на поперечних металографічних шліфах методом Віккерса з використанням мікротвердоміра ПМТ-3. Навантаження здійснювали шляхом вдавлювання алмазної піраміди в підготовлену поверхню з подальшим вимірюванням діагоналей відбитка за допомогою оптичної системи при збільшенні ×500. Значення мікротвердості (HV) обчислювали за стандартною методикою на основі середнього значення діагоналей.

Для забезпечення статистичної достовірності після кожного режиму термічної обробки виконували не менше десяти вимірювань у різних ділянках шліфу з визначенням середнього значення та стандартного відхилення.

Макротвердість визначали за шкалою HRC відповідно до вимог ДСТУ ISO 6508-1:2019 з використанням алмазного конуса. Для кожного режиму виконували по десять вимірювань із подальшою статистичною обробкою результатів.

Дослідження мікроструктури сталі проводили методом растрової електронної мікроскопії. Аналіз виконували на мікроскопі РЕМ-106. Дослідження проводили на підготовлених металографічних шліфах після завершення термічної обробки та охолодження до кімнатної температури. Структурний стан фіксували шляхом контрольованого охолодження після витримки. Такий підхід забезпечував збереження сформованої дислокаційної та фазової структури.

Аналіз результатів показав, що традиційні режими відпалу не забезпечують необхідного зниження твердості сталі 4Х4Н5М4Ф2. Це пов’язано з підвищеною стабільністю переохолодженого аустеніту та переважанням бейнітного механізму розпаду в досліджуваному температурному інтервалі, що призводить до формування структури з твердістю понад 40…45 HRC.

Для забезпечення оброблюваності різанням необхідно було сформувати структурний стан із твердістю 32…34 HRC. Досягнення такого рівня пов’язане з формуванням феритно-карбідної структури типу «легований ферит + дисперсні карбіди».

Тривала ізотермічна витримка в бейнітному інтервалі температур сприяє розпаду переохолодженого аустеніту, однак сформований бейніт характеризується підвищеною твердістю і не забезпечує достатньої технологічності матеріалу. У зв’язку з цим виникає необхідність подальшої термічної обробки, спрямованої на коагуляцію легованих карбідних фаз і релаксацію внутрішніх напружень.

Для встановлення оптимальних параметрів було проведено експериментальні дослідження. Ізотермічна термічна обробка досліджуваної сталі передбачала послідовне виконання кількох температурних етапів. На першій стадії зразки піддавали аустенізації з витримкою 1–2 год з метою максимально можливого розчинення частини легованих карбідів у матриці аустеніту.

Після цього зразки переносили до печі, нагрітої до температур бейнітного інтервалу, де здійснювали ізотермічну витримку протягом 20 год для забезпечення розпаду переохолодженого аустеніту. Наступним етапом було нагрівання до температури 550…580 °С, за якої інтенсивно протікали процеси коагуляції карбідних частинок. Охолодження після термічної обробки проводили разом із піччю. Режими

термічної обробки та відповідні значення мікротвердості й твердості досліджуваної сталі наведено у табл. 1. Зазначимо, що охолодження після кожного режиму здійснювали разом із піччю.

Таблиця 1 – Вплив режимів термічної обробки на фазовий склад і твердість легованої штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2

№	Режим обробки	Мікротвер-дість, HV	Твердість, HRC	Мікрострук-тура
1	Вихідний стан	673…681	53	бейніт (дисперсний)
2	1143 К (1,5 год)	424…426	43	бейніт
3	1323 К (1 год)	376…384	40	бейніт
4	1143 К (2 год) → 603…623 К (20 год) → 823…853 К (40 год)	335...340	34	феррит + карбіди
5	1323 К (1 год) → 723 К (20 год)	378…384	40	бейніт (дисперсний)
6	1143 К (2 год)→ 603…623 К (20 год) → 823…853 К (20 год)→ 823…853 К (20 год)	318…322	32	феррит + карбіди
7	1323 °С (1 год) → 723 К (20 год) → 823…853 К (20 год) → 823…853 К (20 год)	318…323	32	феррит + карбіди

Джерело: розроблено авторами

Отримані експериментальні дані (табл. 1) дозволяють встановити, що у вихідному гарячекатаному стані сталь характеризується максимальною твердістю (53 HRC) і дисперсною бейнітною структурою. Формування такого структурного стану пов’язане з умовами охолодження після гарячої деформації та впливом легуючих елементів, що сприяють стабілізації дисперсної структури і збереженню високого рівня твердості.

Після аустенізації при 1143 К (870 °С) (1,5 год) та ізотермічної витримки при температурі 603…623 К (330…350 °С) протягом 20…25 год структура представлена переважно бейнітом. Твердість у цьому випадку зберігається на рівні 40…45 HRC, що свідчить про формування дисперсної бейнітної складової.

Витримка в аустенітній області при температурі 1143…1323 К (870…1050 °С) з подальшим охолодженням з піччю призводить до формування переважно бейнітної структури з твердістю 40…43 HRC. Температура аустенізації істотно впливає на ступінь розчинення легованих карбідних фаз та хімічну однорідність аустенітної матриці. При нагрівання до 1143 К розчиняється лише частина карбідів системи Cr–Mo–V–Nb–Ti, що обумовлює формування аустеніту з відносно нижчим ступенем насичення вуглецем і легуючими елементами та збереженням більш дрібного зерна попереднього аустеніту. Підвищення температури до 1323 К забезпечує більш повне розчинення карбідних частинок і гомогенізацію структури, що супроводжується зростанням зерна аустеніту та підвищенням його стабільності. Це зумовлює відмінності у кінетиці подальших бейнітних перетворень і рівні твердості після аустенізації.

Після ізотермічної витримки в інтервалі 603…623 К протягом 20 годин відбувається розпад аустеніту за бейнітним механізмом. У цьому випадку твердість досягає 45 HRC, що відповідає типовим характеристикам бейніту. Підвищення температури витримки до 723 К (450 °С) супроводжується зменшенням твердості до 40

HRC. Це можна пояснити більш інтенсивним виділенням карбідних фаз і частковим збідненням твердого розчину легуючими елементами.

Подальше нагрівання до температури 823…853 К (550…580 °С) після ізотермічної витримки в бейнітному інтервалі призводить до коагуляції карбідних частинок. У результаті твердість знижується до 34 HRC, що відповідає формуванню феритно-карбідної структури.

Подвійне нагрівання при температурі 823…853 К (550…580 °С) з витримкою 20 + 20 год з проміжним печним охолодженням до кімнатної температури забезпечує послідовну коагуляцію карбідних частинок і формування стабільної феритно-карбідної структури з мінімальним рівнем твердості. Саме така послідовність температурних впливів забезпечує мінімізацію твердості до 32 HRC та формування стабільної феритно-карбідної структури. Подвійне нагрівання фіксує структуру після коагуляції карбідів і розділяє процеси їх укрупнення та стабілізації матриці. Повторне нагрівання активізує дифузійні процеси, що в умовах зниженої дислокаційної щільності сприяє формуванню більш рівноважного структурного стану та досягненню мінімального рівня твердості. На рисунку 1 наведено мікроструктуру зразків після різних режимів ізотермічної термічної обробки.

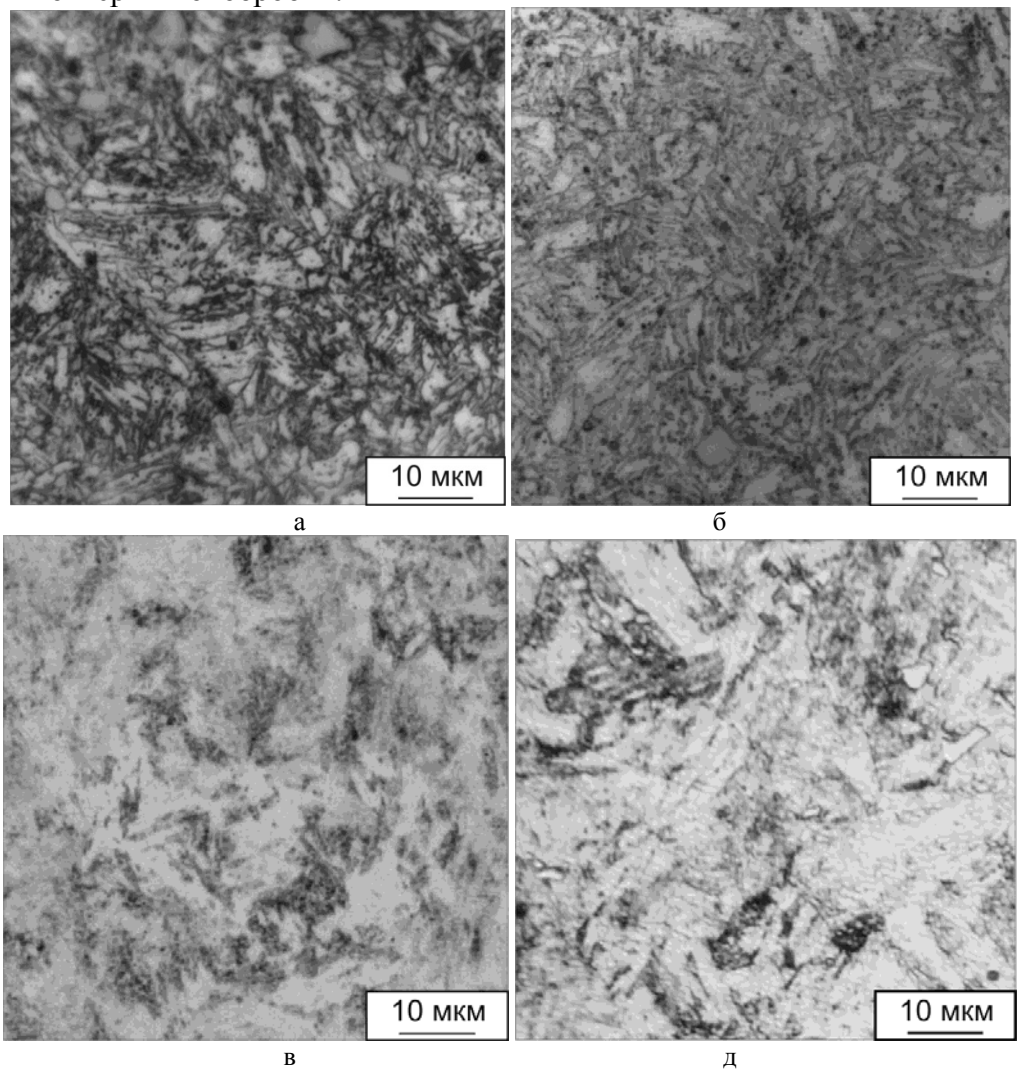


Рисунок 1 – Мікроструктура сталі після ізотермічної обробки:
а – зразок у вихідному стані; б – зразок № 5; д – зразок № 6; в – зразок № 7
Джерело: розроблено авторами

Металографічний аналіз показав, що після аустенізації при температурі 1143 та 1323 К з подальшим охолодженням разом із піччю, а також після ізотермічної витримки в інтервалі 603…723 К (330…450 °С) формується переважно бейнітна структура (рис. 1, б). Для неї характерна наявність голчастих або пластинчастих утворень у феритній матриці та виділення частинок другої фази розміром до 5…10 мкм, які, ймовірно, відповідають первинним або укрупненим легованим карбідам.

Порівняння структур після витримки при температурі 603…623 К та 723 К свідчить, що підвищення температури ізотермічної витримки до 723 К супроводжується певним укрупненням структурних складових і зменшенням їх дисперсності. Це може бути пов’язано з інтенсифікацією дифузійних процесів і більш активним виділенням карбідних фаз, що узгоджується зі зниженням твердості.

Після завершення повного циклу ізотермічної обробки (аустенізація → ізотермічна витримка в бейнітному інтервалі → нагрівання у температурному інтервалі 823…853 К → охолодження разом із піччю) структура сталі змінюється. Для режиму зразків №4 характерна структура типу «ферит + бейніт + карбіди», тоді як для режиму зразків №6 формується переважно феритно-карбідна структура з мінімальною кількістю бейнітної складової (рис. 1, в). У першому випадку твердість становить 34 HRC, у другому — 32 HRC, що відповідає мінімальним значенням, досягнутим у роботі. Отримані результати свідчать про пряму залежність рівня твердості від співвідношення бейнітної та феритно-карбідної складових у структурі.

Мінімальні значення твердості 32 HRC відповідають структурному стану, сформованому після подвійного нагріву в інтервалі 823…853 К. У цьому випадку структура характеризується переважанням легованого фериту з дисперсними карбідними виділеннями та мінімальною кількістю бейнітної складової.

Також слід зазначити, що у структурі сталі виявлено дисперсні карбідні виділення, рівномірно розподілені в матриці легованого фериту з залишковою бейнітною складовою. Їх формування пов’язане з тривалою ізотермічною витримкою в бейнітному інтервалі та подальшим укрупненням під час нагріву в інтервалі 823…853 К.

За результатами кількісного металографічного аналізу встановлено, що об’ємна частка бейнітної складової після повного циклу обробки становить 14–16 % залежно від режиму. Порівняння з результатами вимірювання твердості (табл. 1) свідчить про наявність залежності між вмістом бейніту та твердістю: зі зменшенням його частки спостерігається відповідне зниження твердості зразків.

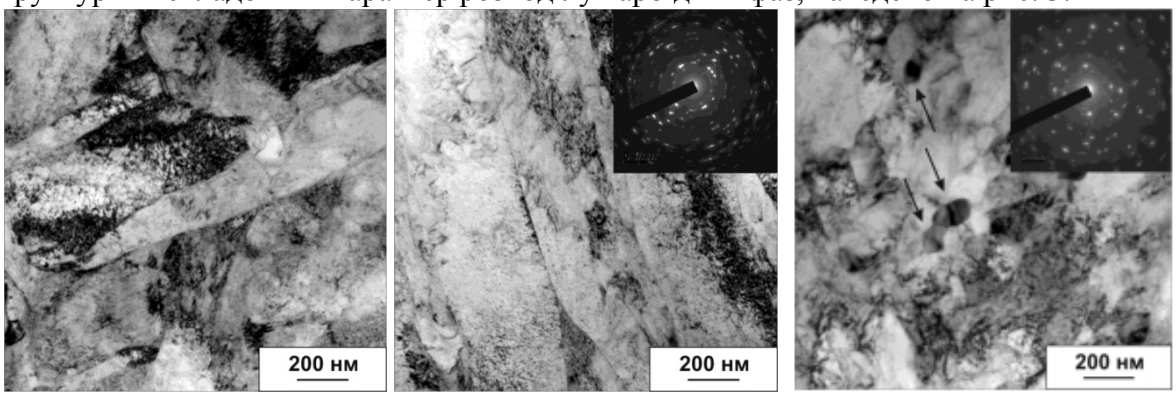
Наявність незначної кількості аустенітної фази в окремих мікрооб’ємах можна пояснити хімічною мікронеоднорідністю сталі. Локальний перерозподіл легуючих елементів під час виділення карбідів може зумовлювати стабілізацію збагаченого аустеніту в обмежених ділянках структури без формування значної об’ємної частки γ-фази.

Мікрорентгеноспектральний аналіз показав суттєві відмінності між хімічним складом матриці та карбідних частинок. Встановлено, що титан практично відсутній у феритній матриці, тоді як його вміст у великих частинках (5–8 мкм) становить 17…38 %. Це свідчить про формування складних легованих карбідів, збагачених Nb, Ti, Mo та V, які можна віднести до типу (Nb,Ti,Mo,V)C. Частина таких частинок може зберігатися з вихідного стану через їх високу термічну стабільність і неповне розчинення під час аустенізації.

Таким чином, мінімальні значення твердості досягаються у структурному стані, що характеризується переважанням феритної матриці з дисперсними карбідними виділеннями та мінімальною кількістю бейнітної складової.

Для аналізу еволюції мікроструктури при послідовному ускладненні режиму термічної обробки проведено порівняльний металографічний аналіз зразків після аустенізації, ізотермічної витримки в бейнітній області та подальшого нагріву до

підвищених температур. Отримані результати, що відображають зміну морфології структурних складових і характер розподілу карбідних фаз, наведено на рис. 3.



а б в

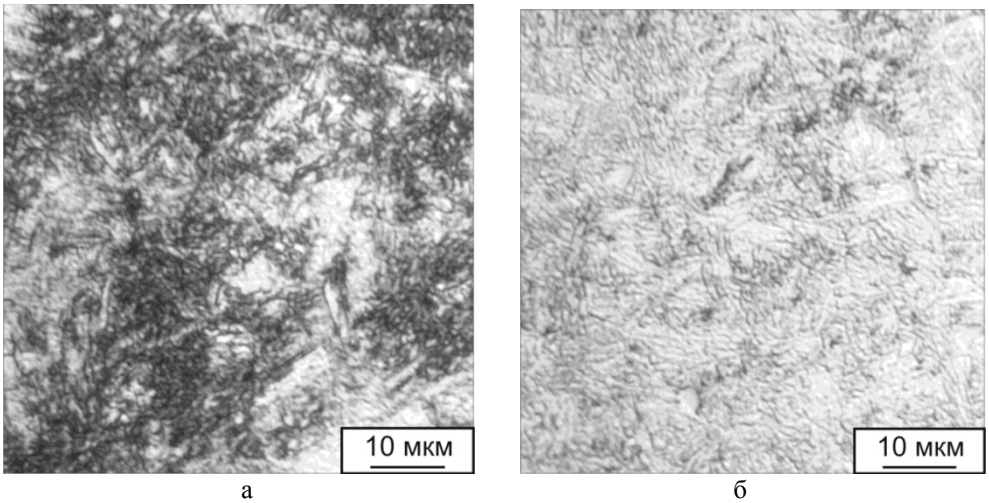
Рисунок 3 – Мікроструктура сталі після ізотермічної обробки : а – аустенізація 1323 К (1 год), охолодження з піччю; б – аустенізація 1323 К (1 год) → 723 К (20 год), охолодження з піччю; в – аустенізація 1323 К (1 год) → 723 К (20 год) → 903 К (20 год), охолодження з піччю

Джерело: розроблено авторами

Після аустенізації при температурі 1323 К (1 год) з подальшим охолодженням разом із піччю (рис. 3, а) формується переважно бейнітна структура з характерною пластинчасто-голчастою морфологією у феритній матриці. У структурі спостерігаються виділення карбідних частинок, розподілених як по межах колишніх аустенітних зерен, так і всередині структурних складових.

Ізотермічна витримка при температурі 723 К протягом 20 год (рис. 3, б) сприяє більш повному бейнітному розпаду переохолодженого аустеніту та формуванню більш однорідної дисперсної структури. Спостерігається зменшення внутрішньої напруженості та часткове укрупнення карбідних виділень, що узгоджується зі стабілізацією рівня твердості.

Після подальшого нагрівання до температури 903 К з витримкою 20 год (рис. 3, в) структура набуває ознак феритно-карбідного стану: зменшується вираженість бейнітної морфології, спостерігається укрупнення та більш рівномірний розподіл карбідних частинок у феритній матриці. Така еволюція структури супроводжується перерозподілом легуючих елементів і зміною рівня твердості відповідно до даних табл. 1.



а б

Рисунок 4 – Мікроструктура сталі після термічної обробки:
а – аустенізація 1323 К (1 год), охолодження на повітрі; б – аустенізація 1323 К (1 год) → 723 К (20 год) → 903 К (20 год), охолодження з піччю

Джерело: розроблено авторами

За результатами металографічного та електронно-мікроскопічного аналізу встановлено, що структура сталі представлена феритно-бейнітними або мартенситними складовими без ознак значної кількості залишкового аустеніту (рис. 4). Ізотермічна витримка при 723 К протягом 20 годин з подальшим охолодженням з піччю сприяє більш повному розпаду аустеніту за бейнітним механізмом. При цьому твердість залишається в межах 380…430 HV, що свідчить про збереження бейнітної складової без істотного пом'якшення матеріалу.

Більш складні структурно-фазові перетворення спостерігаються під час подальшого нагрівання сталі після ізотермічної витримки в бейнітній області в інтервалі температур 773…1053 К з наступним охолодженням разом із піччю. Саме ці процеси зумовлюють нелінійний характер зміни твердості.

Встановлено, що зі зростанням температури нагрівання до 853 К твердість поступово зменшується та досягає мінімального значення близько 300 HV. У подальшому, в інтервалі температур 903…953 К, твердість змінюється незначно, тоді як при нагрівання до температури 973…1053 К спостерігається її істотне зростання до приблизно 400 HV (рис. 5).

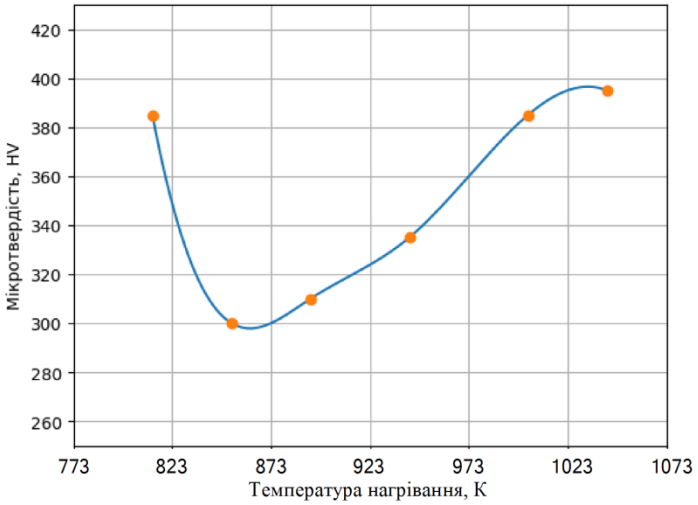


Рисунок 5 – Зміна твердості сталі після ізотермічної витримки в бейнітній області (723 К) та подальшим нагріванням в інтервалі 803…1053 К.

Джерело: розроблено авторами

Зниження твердості в інтервалі температур 823…853 К зумовлене розвитком дифузійних процесів у бейнітній структурі: відбувається перерозподіл вуглецю та легуючих елементів, коагуляція та укрупнення карбідних частинок. Сукупність цих процесів сприяє формуванню більш рівноважного феритно-карбідного стану.

Подальше підвищення температури до температури 903…953 К супроводжується стабілізацією твердості, що пов'язано з наближенням структури до квазістабільного стану після завершення основних процесів коагуляції карбідів.

У верхній частині температурного інтервалу понад 973 К, що наближається до міжкритичної області, можливе локальне утворення аустеніту в зонах, збагачених аустенітоутворюючими елементами (Ni, Mn). Під час подальшого повільного охолодження цей аустеніт зазнає розпаду, що супроводжується формуванням більш дисперсної структури та відповідним підвищенням твердості.

Таким чином, залежності мікротвердості від температури подальшого нагріву після бейнітної витримки має нелінійний характер з наявністю вираженого мінімуму при температурі близько 853 К. Встановлено, що у цьому температурному інтервалі домінують дифузійні процеси коагуляції карбідних частинок та релаксації внутрішніх напружень бейнітної структури, що забезпечує максимальне зниження твердості сталі.

Подальше підвищення температури нагріву призводить до поступового зростання твердості, що пов'язано з початком міжкритичного α→γ перетворення та формуванням нових структурних складових під час наступного охолодження. Таким чином, встановлено, що мінімальний рівень твердості визначається балансом між процесами коагуляції карбідних фаз і зародженням аустенітних ділянок, що обумовлює характерний U-подібний вигляд кривої твердості.

Висновки.

1. Встановлено, що після аустенізації сталі 4Х4Н5М4Ф2 при 1143…1323 К (870…1050 °С) з охолодженням разом із піччю формується переважно бейнітна структура з твердістю 380…420 HV (40…43 HRC), тоді як охолодження на повітрі призводить до утворення мартенситу з твердістю 550…630 HV. Отже, швидкість охолодження визначає морфологію продуктів розпаду аустеніту та рівень твердості.

2. Показано, що ізотермічна витримка в бейнітному інтервалі 603…723 К (330…450 °С) протягом 20 год забезпечує розпад переохолодженого аустеніту за бейнітним механізмом, однак не приводить до суттєвого пом'якшення сталі через збереження дисперсної бейнітної складової (380…450 HV).

3. Встановлено, що подвійний нагрів у температурному інтервалі 823…853 К (550…580 °С) із сумарною витримкою 40 год зумовлює коагуляцію легованих карбідів типу (Nb, Ti, V, Mo) C, релаксацію внутрішніх напружень і перерозподіл легуючих елементів у матриці, що забезпечує формування феритно-карбідної структури з мінімальною твердістю 32 HRC (300…320 HV).

4. Кількісним металографічним аналізом встановлено кореляцію між об'ємною часткою бейнітної складової та твердістю: зменшення частки бейніту до 14…16 % супроводжується зниженням твердості до мінімальних значень, що підтверджує визначальну роль феритної матриці з дисперсними карбідами у формуванні пом'якшеного структурного стану.

5. Обґрунтовано оптимальний режим ізотермічної термічної обробки сталі 4Х4Н5М4Ф2: аустенізація 1323 К (1050 °С) (1 год) → ізотермічна витримка 603…623 К (330…450 °С) (20 год) → подвійний нагрів 823…853 К (550…580 °С) (20 + 20 год) → охолодження з піччю, який забезпечує стабільну феритно-карбідну структуру та зниження твердості до рівня, придатного для механічної обробки.

Список літератури

1. Xia B., Zhang P., Wang B., Li X., Zhang Z. Effects of quenching temperature on the microstructure and impact toughness of 50CrMnSiVNb spring steel. *Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 870. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144856.
2. Pawlak K., Bialobrzeska B., Konat L. The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16, No. 4. P. 913–926. DOI: https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003.
3. Lutsenko V. A., Parusov E. V., Parusov O. V., Lutsenko O. V., Chuiko I. M., Golubenko T. M. Peculiarities of formation of high-carbon steel structure during rolling. *Materials Science*. 2023. Vol. 58, No. 5. P. 621–628. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-023-00708-z.
4. Parusov E. V., Klimenko A. P., Lutsenko V. A., Chuiko I. N., Sahura L. V., Sivak G. I. The influence of the heating temperature on the kinetics of austenite dissolution in high-carbon steel C2Dv. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2018. Vol. 1. P. 34–42. DOI: https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.34.103.
5. Celada-Casero C., Sietsma J., Santofimia M. J. The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels. *Materials & Design*. 2019. Vol. 167. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107625.
6. Lutsenko V. A., Golubenko T. M., Lutsenko O. V. The influence of processing temperature on the structure formation of the Cr–Mo–V steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2023. No. 37. P. 465–475.
7. Bhadeshia H. K. D. H., Honeycombe R. W. K. *Steels: Microstructure and Properties*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2017.

8. Porter D. A., Easterling K. E., Sherif M. Y. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. CRC Press, 2009.
9. Сидорчук О. М. Властивості штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 1. С. 108–112. DOI: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112.
10. Сидорчук О. М., Миронюк Д. В., Радченко О. К., Гогаєв К. О., Хонггуанг Є. Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації. *Металознавство та обробка металів*. 2019. № 2. С. 19–25. DOI: https://doi.org/10.15407/mom2019.02.019.
11. Сидорчук О. М., Гогаєв К. О., Радченко О. К., Миронюк Д. В., Миронюк Л. А. Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості. *Металознавство та обробка металів*. 2020. № 2. С. 29–37. DOI: https://doi.org/10.15407/mom2020.02.003.
12. Сидорчук О. М., Гогаєв К. О., Радченко О. К., Миронюк Д. В., Миронюк Л. А. Штампова кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 підвищеної стійкості. *Металознавство та обробка металів*. 2020. № 4. С. 30–38. DOI: https://doi.org/10.15407/mom2020.04.030.
13. Talebi S. H., Jahazi M., Melkonyan H. Retained austenite decomposition and carbide precipitation during isothermal tempering of a medium-carbon low-alloy bainitic steel. *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 8. Article 1441. DOI: https://doi.org/10.3390/ma11081441.
14. Ju Y. et al. Characterisation of precipitation and carbide coarsening in low-carbon low-alloy steels. *Materials Science and Engineering A*. 2018. Vol. 731. P. 298–308. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.048.
15. Chen Y. et al. Effect of alloying and microalloying elements on carbides in high-speed and alloy steels. *Metals*. 2024. Vol. 14, No. 2. Article 175. DOI: https://doi.org/10.3390/met14020175.
16. Xu Y. et al. Method to evaluate the kinetics of bainite transformation. *Metals*. 2017. Vol. 7, No. 9. Article 330. DOI: https://doi.org/10.3390/met7090330.
17. Gramlich A. et al. Tempering and intercritical annealing of air-hardening steels. *Steel Research International*. 2021. Vol. 92, No. 7. Article 2100180. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.202100180.
18. Кропівний В. М., Босий М. В., Кузик О. В., Кропивна А. В. Термодинамічні процеси при кристалізації і формуванні ліквації у виливках з високоміцного чавуну. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С. 79–86. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).79-86.
19. Aulin V., Kropivnyi V., Kuzyk O., Kropivna A. Increase of wear resistance of cast iron by the directed structure formation of its matrix with vermicular graphite. *Problems of Tribology*. 2019. Vol. 24(3/93). P. 74–84. DOI: https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-74-84.
20. Галико А. В. Деякі принципи раціонального легування і термічної обробки швидкоріжучих сталей. *Наукові записки КНТУ*. 2011. Вип. 11, ч. І. С. 88–89.

References

1. Xia, B., Zhang, P., Wang, B., Li, X., & Zhang, Z. (2023). Effects of quenching temperature on the microstructure and impact toughness of 50CrMnSiVNb spring steel. Materials Science and Engineering, 870. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144856
2. Pawlak, K., Bialobrzeska, B., & Konat, L. (2016). The influence of austenitizing temperature on prior austenite grain size and resistance to abrasion wear of selected low-alloy boron steel. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16(4), 913–926. https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.07.003
3. Lutsenko, V. A., Parusov, E. V., Parusov, O. V., Lutsenko, O. V., Chuiko, I. M., & Golubenko, T. M. (2023). Peculiarities of formation of high-carbon steel structure during rolling. Materials Science, 58(5), 621–628. https://doi.org/10.1007/s11003-023-00708-z
4. Parusov, E. V., Klimenko, A. P., Lutsenko, V. A., Chuiko, I. N., Sahura, L. V., & Sivak, G. I. (2018). The influence of the heating temperature on the kinetics of austenite dissolution in high-carbon steel C2Dv. Metal Science and Heat Treatment of Metals, 1, 34–42. https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.34.103
5. Celada-Casero, C., Sietsma, J., & Santofimia, M. J. (2019). The role of the austenite grain size in the martensitic transformation in low carbon steels. Materials & Design, 167. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107625
6. Lutsenko, V. A., Golubenko, T. M., & Lutsenko, O. V. (2023). The influence of processing temperature on the structure formation of the Cr–Mo–V steel. Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy, 37, 465–475.
7. Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. W. K. (2017). Steels: Microstructure and properties (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
8. Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y. (2009). Phase transformations in metals and alloys. CRC Press.
9. Sydorchuk, O. M. (2021). Properties of die steel 4Kh4N5M4F2 for hot deformation of non-ferrous metals

and alloys. Visnyk Vinnytsia Politechnic Institute, 1, 108–112. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112
10. Sydorchuk, O. M., Myroniuk, D. V., Radchenko, O. K., Hohaiev, K. O., & Khongguang, Ye. (2019). Increasing heat resistance and properties of die steel by controlling austenitic transformation during operation. Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv, 2, 19–25. https://doi.org/10.15407/mom2019.02.019
11. Sydorchuk, O. M., Hohaiev, K. O., Radchenko, O. K., Myroniuk, D. V., & Myroniuk, L. A. (2020). Heat treatment of high-resistance die steel. Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv, 2, 29–37. https://doi.org/10.15407/mom2020.02.003
12. Sydorchuk, O. M., Hohaiev, K. O., Radchenko, O. K., Myroniuk, D. V., & Myroniuk, L. A. (2020). Forged die steel 4Cr4N5M4F2 of increased resistance. Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv, 4, 30–38. https://doi.org/10.15407/mom2020.04.030
13. Talebi, S. H., Jahazi, M., & Melkonyan, H. (2018). Retained austenite decomposition and carbide precipitation during isothermal tempering of a medium-carbon low-alloy bainitic steel. Materials, 11(8), 1441. https://doi.org/10.3390/ma11081441
14. Ju, Y., et al. (2018). Characterisation of precipitation and carbide coarsening in low-carbon low-alloy steels. Materials Science and Engineering A, 731, 298–308. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.048
15. Chen, Y., et al. (2024). Effect of alloying and microalloying elements on carbides in high-speed and alloy steels. Metals, 14(2), 175. https://doi.org/10.3390/met14020175
16. Xu, Y., et al. (2017). Method to evaluate the kinetics of bainite transformation. Metals, 7(9), 330. https://doi.org/10.3390/met7090330
17. Gramlich, A., et al. (2021). Tempering and intercritical annealing of air-hardening steels. Steel Research International, 92(7), 2100180. https://doi.org/10.1002/srin.202100180
18. Kropivnyi, V. M., Bosyi, M. V., Kuzyk, O. V., & Kropivna, A. V. (2019). Thermodynamic processes during crystallization and segregation formation in ductile iron castings. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, 1(32), 79–86. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).79-86
19. Aulin, V., Kropivnyi, V., Kuzyk, O., & Kropivna, A. (2019). Increase of wear resistance of cast iron by directed structure formation of its matrix with vermicular graphite. Problems of Tribology, 24(3/93), 74–84. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-74-84
20. Galyko, A. V. (2011). Some principles of rational alloying and heat treatment of high-speed steels. Naukovi Zapysky KNTU, 11(1), 88–89.

Olexandr Kuzyk[1], Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Bosyi**[1], Sen. Lect., **Viktor Slon**[2], Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ludmyla Molokost**[1], **Serhii Shmatko**[1], **Volodymyr Kropivnyi**[1], Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Atroshchenko**[1]
[1] *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine,*
[2] *Kherson State Agrarian and Economic University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Regularities of Structural-Phase Transformations and Hardness Reduction of Alloyed Tool Steel During Isothermal Treatment

The aim of the study is to establish the regularities of structural evolution and to determine the mechanisms of hardness reduction in high-alloy die steel during multistage isothermal heat treatment. Special attention is paid to the influence of temperature–time parameters on the formation of a structurally stable state with reduced hardness and improved machinability.

The material under study was high-alloy Cr–Ni–Mo–V die steel 4Cr4N5M4V2. A comprehensive experimental approach was applied, including metallographic analysis, microhardness and hardness measurements, and scanning electron microscopy. It was established that isothermal holding in the bainitic temperature range (603–723 K) leads to the decomposition of supercooled austenite with the formation of a bainitic structure, which retains a relatively high hardness level. Subsequent heating in the temperature range 823–853 K promotes carbide coarsening and redistribution of alloying elements, resulting in the formation of a ferrite–carbide structure. A quantitative relationship between the volume fraction of the bainitic component and hardness was determined. The obtained results reveal a nonlinear dependence of hardness on temperature during post-bainitic heating.

It was found that the minimum hardness (32 HRC) is achieved after double heating at 823–853 K with a total holding time of 40 h, which ensures the formation of a stable ferrite–carbide structure with a minimal amount of bainite. The optimal heat treatment regime includes austenitization, isothermal holding in the bainitic range, and subsequent double-stage heating. The results can be used to optimize heat treatment processes and improve the technological properties of die steels.

die steel, isothermal heat treatment, bainite, carbide coarsening, hardness, structural evolution

Одержано (Received) 07.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 25.03.2026

УДК 620.22:666.762.1:004.89 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).185-193

Ю. Г. Ковальов, доц., канд. тех. наук, **С. Г. Ковальов**, канд. пед. наук, **І. Р. Євменьєв**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: yukovalyov@ukr.net

Машинне навчання як інструмент уточнення моделей дифузійного спікання кераміки Al_2O_3

У статті досліджено адаптацію класичних моделей дифузійного спікання Al_2O_3 за допомогою машинного навчання. Шляхом оптимізації параметрів класичних рівнянь (n=2, Q=451 кДж/кг) вдалося суттєво знизити похибку розрахунків. Найкращі результати показав алгоритм Random Forest Regressor (R^2=0,91), який враховує нелінійні ефекти та мінімізує відхилення до 1,74 мкм. Поєднання фізики дифузії з машинним навчанням дозволяє створювати надійні цифрові двійники для керування структурою кераміки.

індустрія 4.0, спікання, кінетика дифузії, машинне навчання, модель

Постановка проблеми. Широке застосування кераміки на основі Al_2O_3 у стратегічних галузях зумовлює жорсткі вимоги до її фізико-механічних характеристик, які безпосередньо залежать від параметрів мікроструктури. Ключовим етапом формування цих властивостей є спікання, проте традиційний аналітичний апарат (моделі Кобла, Кінжері тощо) дедалі частіше виявляється недостатньо точним. Це зумовлено ідеалізацією вихідних умов – припущеннями про сферичність частинок та ізотермічність процесів, що суперечить реальній кінетиці ущільнення полідисперсних порошків. Як наслідок, виникає невідповідність між теоретичними прогнозами та практичними результатами, зокрема через нелінійний вплив домішок і температурні градієнти, що провокує появу структурних дефектів. Таким чином, існує потреба у розробці адаптивних моделей, здатних враховувати реальні чинники еволюції зерен для забезпечення стабільної якості керамічних виробів.

У контексті концепції Industry 4.0 традиційні методики розрахунку вичерпали свій потенціал щодо точності, оскільки жорстка структура степеневих законів класичної фізики не здатна повноцінно описувати зміну енергії активації та нелінійні ефекти під час термічної обробки. Це актуалізує впровадження інтелектуальних алгоритмів, зокрема методів машинного навчання, як інструменту для створення предиктивних моделей нового покоління. Використання ансамблевих методів регресії дозволяє виявити приховані закономірності в експериментальних даних та інтегрувати їх у фізико-хімічну модель процесів дифузії. Розробка таких цифрових двійників є критично важливою для автоматизованого підбору режимів спікання, що забезпечують формування високощільної дрібнозернистої структури Al_2O_3 із заданим комплексом експлуатаційних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання кінетики спікання оксидних систем традиційно розглядаються крізь призму класичних дифузійних моделей, детально описаних у фундаментальних працях [1–3]. Проте сучасна наукова література свідчить про поступовий відхід від суто аналітичних методів на користь експериментально орієнтованих підходів. Зокрема, протягом 2018–2025 років значна увага дослідників зосереджена на альтернативних методах спікання, що дозволяють обійти обмеження класичного термічного нагріву.

© Ю. Г. Ковальов, С. Г. Ковальов, І. Р. Євменьєв, 2026

Серед найбільш перспективних напрямів виділяють технології холодного спікання (CSP) та надшвидкого високотемпературного синтезу (UHS), які мінімізують час перебування матеріалу при критичних температурах [4–6]. Окрему нішу займає електроімпульсне спікання (SPS/FAST), де накладання зовнішніх полів дозволяє досягати теоретичної щільності кераміки при значному зниженні енерговитрат. Ці роботи демонструють, що управління мікроструктурою можливе навіть за умов екстремально високих швидкостей нагріву, які класичні рівняння описують лише приблизно.

Паралельно із технологічними інноваціями розвивається напрям цифрової трансформації матеріалознавства. Останні публікації підтверджують ефективність гібридизації фізичних моделей із методами інтелектуального аналізу даних [7]. Дослідники все частіше використовують регресійні алгоритми для корекції емпіричних коефіцієнтів у реальному часі. Проте, попри наявність окремих рішень у сфері предиктивного аналізу, питання створення універсальних цифрових двійників для Al_2O_3, здатних точно прогнозувати ріст зерен на основі ансамблевих алгоритмів, залишається недостатньо висвітленим. Саме ця невідповідність у науковому знанні зумовлює необхідність поєднання класичної фізики дифузії з інструментарієм машинного навчання, на що й направлено дослідження даної роботи.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у мінімізації похибок характеристик мікроструктури кераміки Al_2O_3 шляхом інтеграції фундаментальних закономірностей зміни параметрів дифузійного спікання з інструментарієм інтелектуального аналізу даних.

Для реалізації поставленої мети було визначено такі завдання:

– проаналізувати фізичну природу процесів твердофазного ущільнення та теоретичні засади степеневих законів рекристалізації;

– сформувати структурований масив експериментальних показників (температурно-часові режими, динаміка зміни розміру зерен) на основі верифікованих джерел;

– виконати розрахунок кінетичних параметрів (енергії активації та показника росту) згідно з класичними лінеаризованими залежностями Арреніуса;

– побудувати та верифікувати регресійну модель предиктивного аналізу, здатну враховувати нелінійні фактори впливу на ріст зерен кераміки;

– здійснити порівняльну оцінку точності аналітичного та машинного підходів, встановивши межі їхнього ефективного застосування.

При виконанні завдань було використано наступні методи дослідження:

– аналіз термодинамічних параметрів та дифузійних механізмів на основі класичних теорій Кобла та Кінжері;

– метод найменших квадратів (МНК) для лінеаризації рівнянь Арреніуса та визначення базових констант (Q, n);

– регресійний аналіз, поліноміальна апроксимація та алгоритм Random Forest Regressor для моделювання багатофакторних залежностей;

– оцінка достовірності моделей за допомогою метрик: R^2 (коефіцієнт детермінації) та MAE (середня абсолютна похибка);

– методи побудови графіків, таблиць та карт властивостей для наочного представлення залежностей.

Чисельна реалізація розробленої моделі виконана мовою Python 3.10 у середовищі Google Colab з використанням бібліотек інтелектуального аналізу даних Scikit-learn та Pandas.

Виклад основного матеріалу. Твердофазне спікання залишається домінуючим методом консолідації технічної кераміки, охоплюючи до 70% ринку

високотехнологічних виробів. Процес структурування матеріалу традиційно поділяють на три послідовні стадії, кожна з яких визначається специфічними механізмами дифузії.

На початковому етапі внаслідок поверхневого масопереносу формуються первинні міжчастинкові контакти, що забезпечує цілісність пресовки без суттєвої усадки. Проміжна стадія характеризується інтенсивним ущільненням (до 90–95% від теоретичної щільності) внаслідок об'ємної та межової дифузії, що супроводжується ізоляцією пор. На завершальній стадії відбувається остаточне витіснення пористості та рекристалізація. Саме тут критичного значення набуває контроль кінетики росту зерен, оскільки неконтрольоване укрупнення кристалітів може нівелювати отримані механічні переваги.

Теоретичне описання цих процесів базується на фундаментальних працях В. Кінжері [1] та Р. Кобла [2], які характеризують взаємодоповнюючі фази ущільнення, де кожна описує свій критичний проміжок часу. Модель Кінжері сфокусована на кінетиці розвитку міжчастинкових контактів на ранніх етапах, тоді як підхід Кобла спрямований на формалізацію механізмів дифузійного ущільнення та еволюцію зернистої структури на завершальних стадіях.

Еволюція зернистості структури кераміки є визначальним чинником у формуванні комплексу експлуатаційних характеристик готового виробу. Фізичним рушієм цього процесу виступає міграція міжкристалітних меж, спрямована на мінімізацію надлишкової поверхневої енергії системи. У класичному матеріалознавстві кінетика укрупнення кристалітів формалізується через ізотермічні залежності розміру зерна від тривалості витримки. Теоретичним підґрунтям для такого опису слугує модель, відома як теорія Ліфшиця-Сльозова-Вагнера, що встановлює фундаментальний зв'язок між дифузійним масопереносом та динамікою росту середнього радіуса зерна:

$$d^n - d_0^n = K \cdot t, \quad (1)$$

де d – середній розмір зерна після часу t; d_0 – початковий розмір зерна, K – кінетична константа, що залежить від температури та коефіцієнта дифузії, n – показник, який визначає механізм росту. Кобл уточний значення цього показника для кераміки: n=2, для абсолютно чистих матеріалі без пор; n=3, коли рух межі гальмується розчиненими атомами домішок; n=4, для випадків, коли ріст зерен стримується порами, що знаходяться на межах зерен [3, 8].

Вагомим показником, що визначає фізико-механічний профіль кераміки (зокрема її щільність, межу міцності та коефіцієнт теплопровідності), є динаміка елімінації пористості. На ранніх етапах спікання пори мають нерівноважну морфологію та локалізуються у міжчастинкових пустотах пресовки. Внаслідок термічної активації відбувається зміна їхньої форми, вони поступово стають більш схожі на сфери, потім спостерігається ізоляція та подальше зникнення, що зумовлене спрямованими дифузійними потоками атомів і міграцією кристалічних меж. Для математичного опису кінетики ущільнення на завершальних стадіях часто застосовують експоненціальну залежність, що випливає з феноменологічного аналізу дифузійних процесів:

$$P(t)=P_0 \cdot \exp(-K \cdot t), \quad (2)$$

де $P(t)$ та P_0 – поточне та вихідне значення пористості відповідно; K – кінетична константа процесу.

Остання константа інтегрує в собі вплив температурного фактору та домінуючого механізму масопереносу, підпорядковуючись, як правило, класичному рівнянню Арреніуса [9]:

$$K(t)=K_0 \cdot \exp(-Q/R \cdot T), \quad (3)$$

Ця модель показує, що зі збільшенням часу та температури пористість зменшується, наближаючи матеріал до теоретичної щільності. Механічна міцність керамічних систем перебуває у детермінованій залежності від об'ємної частки пористості, оскільки вакантні мікропростори виконують роль локальних концентраторів напружень та редукують ефективну площу поперечного перерізу, що чинить опір зовнішньому навантаженню. Зростання відносної щільності матеріалу експоненціально підвищує його триботехнічні та міцнісні характеристики.

Для кількісного опису цього взаємозв'язку традиційно застосовують рівняння Шиллера (модель Ріса), яке апроксимує зміну межі міцності через степеневу функцію [10, 11]. Дана модель ілюструє високу чутливість кераміки до залишкових дефектів: навіть незначне зростання провокує суттєву деградацію міцності.

Хоча експериментальні дані роботи [12] загалом узгоджуються з тенденціями інтенсифікації росту зерен при підвищенні температури та тривалості витримки, реальна кінетика часто демонструє суттєві відхилення. Зокрема, критичною проблемою є аномальний ріст зерен, при якому вибіркове укрупнення окремих кристалітів порушує гомогенність структури та деградує механічні властивості кераміки [13, 14]. Такі стохастичні процеси важко описуються детермінованими рівняннями, що зумовлює необхідність переходу від стандартних емпіричних поправок до адаптивних інтелектуальних моделей.

У сучасному матеріалознавстві дедалі більшого значення набувають методи машинного навчання (МН), які дозволяють прогнозувати властивості матеріалів на основі великих масивів даних. На відміну від класичних моделей, що ґрунтуються на спрощених аналітичних рівняннях, дані підходи здатні враховувати багатофакторний вплив параметрів процесу – температуру, тиск, час спікання, склад та мікроструктурні особливості.

Основна ідея полягає у використанні відкритих баз даних (Materials Project, AFLOW тощо), де зібрано інформацію про структуру, склад і властивості тисяч матеріалів. На основі цих даних формуються ознаки, що описують матеріал: атомні радіуси, густина, пористість тощо. Далі застосовуються алгоритми машинного навчання – регресійні моделі, ансамблеві методи (Random Forest, Gradient Boosting), нейронні мережі або графові нейронні мережі [15-17].

Данні для аналізу, які були використанні у цьому дослідженні, наведенні в таблиці 1 і взяті з джерела [12].

Таблиця 1 – Експериментальні дані параметрів для розрахунків

Температура (К)	**Час (с)**	**d_0 (мкм)**	**d (мкм)**	**MgO (ppm)**
1673	3600	1,2	2,8	0
1673	14400	1,2	4,5	0
1673	36000	1,2	6,8	0
1773	3600	1,2	5,5	0
1773	14400	1,2	11,2	0
1773	36000	1,2	18,4	0
1873	3600	1,2	12,5	0
1873	18000	1,2	28,0	0
1673	3600	1,2	1,5	250
1773	3600	1,2	2,4	250
1873	3600	1,2	4,8	250

Джерело: [12]

Для лінеаризації рівнянь Арреніуса та визначення базових констант (Q, n), рівняння (1), з урахуванням (3), представимо у вигляді:

$$d^n - d_0^n = K_0 \cdot \exp((-Q/R \cdot T) \cdot t) \quad (4)$$

$$ln\,(d) = (1/n)\,ln\,(t) + const \quad (5)$$

Рівняння (5) є справедливим за умови ізотермічної витримки (T=const) та значного перевищення поточного розміру зерен над початковим ($d >> d_0$). Застосування методу найменших квадратів до вказаної залежності у логарифмічних координатах ln(d) – ln(t), дозволяє розрахувати фактичний показник степеня *n* для конкретної системи, що може відрізнятися від теоретично передбаченого значення *n*=3.

Після логарифмування рівняння (4), маємо:

$$ln\left(\frac{d^n - d_0^n}{t}\right) = ln(K_0) \cdot \left(-\frac{Q}{RT}\right). \quad (6)$$

Застосування методу найменших квадратів до вказаної залежності у відповідних логарифмічних координатах дозволяє отримати значення Q. Для наших данних застосування методу найменших квадратів дозволило встановити, що кутовий коефіцієнт нахилу апроксимуючої прямої (5) становить 0,52. Відповідно, отримане значення показника степеня є близьким до теоретичного *n*=2, за умови домінування механізму об'ємної дифузії, як лімітуючої стадії росту зерен у досліджуваній системі. Розрахована енергія активації процесу складає Q=451 кДж/моль, що добре узгоджується з типовими літературними даними для оксиду алюмінію.

На рис. 1 представлено результати порівняльного аналізу точності прогнозування з використанням метрик R^2 та MAE. Порівняння проведено для базової моделі Кобла з традиційними параметрами (*n*=3 та Q=395 кДж/моль) та розробленої моделі машинного навчання. На рис. 2 відображено аналогічні статистичні показники для уточненої класичної моделі, параметри якої (n=2 та Q=451 кДж/моль) були розраховані в межах даної роботи, у зіставленні з результатами інтелектуального аналізу даних.

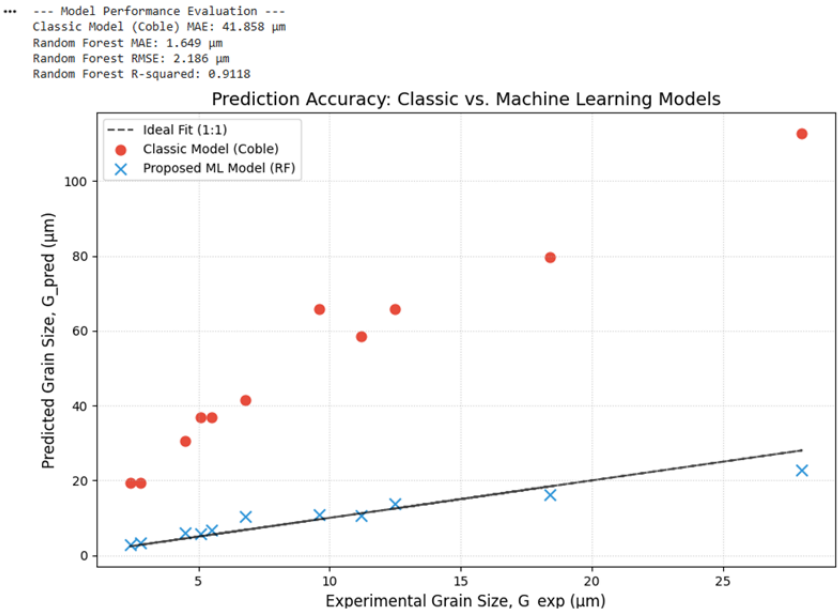


Рисунок 1 – Порівняння класичної моделі та машинного навчання

Джерело: розроблено авторами

Для верифікації отриманих результатів та визначення домінуючих факторів впливу проведено оцінку важливості ознак алгоритму Random Forest (рис. 3). Це дозволило кількісно оцінити роль температури, часу та домішок у процесах еволюції мікроструктури.

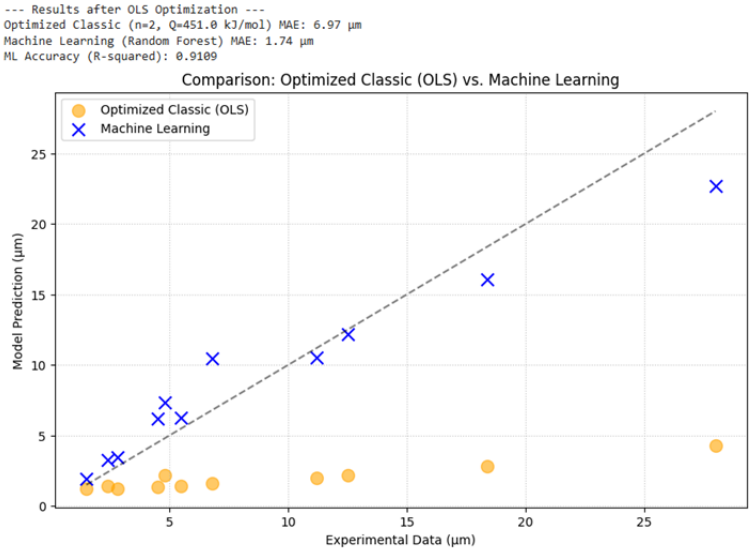


Рисунок 2 – Порівняння оптимізованої класичної моделі та машинного навчання
Джерело: розроблено авторами

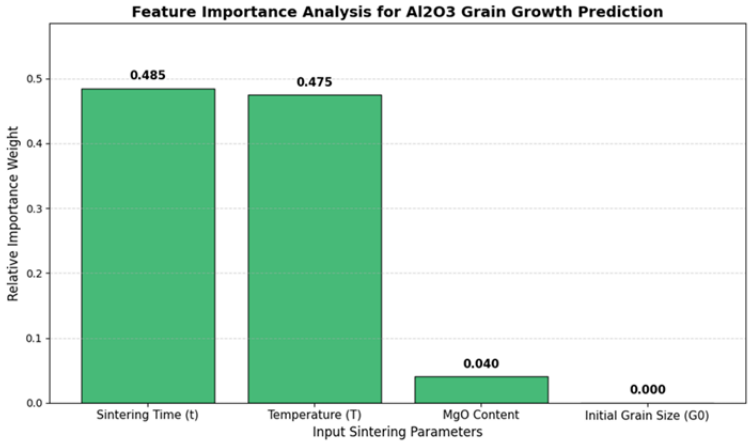


Рисунок 3 – Результати Random Forest Regressor
Джерело: розроблено авторами

Результати проведеного аналізу дозволяють сформулювати такі висновки:

– Апробація традиційної моделі Кобла із загальноприйнятими константами (n=3, Q=395 кДж/кг) виявила її неспроможність забезпечити адекватну точність прогнозу. Систематичне завищення розрахункових значень розміру зерна призвело до значної похибки (41,9 мкм), що свідчить про неможливість прямого перенесення табличних параметрів на досліджувану систему.

– Шляхом оптимізації моделі методом найменших квадратів було встановлено уточнені параметри (n=2, Q=451 кДж/кг). Це дозволило скоротити середню абсолютну похибку до 6,97 мкм (майже ушестеро), підтверджуючи, що запропоновані в роботі константи значно краще описують кінетику росту зерна в обраних умовах.

– Водночас навіть адаптована модель Кобла зберігає певну нелінійну неточність, схиляючись до заниження показників при збільшенні реального розміру зерен. Таке відхилення вказує на обмеженість жорсткої математичної структури класичних рівнянь, які не здатні повною мірою охопити багатофакторну динаміку процесу.

– Найвищу прецизійність продемонстрував алгоритм машинного навчання Random Forest. Прогнози цієї моделі характеризуються мінімальною дисперсією відносно лінії ідеальної відповідності, що доводить перевагу методів МН над аналітичними варіаціями у питаннях апроксимації складних експериментальних залежностей.

Висновки.

1. Доведено неспроможність детермінованої моделі Кобла у прогнозуванні реальних показників мікроструктури: зафіксована середня абсолютна похибка (MAE=41,9 мкм) фактично перевищує діапазон досліджуваних значень (1–30 мкм). Така значна невідповідність пояснюється негнучкістю класичних фізичних констант, які не враховують нелінійний характер кінетики у складних багатокомпонентних порошкових системах.

2. Встановлено, що застосування алгоритму Random Forest дозволяє радикально підвищити точність моделювання, знизивши похибку у 25 разів (MAE=1,65 мкм) при високому рівні апроксимації (R^2=0,91). Це підтверджує ефективність методів інтелектуального аналізу даних як інструменту нівелювання ідеалізованих припущень, властивих класичній фізиці кераміки.

3. Науково обґрунтовано можливість зниження енерговитрат на 10–15% за рахунок оптимізації режимів спікання. Завдяки високій прогностичній здатності моделі машинного навчання стає можливим замінити енергоємні пікові температури тривалою ізотермічною витримкою при нижчих показниках. Точне визначення точки насичення ущільнення дозволяє уникнути надлишкового перегріву, який зазвичай закладається в технологічний процес для компенсації розрахункових похибок.

5. Розроблений програмний алгоритм пропонується як основа для створення цифрових двійників у виробництві керамічних матеріалів. Впровадження цієї системи забезпечить прецизійний контроль розміру зерна кераміки та високу щільність матеріалу при суттєвому скороченні витрат на етапі розробки та оптимізації використання енергоресурсів.

Список літератури

1. Kingery W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R. Introduction to Ceramics. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1976. 1032 p.
2. Coble R. L. Sintering Crystalline Solids. II. Experimental Test of Diffusion Models in Powder Compacts. *Journal of Applied Physics*. 1961. Vol. 32, No. 5. P. 793–799.
3. Rahaman M. N. Ceramic Processing and Sintering. 2nd ed. New York : Marcel Dekker, 2003. 875 p.
4. Cold Sintering: Progress, Challenges, and Future Opportunities / J. Guo et al. *Annual Review of Materials Research*. 2019. Vol. 49. P. 275–295.
5. A general method for synthesizing and sintering bulk ceramics in seconds / C. Wang et al. *Science*. 2020. Vol. 368, No. 6490. P. 521–526.
6. Biesuz M., Sglavo V. M. Flash sintering of ceramics: Issues and opportunities. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2019. Vol. 16, No. 2. P. 462–472.
7. Yang Z., Li J. Machine learning and densification in sintering: A review. *Acta Materialia*. 2021. Vol. 217. Art. 114138.
8. Ashby M. F. A first report on sintering diagrams. *Acta Metallurgica*. 1974. Vol. 22, No. 3. P. 275–289.
9. German R. M. Sintering Theory and Practice. New York: Wiley, 1996. 568 p.
10. Rice R. W. Porosity of Ceramics. New York : Marcel Dekker, 1998. 560 p.
11. Schiller K. K. Strength of highly porous brittle materials. Nature. 1958. Vol. 181, No. 4616. P. 1147–1148.9.

12. Bennison S. J., Harmer M. P. Grain Growth Kinetics for Alumina in the Absence of a Liquid Phase. *Journal of the American Ceramic Society*. 1985. Vol. 68, No. 1. P. C-22–C-24.
13. Hillert M. On the theory of normal and abnormal grain growth. *Acta Metallurgica*. 1965. Vol. 13, No. 3. P. 227–238.
14. Brook R. J. Pore-grain boundary interactions and grain growth. *Journal of the American Ceramic Society*. 1969. Vol. 52, No. 1. P. 54–55.
15. Аулін В. В., Ковальов С. Г., Ковальов Ю. Г., Гріньків А. В. Оптимізація параметрів надійності та ефективності виробничих систем і автоматизованих ліній методами штучного інтелекту : монографія / за заг. ред. д.т.н., проф. В. В. Ауліна. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2026. 232 с.
16. Ковальов Ю. Г., Аулін В. В., Ковальов С. Г., Кузик О. В., Гриньків А. В. Штучний інтелект у матеріалознавчих дослідженнях: тенденції, інструменти та трансформації. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Вип. 12(43), ч. II. С. 134–142.
17. Ковальов Ю. Г., Аулін В. В., Ковальов С. Г., Кузик О. В., Гриньків А. В. Цифровізація матеріалознавства й напрями використання штучного інтелекту. *Вісник ХНАДУ*. 2025. Вип. 111. С. 67–74.

References

1. Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
2. Coble, R. L. (1961). Sintering crystalline solids. II. Experimental test of diffusion models in powder compacts. *Journal of Applied Physics*, 32(5), 793–799.
3. Rahaman, M. N. (2003). *Ceramic Processing and Sintering* (2nd ed.). Marcel Dekker.
4. Guo, J., Floyd, R., Lowum, S., Maria, J.-P., Herisson de Beauvoir, T., Seo, J.-H., & Randall, C. A. (2019). Cold sintering: Progress, challenges, and future opportunities. *Annual Review of Materials Research*, 49, 275–295.
5. Wang, C., Ping, W., Bai, Q., Cui, H., Hensley, R., Hitz, E., Han, X., Liu, Y., Li, T., Foster, P. R., Xu, J., Lin, L., Zhao, J., Xie, H., Fu, J., Baker, B. A., Mo, Y., Viswanathan, V., & Hu, L. (2020). A general method for synthesizing and sintering bulk ceramics in seconds. *Science*, 368(6490), 521–526.
6. Biesuz, M., & Sglavo, V. M. (2019). Flash sintering of ceramics: Issues and opportunities. International *Journal of Applied Ceramic Technology*, 16(2), 462–472.
7. Yang, Z., & Li, J. (2021). Machine learning and densification in sintering: A review. *Acta Materialia*, 217, Article 114138.
8. Ashby, M. F. (1974). A first report on sintering diagrams. *Acta Metallurgica*, 22(3), 275–289.
9. German, R. M. (1996). *Sintering Theory and Practice*. Wiley.
10. Rice, R. W. (1998). *Porosity of Ceramics*. Marcel Dekker.
11. Schiller, K. K. (1958). Strength of highly porous brittle materials. *Nature*, 181(4616), 1147–1148.
12. Bennison, S. J., & Harmer, M. P. (1985). Grain growth kinetics for alumina in the absence of a liquid phase. *Journal of the American Ceramic Society*, 68(1), C-22–C-24.
13. Hillert, M. (1965). On the theory of normal and abnormal grain growth. *Acta Metallurgica*, 13(3), 227–238.
14. Brook, R. J. (1969). Pore-grain boundary interactions and grain growth. *Journal of the American Ceramic Society*, 52(1), 54–55.
15. Aulin, V. V., Kovalov, S. H., Kovalov, Yu. H., & Hrinkiv, A. V. (2026). *Optimization of reliability and efficiency parameters of production systems and automated lines using artificial intelligence methods: Monograph* (V. V. Aulin, Ed.). Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian]
16. Kovalov, Yu. H., Aulin, V. V., Kovalov, S. H., Kuzyk, O. V., & Hrynkiv, A. V. (2025). Artificial intelligence in materials science research: trends, tools and transformations. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43), part II, 134–142. [in Ukrainian]
17. Kovalov, Yu. H., Aulin, V. V., Kovalov, S. H., Kuzyk, O. V., & Hrynkiv, A. V. (2025). Digitalization of materials science and directions of artificial intelligence use. *Bulletin of Kharkiv National Highway University*, (111), 67–74. [in Ukrainian]

Yurii Kovalov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Kovalov,** PhD ped. sci., **Illia Yevmenyev**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Machine Learning as a Tool for Refining Diffusion Sintering Models of Al_2O_3 Ceramics

The primary objective of this research is to evaluate the predictive accuracy of classical deterministic models versus machine learning algorithms in determining the final grain size of alumina ceramics. This study

aims to identify the specific limitations of the traditional Coble model within complex powder systems and establish high-precision alternatives for microstructural control. Furthermore, the research explores the potential for energy consumption optimization by refining the thermal and kinetic parameters of the sintering process through advanced data analysis.

This study conducts a comprehensive comparative analysis between the analytical Coble model and the Random Forest ensemble learning algorithm. The initial stage involved testing the classical model with standard literature constants (n=3, Q=395 kJ/mol), which revealed significant systematic errors and overestimations. Subsequently, the deterministic model was optimized using the least squares method, adjusting physical parameters to n=2 and Q=451 kJ/mol to better suit the experimental data. In parallel, a machine learning framework was developed and trained on experimental datasets, utilizing Mean Absolute Error (MAE) and R-squared (R^2) metrics for performance evaluation. A critical component of the work was the Feature Importance analysis, which quantified the relative impact of temperature, sintering time, and MgO dopant concentration on grain growth kinetics. The developed software tool was tested for its ability to simulate densification saturation points, providing a basis for digital twin integration in ceramic manufacturing. The methodology bridges the gap between theoretical material science and practical industrial applications.

The results demonstrate that the Random Forest model significantly outperforms deterministic approaches, reducing prediction error by 25 times (MAE=1.65 μm) with an R^2 of 0.91. Feature Importance analysis revealed that sintering time (weight 0.485) exerts a more substantial influence on final microstructure than temperature (0.475) or MgO additives (0.040) for the studied dataset. This kinetic dominance suggests that peak sintering temperatures can be replaced by extended isothermal holding, potentially lowering energy consumption by 10–15%. The proposed ML-based approach provides a robust foundation for the development of digital twins, ensuring precise microstructural control while minimizing R&D costs.

Industry 4.0, sintering, diffusion kinetics, machine learning, model

Одержано (Received) 30.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.513 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).194-204

С. І. Осадчий, проф., д-р техн. наук, **В. С. Мажаров,** канд. техн. наук, **Ю. Б. Ситник**, доц., канд. техн. наук, **М. І. Романович**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький,Україна
Українська державна льотна академія, м.Кропивницький, Україна
e-mail: srg2005@ukr.net, mazharovpp@gmail.com

Лінійна модель алгоритму зворотної кінематики платформи Стюарта

Мета статті полягає у підвищенні якості відтворення реальних рухів повітряного судна у лабораторних умовах з допомогою платформи Стюарта. Для її досягнення визначено ключове джерело обмеження точності, яким є недосконаліть систем керування рухом таких платформ. Для подолання цього недоліку поставлена задача створення необхідних умов для використання методології синтезу конкурентоспроможних комплексів керування рухами платформи Стюарта у просторі. Її розв'язок дозволив створити новий алгоритм лінеаризації процесу пошуку рішення зворотної задачі кінематики. Він заснований на використанні сучасної інформаційної технології ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів керування. У статті наведено приклад використання цього алгоритму та показано його високу ефективність.

платформа Стюарта, зворотна кінематика, ідентифікація, коваріація, спектральна щільність, матриця, збурення, вектор

Постановка проблеми. Платформа Стюарта [1] була створена у 1965 як засіб з шістьма ступенями свободи необхідний для відтворення просторових рухів повітряного судна в лабораторних умовах. Вона дозволила створити широке коло комплексів імітації натурних умов польоту, які дозволяють розв'язувати такі складні завдання як:

- динамічна атестація сенсорів авіоніки;
- налаштування та випробування автопілотів та бортових систем керування;
- дослідження психофізіологічних властивостей людини;
- налаштування систем стабілізації прицілу та стрілецького обладнання;
- тренажерна підготовка пілотів.

В той же час, не дивлячись на багаторічну історію вдосконалення комплексів моделювання на базі платформи Стюарта, точність відтворення реальних стохастичних рухів повітряного судна в лабораторних умовах залишається обмеженою. Зазначене обмеження часто є причиною не тільки збільшення часу, трудомісткості та вартості розробки бортового обладнання, але й погіршення якості тренажерної підготовки пілотів.Ключовим джерелом цих обмежень є недосконаліть системи керування рухом платформи, яка імітує поведінку об'єкта моделювання. Якість зазначеної системи визначається тим на скільки рухи платформи є близькими до відповідних рухів об'єкта моделювання[3]. Як доведено, наприклад в джерелах [4-6], досягти найкращого наближення можливо лише у оптимальних системах керування рухами багатовимірного об'єкта керування (платформи Стюарта). Однак, використання методів синтезу оптимальних систем керування для створення комплексу імітації натурних умов польоту з допомогою платформи Стюарта ускладнене дією двох

© С. І. Осадчий, В. С. Мажаров, Ю. Б. Ситник, М. І. Романович, 2026

факторів. По-перше, це випадковий характер багатовимірних рухів платформи при відтворенні умов польоту [7]. По-друге, наявність суттєвих нелінійностей, що діють на входах та виходах платформи завдяки необхідності розв’язання задач зворотної та прямої кінематики [8,9]. Отже, створення оптимальної системи імітації натурних умов польоту є науково-прикладною проблемою, оскільки досі відсутні загальні методи синтезу багатовимірних нелінійних оптимальних стохастичних систем керування.

Цей матеріал присвячено пошуку шляху подолання дії визначених вище факторів та створення необхідних умов для використання методології синтезу конкурентоспроможних комплексів керування [3] рухами платформи Стюарта у просторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.. Розгляд конструкції та кінематичної схеми платформи Стюарта (рис. 1) показує, що зворотна задача кінематики для цього механізму [8-10] полягає у визначенні вектору L довжин тяг lk (k=1,…,6) за вектором заданого положення платформи pO відносно основи bO у Декартовому просторі.

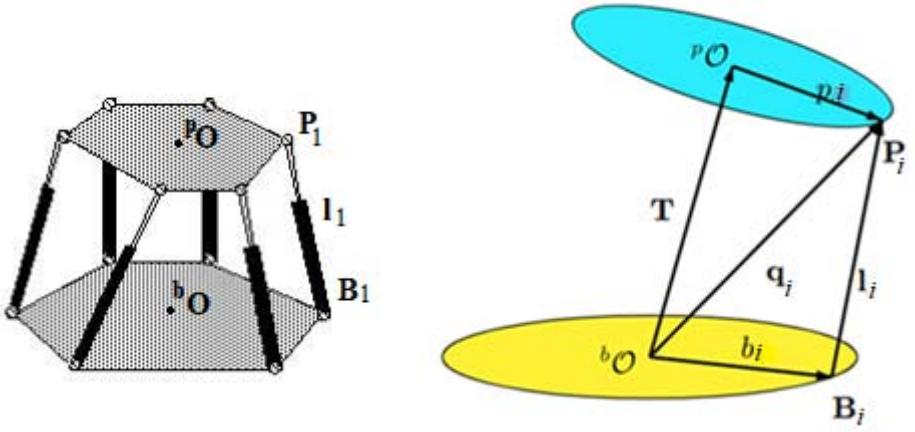


Рисунок 1 – Конструкція макету та кінематична схема платформи Стюарта
Джерело: розроблено на підставі [10, 11]

При використанні аналітичного методу вектор L формується в результаті виконання нелінійних перетворень вихідних даних про бажане положення платформи, представлених у вигляді вектору r

$$r = \begin{bmatrix} x & y & z & \vartheta & \gamma & \psi \end{bmatrix}^{/}, \quad (1)$$

де x, y, z – бажані координати кінця вектору T (рис.1); ϑ , γ, ψ – бажані значення кутів Ейлера-Крилова платформи, що представлена синім кольором на рис. 1; індекс «/» – знак транспонування.

Числові методи засновані на припасовуванні довжин тяг до вектору r та складаються з двох різновидів: обертання Якобіана[8,9] та евристичних перетворень [12,14]. Перший різновид заснований на моделюванні рівняння прямої кінематики за допомогою розкладу в ряд Тейлора та подальшого обертання результату. Головна вада цієї групи методів пов’язана з накопиченням похибок лінеаризації та застосуванням операції псевдо обертання матриці [15]. Методи евристичних перетворень є більш гнучкими оскільки замість обертання рівнянь прямої кінематики спираються на ітераційну оптимізацію різниці між поточним положенням платформи та бажаним для пошуку наближеного розв'язку.

Інтелектуальні методи [13] засновані на використанні нейро-нечітких методів пошуку рішення зворотної задачі кінематики. Як правило, для навчання нейронної

мережі ці методи використовують множину розв'язків прямої задачі кінематики. Це дає можливість запобігти виникненню неприємностей числових методів, оскільки замінює операцію обертання на здійснення навчання мережі.

Наведена характеристика методів розв'язання зворотної задачі кінематики вказує на те, що найвищою потенційною точністю володіють рішення отримані аналітичним методом, оскільки вони дозволяють знайти результат безпосередньо без використання опосередкованих обчислень.

Таким чином, платформу Стюарта як об'єкт керування можна представити у вигляді послідовного з'єднання як мінімум двох багатовимірних елементів (рис. 2). Перший елемент ОК є багатовимірним та нелінійним, що здійснює розв'язання оберненої задачі кінематики. На його вході діє вектор (1) координат бажаного положення платформи r. На виході блоку діє вектор довжин тяг L, спотворений похибками розв'язання вказаної вище задачі, що поєднані у вектор φ.

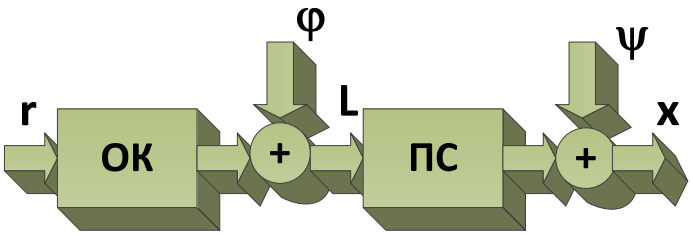


Рисунок 2 – Структура платформи Стюарта

Джерело: розроблено авторами

ОК існує віртуально у вигляді певного алгоритму реалізації обраного методу розв'язання зворотної задачі кінематики. Другий елемент ПС (рис.2) являє собою фізичний об'єкт, з відомою конструкцією (наприклад, рис.1). На входах приводів його тяг діють компоненти вектору L . Під дією цих сигналів відбувається зміна положення платформи ${}^{p}O$. Рух платформи супроводжується дією сил та моментів опору, які утворюють вектор збурень ψ. Виходом другого елементу є вектор x координат фактичного положення платформи Стюарта у Декартовому просторі. У ідеальному випадку виконується рівняння

$$x = r\,. \tag{2}$$

У реальній ситуації вплив векторів φ, ψ та динаміки блоків ОК та ПС порушує рівняння (2), та обґрунтовує необхідність синтезу багатовимірної системи керування [8, 16]. Ця система повинна забезпечити найбільш точне виконання рівняння (2).

Досягти цієї мети можливо лише у оптимальній системі, проектування якої може бути здійснене в результаті застосування однієї з технологій, представлених у монографії [10].

Необхідною умовою застосування технологій з джерела [10] є опис динаміки багатовимірного об'єкта керування у вигляді системи лінеаризованих диференціальних рівнянь. Якщо різноманітні варіанти таких рівнянь динаміки збуреного руху ПС, як одного з елементів об'єкта керування відомі [1, 8, 16], то отримання лінеаризованої моделі динаміки ОК (рис. 2) вимагає постановки та розв'язання відповідної науково-технічної задачі.

Постановка завдання. Для досягнення мети дослідження пропонується сформулювати наступне завдання. Будемо вважати, що розв'язання задачі зворотної кінематики платформи Стюарта виконується підсистемою inv_cn (рис. 3), представленою вперше у статті [10].

Ця підсистема реалізована у середовищі Simulink пакета Matlab на платформі 64 розрядного комп'ютеру та використовує аналітичний метод розв'язання задачі

зворотної кінематики. Входом підсистеми (In 1) є вектор бажаного положення платформи *r*, а виходом (Out 1) вектор довжин тяг *L*

$$L = \begin{bmatrix} |l_1| & |l_2| & |l_3| & |l_4| & |l_5| & |l_6| \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $|l_i|$ - довжина тяги з номером *i* (рис. 1). Вона визначається з нелінійного рівняння

$$|l_i| = \left| T + R \times p_i \times \overline{R} - b_i \right|, \quad (4)$$

де *T*, p_i, b_i – вектори, представлені на рис. 1, *R* – кватерніон повороту платформи відносно основи, × - знак векторного добутку. Визначення довжин тяг здійснюється блоками підсистеми. Блок Rotation Angles to Quaternions бібліотеки Aerospace Blockset/Utilities/Axes Transformations призначений для формування кватерніону *R* . Блок Atomic Subsystem призначено для приведення вектору p_i до системи координат зв'язаної з основою та початком у точці ${}^bO$ (рис.1). Блок Atomic Subsystem 1 призначено для формування матриці з векторів b_i, що визначають координати точок B_i (рис. 1) відносно системи координат, зв'язаної з основою платформи Стюарта. Блок Constant формує матрицю з векторів *T*, які визначають положення полюсу ${}^pO$ платформи (рис. 1) відносно бази ${}^bO$.

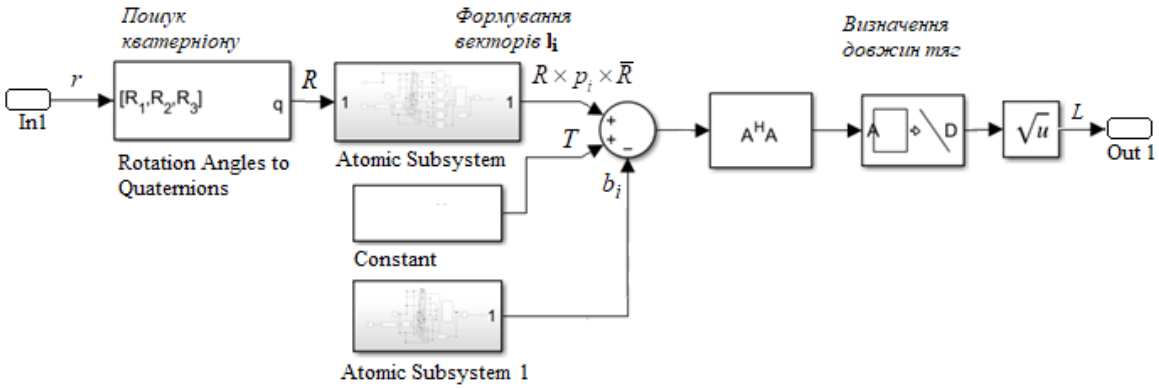


Рисунок 3 - Підсистема розв'язання зворотного завдання кінематики
Джерело: розроблено авторами

У статті [19] представлено оригінальний метод активної ідентифікації лінеразованої моделі динаміки блоків із стандартними типами нелінійностей [19] та скалярними входом та виходом. Цей метод заснований на моделюванні роботи блоку з нелінійностями в конкретних умовах шляхом подачі на його входи центрованих стаціонарних випадкових процесів із необхідними характеристиками та спостереженням за його реакціями. Використання ідеї цього методу дозволяє замінити нелінійну підсистему inv_cn (рис. 3) лінеаризованою моделлю (рис. 4). Як видно з рис. 4, лінеаризована модель відрізняється наявністю трьох входів та одного виходу. На її першому вході діє вектор бажаного положення платформи *r,* на другому – вектор некорельованих білих шумів одиничної інтенсивності, які породжують незалежні від *r* випадкові зміни довжини тяг ψ, на третьому вході може виникати додаткова детермінована складова зміни довжини тяг платформи Σ. Динаміку перетворення цих векторів у вектор довжин тяг *L* характеризують матриці передавальних функцій W_r та W_ψ .

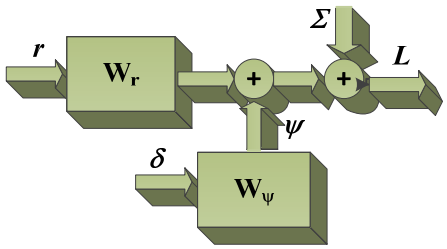


Рисунок 4 – Структурна схема лінійної моделі підсистеми inv_cn
Джерело: розроблено авторами

Таким чином, завдання дослідження полягає у тому, щоб за результатами спостереження змін векторів r та L знайти матриці передавальних функцій W_r та W_ψ, а також вектор-функцію часу Σ, які забезпечують мінімальну похибку відтворення вектору L.

Виклад основного матеріалу. Для розв'язання цього завдання необхідно виконати низку взаємопов'язаних дій:

– в результаті вивчення конструкції конкретного гексаподу, наприклад рис.5, знайти вектори T, p_i, b_i i=1,…,6 (рис. 3);

– на основі відомостей із статей [9, 10] та алгоритму (4) розробити модель системи розв'язання задачі зворотної кінематики, у якій передбачити можливість синхронного запису векторів r та L;

– здійснити моделювання роботи підсистеми inv_cn при вузько смуговому та широко смуговому стаціонарному випадковому характері зміни компонентів вектору r різної інтенсивності;

– одним з відомих методів виділити детермінований тренд з компонентів вектору L та сформувати вектор апроксимацій виділених трендів Σ;

– знайти випадкову складову вектору L

$$L_v = L - \Sigma;$$

– з допомогою пакету Identification Tool Box або функції idss системи Matlab оцінити модель динаміки лінеризованої системи розв'язання задачі зворотної кінематики у просторі станів

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Br + K\delta \\ L_v &= Cx + Dr + \delta \end{aligned}; \tag{5}$$

– на основі ідентифікованої лінійної моделі блоку inv_cn (5) знайти матриці передавальних функцій W_r та W_ψ

$$W_r = C\left(E_n s - A\right)^{-1} B + D, \quad W_\psi = C\left(E_n s - A\right)^{-1} K + E_m, \tag{6}$$

де E_n – одинична матриця розміру $n \times n$; s – комплексна змінна $s=j\omega$;

– визначити характеристики похибки відтворення вектору L на виході лінеаризованої моделі.

Припустимо, що в результаті вивчення конструкції макету платформи Стюарта (рис. 5) були визначені вектори p_i, b_i i=1,…,6 та складені таблиці табл. 1 та табл.2. Вектор T визначає положення полюсу ${}^{p}O$ платформи (рис. 1) відносно бази ${}^{b}O$ та дорівнює

$$T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 110 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}, м. \tag{7}$$

Необхідно створити модель підсистеми розв'язання зворотної задачі кінематики та визначити матриці передавальних функцій W_r та W_ψ, які характеризують лінеаризовану модель цієї підсистеми у разі подавання на її входи білого шуму різної інтенсивності.

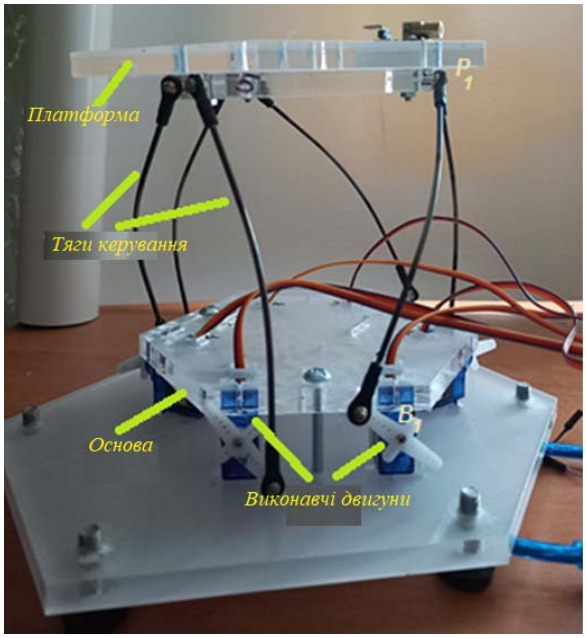


Рисунок 5 – Макет платформи Стюарта [10]

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Координати опорних точок b_i

№	$x\times10^{-3}$, м	$y\times10^{-3}$, м	$z\times10^{-3}$, м
1	23,1	63,4	0
2	-23,1	63,4	0
3	-66,5	-11,7	0
4	-43,4	-51,7	0
5	43,4	-51,7	0
6	66,5	-11,7	0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Координати опорних точок p_i

№	$x\times10^{-3}$, м	$y\times10^{-3}$, м	$z\times10^{-3}$, м
1	50,4	35,3	0
2	-50,4	35,3	0
3	-55,7	26	0
4	-5,4	-61,3	0
5	5,4	-61,3	0
6	55,7	26	0

Джерело: розроблено авторами

У відповідності з представленим методом на основі вихідних даних табл. 1, табл. 2 та рівняння (6), розроблена Simulink модель (рис. 6), яка складається з наступних елементів: генератори білого шуму, що задають зміну кутів крену, рискання та курсу платформи, формувач вектору r, підсистема inv_cn, осцилограф.

Моделювання проведене для декількох варіантів зміни інтенсивності білого шуму (табл. 3). Результати моделювання зберігаються у об'єктах Simulink.SimulationOutput [18] з ідентифікаторами out1, out2, out3, out4. Приклад результатів моделювання для першого варіанту представлено на рис. 7 та рис. 8.

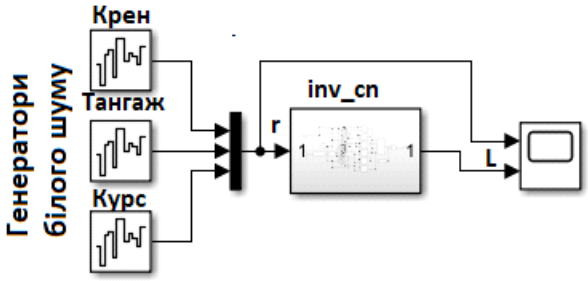


Рисунок 6 – Simulink модель процесу зворотної кінематики
Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Дані для моделювання

Вариант №	Інтенсивність шуму	Крок дискретизації, с	Комбінація	Ідентифікатор результату
1	0.1	0.1	23341	out1
2	0.5	0.1	23341	out2
3	1	0.1	23341	out3
4	0.05	0.1	23341	out4

Джерело: розроблено авторами

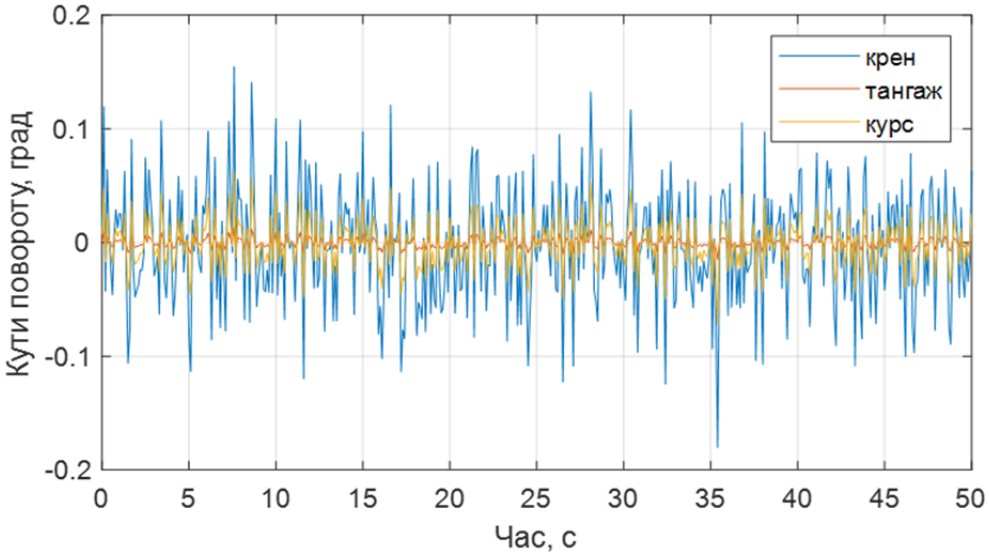


Рисунок 7 – Реалізації компонентів вектору бажаного положення платформи
Джерело: розроблено авторами

Розгляд реалізацій, отриманих в результаті моделювання, показав відсутність регулярних трендів на виходах блоку inv_cn, отже вектор апроксимацій виділених трендів Σ є нульовим, а випадкова складова вектору L дорівнює цьому вектору.

Визначення моделі динаміки лінеризованої системи розв'язання задачі зворотної кінематики у просторі станів здійснене з допомогою інструменту Identification Tool Box системи Matlab [19].

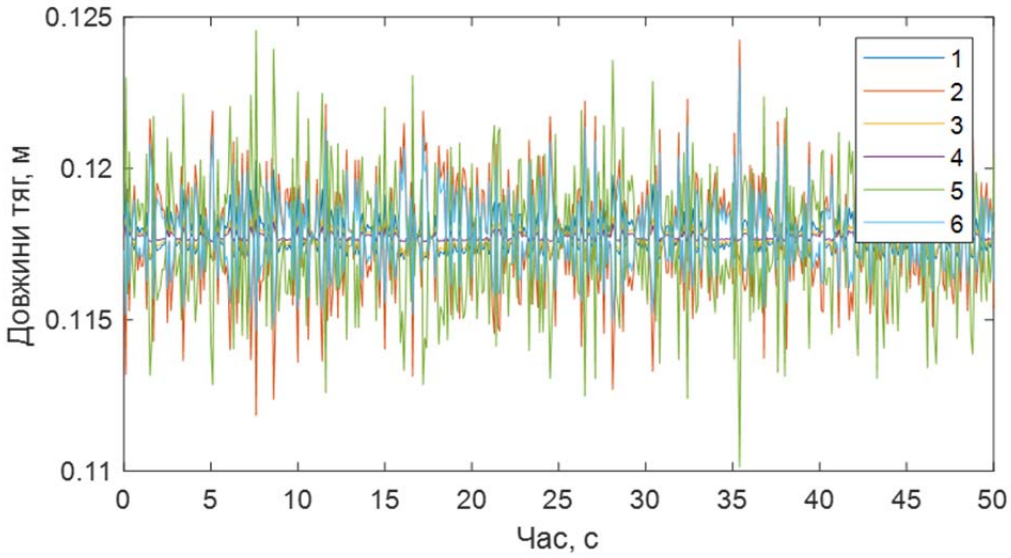


Рисунок 8 – Реалізації компонентів вектору довжин тяг

Джерело: розроблено авторами

Аналіз моделей отриманих для усіх варіантів з табл. 3 показав, що матриці A, B, C та K є нульовими, матриця D є числовою та для варіанту 1 має вигляд

$$D = \begin{bmatrix} -0.012 & 1.28 & 0.064 \\ 0.024 & -2.52 & -0.13 \\ -0.013 & 1.39 & 0.069 \\ 0.0079 & -0.84 & -0.042 \\ -0.027 & 2.906 & 0.15 \\ 0.021 & -2.26 & -0.11 \end{bmatrix}, \text{ м/град.} \quad (8)$$

Матриця коваріацій вектору випадкової зміни довжини тяг ψ для варіанту 1 дорівнює

$$Q_\psi = 1 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} 0.6 & 0.06 & 0.08 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \\ 0.06 & 0.01 & 0.009 & 0.04 & 0.03 & 0.07 \\ 0.08 & 0.009 & 0.01 & 0.05 & 0.04 & 0.08 \\ 0.3 & 0.04 & 0.05 & 0.18 & 0.16 & 0.3 \\ 0.3 & 0.03 & 0.04 & 0.16 & 0.16 & 0.3 \\ 0.5 & 0.07 & 0.08 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}, \text{ м}^2. \quad (9)$$

Середньоквадратичне відхилення похибки ідентифікації не перевищує 2 мікрометра, що свідчить про достатньо високу точність лінеаризації методом ідентифікації. Для ілюстрації на рис. 9 наведено графік зміни довжини тяги 1 на виході блоку inv_cn та на виході лінеаризованої моделі для варіанту 1. Це найгірший графік співпадінь.

Застосування алгоритмів (6) до результатів ідентифікації за усіма варіантами табл. 3 дозволила визначити, що

$$W_r = D,\ W_\psi = E_6,\ S_\psi = \frac{1}{\pi} Q_\psi, \quad (10)$$

де S_ψ – матриця спектральних щільностей вектору випадкової зміни довжини тяг незалежно від вектору r.

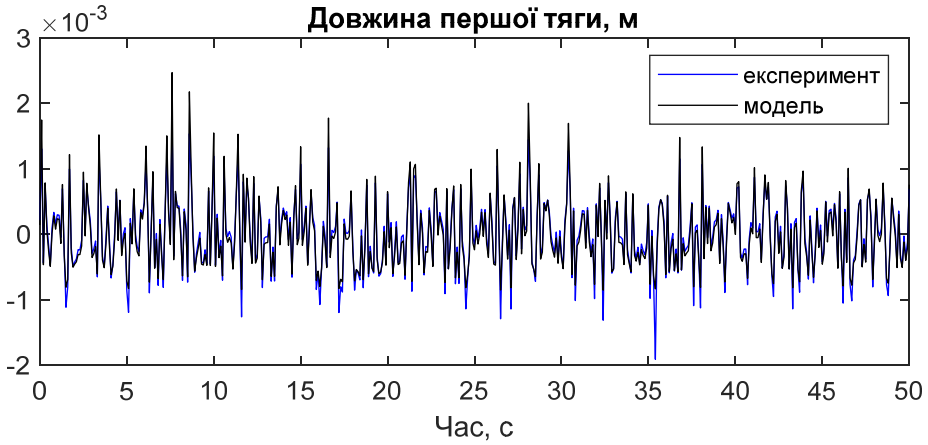


Рисунок 9 – Графіки сміни довжини тяги 1

Джерело: розроблено авторами

Порівняльний аналіз отриманих результатів за варіантами вказує на те, що результати лінеаризації процесу розв'язання зворотної задачі кінематики при широкосмуговому центрованому випадковому вхідному сигналі суттєво залежать від його інтенсивності.

Висновки. Результати дослідження можливості застосування методів лінеаризації для отримання лінійної моделі нелінійного процесу розв'язання завдання зворотної кінематики показують, що

– лінеаризацію доцільно та можливо проводити шляхом застосування технології ідентифікацій моделі динаміки багатовимірного об'єкта у просторі станів;

– вихідні дані для ідентифікації повинні бути отримані з обчислювального або натурного експерименту;

– динаміка вектору бажаного положення платформи r повинна відповідати завданню, яке необхідно розв'язувати з допомогою платформи Стюарта;

– віртуальна або фізична модель процесу розв'язання зворотної задачі кінематики повинна відповідати конструкції платформи Стюарта та характеристикам мікроконтролера керування положенням платформи;

– подальші дослідження доцільно спрямувати на лінеаризацію процесу зворотної кінематики платформи Стюарта при вузькосмуговому випадковому векторі її бажаного положення.

Список літератури

1. Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*. Vol. 180, Part 1, No. 5, pp. 371-386, 1965.
2. Aircraft stochastic multi dimensional motion simulation platform positioning control law synthesis / S.Osadchyi et al. *2025 8th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering:* Proceedings of the 8th International Conference RCAE 2025, October 24-26, 2025, Xi'an, China. Pp. 686 -691.
3. Томашевський В.М. Моделювання систем. К.: Видавнича група BHV, 2005. 352 с.
4. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів: монографія / Л.М. Блохін та ін.; за ред. С.І. Осадчого. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.
5. Методи сучасної теорії управління /А.П. Ладанюк та ін. К.: Видавництво Ліра-К, 2018. 368с.
6. Okko H. Bosgra, Huibert Kwakernaak, Gjerrit Meinsma Design Methods for Control Systems. Notes for a course of the Dutch Institute of Systems and Control Winter term 2005–2006. p. 325
7. Bernard Etkin, Lloyd Duff Reid Dynamics of Flight. Stability and Control. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996. p. 395

8. Lisa Björklund, Erik Gelfgren Imitation of Ocean Wave Movement using a Stewart Platform. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2024. p. 78
9. Creating-a-stewart-platform-model-using- simmechanics: веб-сайт. URL: https://www.mathworks.com/company/technical-articles (дата звернення: 28.01.2026)
10. Комп'ютерно -інтегрована система імітації рухів носія авіоніки у лабораторних умовах / С.І.Осадчий та ін. *Науковий журнал Прикладні птання математичного моделювання.* Том 7. № 2. 2024. С.125-140
11. Nikolaus Correll, Bradley Hayes, Christoffer Heckman and Alessandro Roncone. Introduction to Autonomous Robots: Mechanisms, Sensors, Actuators, and Algorithms, MIT Press, 2022 (forthcoming).
12. Andreas Aristidou, Joan Lasenby, FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem, Graphical Models, Volume 73, Issue 5, 2011, P. 243-260
13. Alavandar S., Nigam M.J. Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2008. № 3. P. 224-234.
14. D. G. Luenberger. Linear and Nonlinear Programming. Addison Wesley.
15. Zhang, F. (2011). Matrix Theory: Basic Results and Techniques. (2nd ed.) Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1099-7
16. Ozer Ulucay. Design and Control of Stewart Platform. EECS, MS Thesis, Sabanci University, 2006.-131 p.
17. Martin Enqvist Linear Models of Nonlinear Systems. Linköping: LiU-Tryck, , Sweden 2005. 190 p.
18. Simulink.SimulationOutputhttps://www.mathworks.com/help/simulink/slref/simulink.simulationoutput.html
19. System Identification Toolbox Documentationhttps://www.mathworks.com/help/ident/index.html

References

1. Stewart, D.A. (1965). Platform with Six Degrees of Freedom. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*, Vol. 180, Part 1, No. 5, 371-386.
2. Osadchyi, S., Zozulya, V., Kalich V., Sieliukov, A. & Ponomarenko, S. (2025). Aircraft stochastic multi dimensional motion simulation platform positioning control law synthesis.*: Proceedings of the 8th International Conference RCAE 2025, October 24-26, 2025, Xi'an, Chin*a. 686 -691.
3. Tomashevskyi, V.M. (2005). System Modeling . K.: Vydavnycha hrupa BHV [in Ukrainian].
4. Blokhin, L.M., Osadchyi, S.I., Didyk, O.K., Vikhrova, L.H. & Kalich, V.M. (2023). *Technology of designing modern competitive stochastic motion control complexes lens*. Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F [in Ukrainian].
5. Ladaniuk, A.P., Kyshenko, V.D., Lutska, N.M. & Ivashchuk, V.V. (2018). *Methods of modern control theory*. K.: Vydavnytstvo Lira-K [in Ukrainian].
6. Okko H. Bosgra, Huibert Kwakernaak, Gjerrit Meinsma (2005). Design Methods for Control Systems. *Notes for a course of the Dutch Institute of Systems and Control* Winte term.
7. Bernard Etkin, Lloyd Duff Reid (1996). *Dynamics of Flight. Stability and Control*. – New York: John Wiley & Sons, Inc.
8. Björklund Lisa, GelfgrErik en (2024). *Imitation of Ocean Wave Movement using a Stewart Platform*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
9. https://www.mathworks.com/company/technical-articles/creating-a-stewart-platform-model-using-simmechanics.html
10. Osadchyi, S.I., Havryliuk, B.A., Tymoshenko, H.S., & Zozulia, V.A. (2024). Computer-integrated system for simulating the movements of an avionics carrier in laboratory conditions*. Naukovyi zhurnal Prykladni ptannia matematychnoho modeliuvannia* tom 7, № 2. [in Ukrainian].
11. Nikolaus Correll, Bradley Hayes, Christoffer Heckman & Alessandro Roncone (2022). *Introduction to Autonomous Robots: Mechanisms, Sensors, Actuators, and Algorithms*. MIT Press.
12. Andreas Aristidou & Joan Lasenby. (2011). FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem*, Graphical Models*, Volume 73, Issue 5.
13. Alavandar, S., & Nigam, M.J. (2008). Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators. *International Journal of Computers Communications & Control*. № 3.
14. D. G. Luenberger. *Linear and Nonlinear Programming*. Addison Wesley.
15. Zhang, F. (2011*). Matrix Theory: Basic Results and Techniques*. (2nd ed.) Springer.
16. Ozer Ulucay. (2006). *Design and Control of Stewart Platform*. EECS, MS Thesis, Sabanci University.
17. Martin Enqvist (2005). *Linear Models of Nonlinear Systems*. Linköping: LiU-Tryck, , Sweden.

18. Simulink.SimulationOutput. URL: https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/simulink.simulationoutput.html
19. System Identification Toolbox Documentation. URLl: https://www.mathworks.com/help/ident/index.html

Serhii Osadchyi, Prof., DSc.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
Volodymyr Mazharov, PhD tech. sci., **Yurii Sytnyk,** Assoc. Prof . PhD tech. sci., **Mykola Romanovych**
Ukrainian State Flight Academy Kropyvnytskyi, Ukraine

A Stewart Platform Inverse Kinematics Algorithm Linear Model

The aim of the study is to improve the quality of reproducing real aircraft movements in laboratory conditions using the Stewart platform. To achieve this, a key source of accuracy limitation is identified. This is an imperfection in the movement control systems of such platforms. There are two main reasons for such situation. The first one is the random nature of the platform multidimensional motions during reproducing flight conditions. The second one is connected with the presence of significant nonlinearities acting on the inputs and outputs of the platform due to the need to solve inverse and forward kinematics problems.

The article analyzes the methods for solving the Stewart platform kinematics inverse problem and shows that they all involve performing a number of nonlinear transformations. As a result of comparing the linearization methods and the experience of replacing a nonlinear element with a family of linear ones, active identification was chosen as the method for determining the specified family. A linearized model's structural diagram of the inverse kinematics problem solving process was developed. An algorithm for searching for transfer function matrices of this structural diagram was justified. The implementation of a new identification algorithm using the functions of the Matlab environment was presented. The influence of the intensity of a multidimensional broadband stationary random process on the parameters and structure of the linearized model was studied. The quality of linearization was assessed based on the determination of the mean square deviation of the signals at the outputs of the inverse kinematics unit and its linear model.

The results of the study show that linearization is expedient and possible to carry out by applying the technology of multidimensional object the dynamics model identification in the state space; the initial data for identification should be obtained from a computational or full-scale experiment; the dynamics of the platform desired position vector *r* should correspond to the problem that needs to be solved using the Stewart platform; the virtual or physical model of the process of solving the inverse kinematics problem should correspond to the design of the Stewart platform and the characteristics of the microcontroller controlling the position of the platform; further research should be directed to the linearization of the process of inverse kinematics of the Stewart platform with a narrow-band random vector of its desired position.

Stewart platform, inverse kinematics, identification, covariance, spectral density, matrix, perturbation, vector

Одержано (Received) 31.01.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 11.02.2026*
Прийнято до друку (Approved) 02.03.2026

УДК 681.391 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).205-212

[1]**Д.В. Трушаков,** доц., канд. техн. наук, [2]**О.П. Гоголюк**, проф., д-р техн. наук,
[3]**С.Й. Рендзіняк**, проф., д-р техн. наук, [1]**О. А. Козловський**, доц., канд. техн. наук
[1]*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*
[2]*Національний університет «Львівська політехніка». Львів, Україна*
[3]*Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, Україна*
[1]*e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com,* [3]*e-mail: serhii.y.rendziniak@edu.lpnu.ua*

Створення спрощеної системи кодування інформації

Статтю присвячено створенню спрощеної системи кодування інформації, що поєднує різні методики захисту інформації. Визначено головні особливості створення спрощенної методики кодування інформації. проблеми передачі інформації та принципи формування. Запропоновано та обгрунтовано методику спрощеного кодування інформації. В основу цієї методики покладено принцип транслітерації українського алфавіту латиницею та двійкова система числення. Для передачі повідомлень використовується латиниця, (латинський алфавіт має 26 букв) а не кирилиця (український алфавіт має 32 букви). Також, при кодуванні слід звернуть увагу, що крім букв алфавіту необхідно ще мінімум 3 символи – пробіли між словами, кома і крапка. Враховуючи, що буква W для транслітерації не використовується, таким чином для передачі простого повідомлення потрібно порядку 28 кодових символів. Для створення коду для кодування букв, коми, крапки та пробілу між словами необхідно використати двійкові числа, що містять п’ять розрядів. Наведена схема структурна для спрощеної системи кодування та передавання інформації. Наведено блок схему алгорітму для спрощеної системи. Розроблена спрощена система кодування інформації дає змогу пришвидшити процесс передавання інформації у закодованому вигляді, що є особливо актуальним під час військових дій.
кодування, інформація, захист інформації, спрощена система кодування інформації

Постановка проблеми. Необхідність у швидкому кодуванні інформаційних повідомлень виникає з метою скорочення обсягу інформації (стискання даних) та підвищення швидкості передачі інформаційних повідомлень чи засекречування інформації.

Також необхідність кодування інформації може виникати з метою засекречування інформації або для стискання даних, що дозволяє пришвидшити процес передачі інформаційних повідомлень.

Особливо актуально використовувати кодування інформації військовим у польових умовах при передаванні інформаційних повідомлень, щоб потім цю отриману інформацію можна було би оперативно розкодувати та використати.

Інформацію, яка призначену для передавання від одного об’єкта до іншого називають повідомленням. Повідомлення передають за допомогою електричних інформаційних сигналів.

Повідомлення і сигнали, які їм відповідають бувають 2 видів: неперервні (сигнали у вигляді синусоїди) та дискретні (сигнали у вигляді прямокутних імпульсів). Завдяки тому, що дискретну інформацію записують за допомогою двох цифр 0 і 1 цю інформацію можна легко кодувати.

В сучасних умовах, під час бойових дій, коли росія веде війну проти України, дуже актуальним постає питання створення простої та зручної методики кодування інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час проблемам кодування та захисту інформації було присвячено багато наукових робіт та публікацій. Так у роботі [1] приведено опис Методів та засобів стеганографічного захисту інформації на основі вейвлет-перетворень. У роботі [2] наведено створення повної

© Д. В. Трушаков, О. П. Гоголюк, С. Й. Рендзіняк, М. О. Федотова, 2026

моделі інформаційного захисту, яку можна використовувати для захисту інформації в автоматизованих системах. Ця модель показує весь цикл щодо прийняття рішень та, в кінцевому випадку, реагування на існуючи загрози та виконання цілісності даних. У роботі [3] описується обробка зображень та захист інформації. У роботі [4] описується принцип кодування інформації в інфокомунікаціях та принципи формування захищеного каналу передачі інформації. У роботі [5] описується прогнозування коефіцієнта стиснення даних з втратами шумових зображень.

Постановка завдання. В даній роботі дослідження спрямовані на розробку спрощеної системи кодування інформації. При цьому необхідно використати найменшу кількість кодових символів для найшвидшої передачі повідомлень.

Мета дослідження. Основною метою роботи є створеня простого та зручного способу кодування інформації, для подальшого її передавання у вигляді цифрових інформаційних повідомлень. Цей спосіб повинен базуватися на класичному методі передачі дискретної інформації. При цьому необхідно передбачити найменшу кількість кодових комбінацій, що дадуть можливість зробити найшвидшу передачу інформаційних повідомлень і тим самим дадуть змогу вчасно отримати потрібну інформацію отримувачу, наприклад військовим.

Завдання дослідження. Створити спрощену систему кодування, що поєднує різні методики кодування інформації. Для цього необхідно виконати наступні дії:

1. Визначити головні особливості створення спрощенної методики кодування інформації.
2. Створити алгорітм роботи спрощеної методики кодування.
3. Представити узагальнену структурну схему спрощеної системи кодування інформації.
4. Навести приклад найпростішої апаратної частини, яку швидко власноруч можно зібрати "у польових умовах" для виводу інформаційних повідомлень на дісплей.

Виклад основного матеріалу. Необхідність кодування інформації може виникати з метою засекречування інформації або з метою скорочення обсягу інформації (стискання даних) та підвищення швидкості передачі інформаційних повідомлень. Особливо актуально використовувати швидке кодування інформації військовим у польових умовах при передаванні інформаційних повідомлень, щоб потім цю отриману інформацію можна було би оперативно розкодувати та використати.

Цю інформацію потрібно передавати не “відкритим текстом” а у закодованому вигляді. Інформацію, що призначена для передавання від одного об’єкта до іншого називають повідомленням. Повідомлення передають за допомогою електричних інформаційних сигналів.

Повідомлення і сигнали, які їм відповідають, бувають 2 видів: неперервні (сигнали у вигляді синусоїди) та дискретні (сигнали у вигляді прямокутних імпульсів). Таким чином, інформацію, записану у дискретному вигляді за допомогою двох цифр 0 і 1 легко кодувати та передавати на відстань.

Зараз існує багато різноманітних методів кодування, в основі яких використані різні методики кодування. Всі ці методи кодування потребують певних знань та вмінь.

Для кодування найчастіше використовують код Шеннона-Фано, та кодують за допомогою методики Хаффмена [6].

Кодування за допомогою Шеннона-Фано полягає у наступному:

- інформаційні повідомлення представляють за зменшенням їхніх ймовірностей у вигляді стовпчика;
- потім отриманий стовпчик розділяють на дві частини з наближено сумарно рівними ймовірностями, при цьому в перший розряд з верхньої частини ставиться одиниця, а з нижньої частини нуль ставиться в перший розряд;
- далі отримані частини знову розділяють.

Однак, отриманий код за методикою Шеннона-Фано є нерівномірним, необхідно застосовувати роздільні знаки. При цьому швидкість передачі зменшується та процесс дешифрації стає більш складним.

Кодування за допомогою метода Хаффмена містить достатньо складний алгоритм.

Розглянемо запропонований процес спрощеного кодування інформації. На наш погляд для передачі повідомлення слід використовувати латиницю з 26 буквами, а не кирилицю – український алфавіт має 32 букви. При цьому текст у повідомлені буде написаний латинськими буквами з використанням транслітерації. Також, при кодуванні слід звернуть увагу, що крім букв алфавіту необхідно ще мінімум 3 символи – пробіли між словами, кома і крапка.

Згідно Постанови КМУ N 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» [7] кожній букві українського алфавіту присвоєно певну букву (або декілька букв) латинського алфавіту.

Враховуючи, що буква W для транслітерації не використовується, таким чином для передачі простого повідомлення нам потрібно 28 кодових символів. Вираховуємо скільки нам потрібно двійкових кодових комбінацій для 28 символів. Для наочності будуємо двійкову розрядну сітку, що представлена на рис. 1.

2^n	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
значення	128	64	32	16	8	4	2	1
	0	0	0	1	1	1	1	1

$1 \cdot 2^4+1 \cdot 2^3+1 \cdot 2^2+1 \cdot 2^1+1 \cdot 2^0=16+8+4+2+1=31$

Рисунок 1 – Двійкова розрядна сітка

Джерело: створено авторами

Таким чином, для того щоб закодувати всього 28 символів, потрібні п’яті розрядні двійкові кодові комбінації. Потім для букв латинського алфавіту присвоюємо двійковий код, як показано у таблиці 2.

Таблиця 2 – Можливі варіанти двійкових кодових комбінацій

Буква	**Порядковий номер**	**Кодова комбінація**	**Буква**	**Порядковий номер**	**Кодова комбінація**	**Символ**	**Порядковий номер**	**Кодова комбінація**
A	1	00001	X	14	01110	Space	26	11010
B	2	00010	O	15	01111	Comma	27	11011
C	3	00011	P	16	10000	Dot	28	11100
D	4	00100	Q	17	10001			
E	5	00101	R	IS	10010			
F	6	00110	S	19	10011			
G	7	00111	T	20	10100			
H	S	01000	U	21	10101			
I	9	01001	V	22	10110			
J	10	01010	X	23	10111			
K	11	01011	Y	24	11000			
L	12	01100	Z	25	11001			
M	13	01101						

Джерело: створено авторами

Передавання **povitriana trevoga** буде закодоване так, як показано на рис. 2.

10000	01111	10110	01001	10100	10010	01001	00001	01110	00001	11010	10100	10010	00101	10110	01111	00111	00001
p	o	v	i	t	r	i	a	n	a	пробіл	t	r	y	v	o	g	a

Рисунок 2 – Двійкова розрядна сітка

Джерело: створено авторами

Алгоритм дії спрощеної системи кодування інформації наведено на рис. 3 у вигляді блок - схеми.



Рисунок 3 – Блок-схема алгорітму роботи спрощеної системи кодування інформації
Джерело: розроблено авторами

Від джерела інформаційні повідомлення поступають на вхід кодека (кодуючого пристрою).

Процес кодування повідомлення полягає у наступному:

- виконується побуквена транслітерація з кирилиці на латиницю;
- відбувається присвоєння відповідної двійкової комбінації для кожної букви з латинського алфавіту;
- відповідна кодова комбінація, що відповідає інформаційному повідомленню, надходить до лінії зв'язку;
- кодова комбінація надходить до цифрового фільтра на лінії зв'язку;
- в цифровому фільтрі відбувається очищення інформаційного повідомлення від сторонніх шумів;
- виконується процес декодування (розшифровки) інформаційного повідомлення у цифровому фільтрі;
- інформаційне повідомлення надходить до користувача.

Узагальнена структурна схема спрощеної системи кодування інформації представлена на рис. 4.

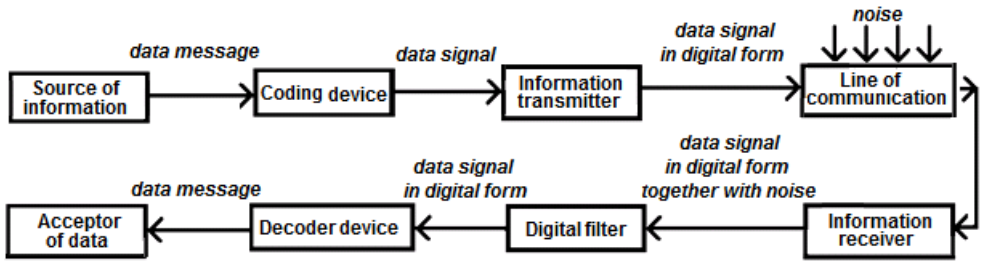


Рисунок 4 – Узагальнена структурна схема спрощеної системи кодування інформації
Джерело: створено авторами

Інформаційні повідомлення від джерела інформації (Source of information) у вигляді даних надходять до кодую чого пристрою (Coding device) в якому відбувається кодування інформації. Далі закодована інформація у вигляді цифрових сигналів даних надходить до передавача даних (Information transmitter). З передавача даних інформація через лінію зв'язку (Line of communication) надходить до приймача даних (Information receiver). Під час передачі інформаційних сигналів по лініях зв'язку їм створюють поміхи сторонні електромагнітні сигнали, які накладаються на корисний сигнал і спотворюють його. Таким чином, одночасно з даними до лінії зв'язку також надходять різні поміхи (noice). Для того, щоб позбавитись від поміх, отримана інформація з виходу приймача інформації надходить до цифрового фільтру, де відбувається відокремлення «корисної» інформації від поміх. Далі інформаційний сигнал у цифровій формі надходить до декодуючого пристрою (Decoder device)в якому відбувається перетворення інформації з цифрового вигляду у буквений. Наприкінці отримане інформаційне повідомлення надходить до акцептанта даних (Acceptor of data) – людині.

Для відображення отриманих даних використовуємо модуль nRF24L01 та РК-дисплей 1602 з мікропроцесорного комплекту ARDUINO [8, 9, 10]. Модуль nRF24L01 підключено до ARDUINO за допомогою інтерфейсу SPI. До модуля приймача nRF24L01 підключено РК-дисплей 1602, на якому відображається отримане інформаційне повідомлення (рис. 5).

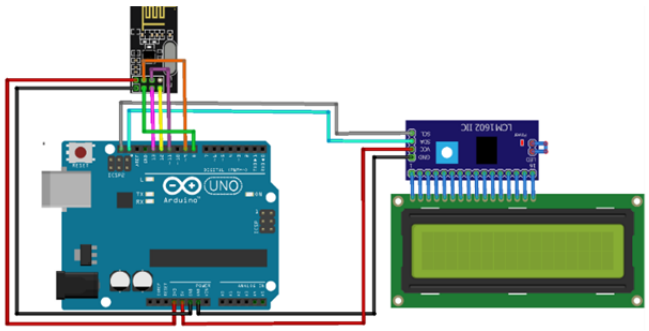


Рисунок 5 – Схема під'єднання дисплею 1602 до модуля nRF24L01 ARDUINO
Джерело: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno

Для виводу отриманих повідомлень на дисплей застосовуємо стандартну бібліотеку Arduino LiquidCrystal_I2C із зміною пакетів даних [11, 12], лістинг якої представлено на рис. 6.

У програмній бібліотеці Arduino LiquidCrystal_I2C формат пакета даних змінюється зі збільшенням його розміру.

Під час зчитування чисел з пакета послідовно викликаються необхідні функції getPacketValue з аргументами 0 та 1.

```
#include <SerialFlow.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
SerialFlow rd(7,8);
void setup(void){
   rd.setPacketFormat(2, 2);
   rd.begin(0xF0F0F0F0D2LL,0xF0F0F0F0E1LL);
   lcd.init();
   lcd.backlight();
}
void loop(void){
   unsigned int v1,v2;
   if( rd.receivePacket() ){
      v1 = rd.getPacketValue(0);
      v2 = rd.getPacketValue(1);
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print(v1);
      lcd.setCursor(8,0);
      lcd.print(v2);
   }
```

Рисунок 6 –Лістинг програми ARDUINO виводу інформаційних повідомлень на дисплей
Джерело: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno

Висновки. В результаті проведеного дослідження було розроблено спрощену систему кодування інформації, що поєднує різні методики захисту інформації. При цьому були виконані наступні дії:

1. Визначено головні особливості створення спрощенної методики кодування інформації та принципи формування. В основу цієї методики покладено принцип транслітерації українського алфавіту латиницею та двійкова система числення. Для кодування інформаційного повідомлення використовується 28 кодових комбінацій, тобто достатньо використовувати 5 двійкових розрядів для кодування одного символу.

2. Створено алгоритм роботи спрощеної методики кодування, який поетапно пояснює принцип дії даної методики.

3. Представлено узагальнену структурну схему спрощеної системи кодування інформації, яка в деталях поблочно пояснює механізм дії спрощеної системи кодування інформації.

4. Наведено приклад найпростішої апаратної частини, яку швидко власноруч можно зібрати "у польових умовах" для виводу інформаційних повідомлень на дісплей. Для виводу інформації використовується модуль nRF24L01 та РК-дисплей 1602 із комплекту ARDUINO. Розроблена спрощена система кодування інформації дає змогу пришвидшити процесс передавання інформації у закодованому вигляді, що є особливо актуальним під час ведення військових дій.

Список літератури

1. Лукічов В. В., Лужецький В. А., Васюра А. С. Методи та засоби стеганографічного захисту інформації на основі вейвлет-перетворень: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 160 с.
2. Пановик У. П. Захист інформації в автоматизованих системах на основі концептуальної моделі з формалізованою оцінкою ефективності. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2025. № 4 (28). С. 307-318. DOI: https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.798
3. Skauli T. Sensor noise informed representation of Hyperspectral data, with benefits for image storage and processing. *Optics Express.* 2011. Vol. 19, No. 14. P. 13031-13046.

4. Наукоємні технології в інфокомунікаціях: обробка, захист та передача інформації: монографія / під заг. ред.: В. М. Безрука, В. В. Баранніка . Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків : Бровін О. В., 2018. 327 с.
5. Compression Ratio Prediction in Lossy Compression of Noisy Images / A. Zemliachenko et al. *Computer Science, Engineering, Environmental Science*. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Compression-ratio-prediction-in-lossy-compression-Zemliachenko-Abramov/84ae1bf50a5de0ddfb484239cfee203034d2a1ab. DOI:10.1109/IGARSS.2015.7326574.
6. CSCI 6990.002: Data Compression. 03: Huffman Coding / Vassil Roussev. University of New Orleans, Department of Computer Science. URL: http://vernier.frederic.free.fr/Teaching/InfoTermS/InfoNumerique/Vassil%20Roussev/6990-DC-03--Huffman%201.pdf (дата звернення: 03.12.2025).
7. Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею: Постанова від 27 січня 2010 року. N 55. Київ. / Кабінет Міністрів України [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2010-%D0%BF#Text (дата звернення: 03.12.2025).
8. Arduino [Електронний ресурс]. URL: https://www.arduino.cc/product-uno-q/ (дата звернення: 03.12.2025).
9. Плати Arduino Nano [Електронний ресурс]. URL: ttps://doc.arduino.ua/ru/hardware/Nano (дата звернення: 03.12.2025).
10. Плати Arduino Uno [Електронний ресурс]. URL: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno (дата звернення: 03.12.2025).
11. LCD 1602 I2C символьний дісплей [Електронний ресурс]. URL: https://arduino.ua/prod6188-lcd-1602-i2c-simvolnii-displei-16x2-sinii?srsltid=AfmBOopxdXmu3UG9m0Ok0j1VGlBwYiiQib7qj5BzbSuDbAFuGi70Al8i (дата звернення: 03.12.2025).
12. Бібліотеки Arduino [Електронний ресурс]. URL: https://doc.arduino.ua/ru/prog/Libraries (дата звернення: 03.12.2025).

References

1. Lukichov, V. V., Luzhetskyi, V. A., & Vasiura, A. S. (2014). *Methods and means of steganographic information protection based on wavelet transforms*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
2. Panovyk, U. P. (2025). Zakhyst informatsii v avtomatyzovanykh systemakh na osnovi kontseptualnoi modeli z formalizovanoiu otsinkoiu efektyvnosti. *Cybersecurity: education, science, technology,* 4 (28), 307-318 [in Ukrainian].
3. Skauli, T. (2011). Sensor noise informed representation of Hyperspectral data, with benefits for image storage and processing. *Optics Express,* 19, No. 14, 13031-13046.
4. Bezruka, V. M., & Barannika, V. V. (Eds.). (2018). Naukoiemni tekhnolohii v infokomunikatsiiakh: obrobka, zakhyst ta peredacha informatsii. Kharkiv. nats. un-t radioelektroniky. Kharkiv : Brovin O. V. [in Ukrainian].
5. Compression Ratio Prediction in Lossy Compression of Noisy Images / A. Zemliachenko et al. Computer Science, Engineering, Environmental Science. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Compression-ratio-prediction-in-lossy-compression-Zemliachenko-Abramov/84ae1bf50a5de0ddfb484239cfee203034d2a1ab DOI:10.1109/IGARSS.2015.7326574.
6. CSCI 6990.002: Data Compression. 03: Huffman Coding / Vassil Roussev. University of New Orleans, Department of Computer Science. URL: http://vernier.frederic.free.fr/Teaching/InfoTermS/InfoNumerique/Vassil%20Roussev/6990-DC-03--Huffman%201.pdf.
7. Pro vporiadkuvannia transliteratsii ukrainskoho alfavitu latynytseiu: Postanova vid 27 sichnia 2010 roku. N 55. Kyiv. / Kabinet Ministriv Ukrainy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/55-2010-%D0%BF#Text.
8. Arduino. URL: https://www.arduino.cc/product-uno-q/.
9. Platy Arduino Nano. URL: ttps://doc.arduino.ua/ru/hardware/Nano.
10. Platy Arduino Uno . URL: https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno.
11. LCD 1602 I2C symvolnyi displei. URL: https://arduino.ua/prod6188-lcd-1602-i2c-simvolnii-displei-16x2-sinii?srsltid=AfmBOopxdXmu3UG9m0Ok0j1VGlBwYiiQ.
12. Biblioteky Arduino. URL: https://doc.arduino.ua/ru/prog/Libraries.

[1]**Dmytro Trushakov,** Assos. Prof., PhD tech. sci., [2] **Oksana Hoholyuk,** Prof., Doct. tech. sci., [3]**Serhiy Rendzinyak**, Prof., DSc., **Oleksandr Kozlovskyi,** Assos. Prof., PhD tech. sci.
1Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

[2] *Institute of Power Engineering and Control Systems, Lviv Polytechnic National University. Lviv, Ukraine*
[3] *Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine*

Creation of a Simplified Information Coding System

The article is devoted to the creation of a simplified information coding system that combines various methods of information protection. The task of this article is developed a simple and convenient way of coding information, for its further transmission in the form of digital information messages. This method should be based on the classic method of transmitting discrete information. The aim of research is developing a simplified information coding system. At the same time, it is necessary to use the smallest number of code symbols for the fastest transmission of messages.

The main features of the creation of a simplified method of coding information have been determined problems of information transmission and principles of formation. The method of simplified coding of information is proposed and substantiated.

Considering that the letter W is not used for transliteration, thus to transmit a simple message we need 28 code symbols. Thus, in order to encode a total of 28 symbols, we need five-bit binary code combinations. Then for the letters of the Latin alphabet we assign the corresponding binary code. To transmit messages, the Latin alphabet is used (the Latin alphabet has 26 letters) and not the Cyrillic alphabet (the Ukrainian alphabet has 32 letters). Also, when coding, you should pay attention to the fact that in addition to the letters of the alphabet, you need at least 3 more characters - spaces between words, a comma and a period. Given that the letter W is not used for transliteration, in this way, the order of 28 code characters is needed to transmit a simple message. Five-bit binary numbers are required to encode each of the 28 characters corresponding to the letters of the Latin alphabet and the space between words, commas and periods (the maximum number in the binary system that can be written in five bits is 31). The structural scheme of the coding and information transmission process is given. A block diagram of the coding and information transmission process algorithm has been created. The developed simplified information coding system makes it possible to speed up the process of transmitting information in coded form, which is especially relevant during military operations.

As a result of the conducted research, a simplified information coding system was developed, which combines various methods of information protection. The main features of the creation of a simplified method of information coding, the problems of information transmission and the principles of formation are determined. Twenty-eight code combinations are used to encode an information message, that is, it is enough to use 5 binary digits to encode one symbol. A simplified structural diagram of the process of encoding and transmission of information is given, as well as a block diagram of the algorithm of the process of encoding and transmission of information. The developed simplified information coding system makes it possible to speed up the process of transmitting information in coded form, which is especially relevant during military operations.

coding, information, information protection, simplified information coding system

Одержано (Received) 07.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 25.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 29.03.2026

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.191 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).213-219

А.С. Лапченко, старш. наук. співр., канд. техн. наук
Національний транспортний університет, м. Київ, Україна
e-mail: las83@ukr.net

Підбір параметрів послідовно-паралельної електродетонаторної мережі при проходженні тунелів

У статті встановлені та побудовані залежності сили струму в магістральному провіднику та детонаторах електропровідної мережі від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 220 В та 380 В. Наведено залежності загального опору електропровідної мережі в залежності від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу жили магістрального провідника при застосуванні одного виду з'єднувальних дротів.
алюміній, детонатор, мідь, опір дротів, оцинкована сталь, послідовно-паралельна електродетонаторна мережа, сила струму, тунель

Постановка проблеми. В процесі трасування залізничних і автодорожніх шляхів можуть виникати різні перешкоди, які долаються за допомогою тунелів [1]. Незважаючи на розвиток механізованих методів виїмки, буровибуховий спосіб залишається найпоширенішим методом проходки тунелів у твердих породах завдяки своїй універсальності та економічній ефективності. Крім того, в залежності від міцності твердої породи може не знадобитись тунельна оправа або частина її елементів [1], які можуть виконуватись з специфічних видів цементобетону [2, 3], як результат значна економія. Водночас вибухові роботи супроводжуються такими проблемами, як [4-6]: надмірні коливання ґрунту, недобори і перебори гірської породи, розліт уламків та пошкодження навколишнього масиву порід. Ці явища значною мірою залежать від системи ініціювання. Тому вибір відповідної електричної мережі детонаторів є ключовим чинником досягнення ефективних і керованих тунельних вибухових робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У тунельних вибухових роботах електричні мережі детонаторів зазвичай виконуються за послідовною, паралельною або комбінованою схемою [5, 7-9]. Кожна схема має свої переваги і недоліки. Перевагами послідовного з'єднання слугують [5, 7]: можливість застосування підривних машинок, легкість діагностики його справності, простота приєднання і відносна легкість монтажу. Недолік – при виході з ладу бодай одного електродетонатору спостерігається відмова всього послідовного з'єднання [5, 7]. Недоліки всіх різновидів паралельних схем: складність, інколи неможливість діагностики цілісності електричної мережі спеціальним вимірювальним обладнанням; заплутаність приєднання і складність монтажу [5, 8]. При комбінованій схемі з'єднання недоліком слугує застосування лише при великій кількості електродетонаторів [5, 7, 8]. Крім переваг і недоліків кожної з схем електричної мережі детонаторів існують певні обмеження і рекомендації до застосування кожної з них: зазвичай, змішані схеми під'єднуються до освітлювальної або силової електричної мережі змінної напруги 220 В чи 380 В [5, 8, 9]; для всіх схем з метою проведення безвідмовного вибуху потрібно забезпечити силу струму рівною або

© А. С. Лапченко, 2026

більше ніж гарантійний, величина якого повинна становити не менше 2,5 А при підриванні змінним струмом [5, 9]. При електропідриванні для передачі струму від джерела до електродетонаторів застосовують різні види дротів з потрібними характеристиками: матеріалом жили дроту [9], певною площею поперечного перерізу [5, 9], видом ізоляції жили дроту [9] та призначенням дроту [5, 7-9].

Компанування магістральних, з'єднувальних та інших дротів з різним матеріалом жили та її площею поперечного перерізу за різної кількості детонаторів з одночасним застосуванням певної схеми може давати безліч різних варіантів. Для конкретного потрібного варіанту розраховуються опір дротів і електродетонаторів, а також визначають силу струму в магістральних дротах та детонаторах. Потім перевіряється забезпечення у відповідності до гарантійного струму. Перевірка кожного разу певного варіанту електричної мережі детонаторів з їх коригуванням може вимагати певного часу в розрахунках і може бути доволі громіздкою справою. Побудова типових залежностей розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та детонаторах від параметрів дротів і їх довжини при потрібній кількості детонаторів значно спростила б процес підбору параметрів дроту. Також навпаки, за відомими параметрами дротів електродетонаторної мережі можна швидко знайти опір електричної мережі та силу струму. На сьогоднішній момент відсутні побудовані типові залежності фізичних величин послідовно-паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів.

Постановка завдання. Отримання та побудова розрахункового опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та детонаторах при послідовно-паралельному з'єднанні від параметрів дротів і їх довжини при проходженні тунелів.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання: огляд актуальних досліджень і наукової літератури; розрахунок та побудова залежностей фізичних величин послідовно-паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів; аналіз побудованих залежностей та встановлення можливості застосування певних видів дротів при проходженні тунелів потрібної довжини.

Виклад основного матеріалу. При розрахунках послідовно-паралельної електропровідної мережі для ведення вибухових робіт при розробці тунелю проведено аналіз на основі поєднання магістральних, з'єднувальних та детонаторних дротів, при цьому в тунелебудуванні під з'єднувальними треба розуміти об'єднання вивідних, дільничних, кінцевих і сполучних дротів. До того ж, більшість з цих перелічених з'єднувальних дротів в тунелебудуванні не застосовується при застосуванні інших схем підключення крім послідовно-паралельної електродетонаторної мережі. Вибір послідовно-паралельної схеми з'єднання обумовлено великою кількістю електродетонаторів та можливістю приєднатись до освітлювальної чи силової електромережі напругою 220 В чи 380 В, що зазначено в [5, 8, 9]. Для розрахунку електричної мережі було прийнято 140 детонаторів, як усереднене значення потрібної кількості при проходженні залізничних та автомобільно-дорожніх тунелів суцільних вибоєм за одну заходку. Для розрахунку використовували дроти з наступних матеріалів жили: мідь, алюміній, оцинкована сталь. Площі поперечних перерізів жил магістральних провідників становили: оцинкована сталь – 1,1 мм^2, мідь – 0,75-10 мм^2, алюміній – 2,5-10 мм^2. Вибір типорозміру магістрального провідника був обумовлений номенклатурою випуску вітчизняними та закордонними виробниками. Розрахунок опору електричної мережі детонаторів та сили струму в магістральних дротах та

детонаторах проведено на основі відомих фізичних формул згідно з [10]. На рис. 1 наведено залежність загального опору електропровідної мережі в залежності від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу жили магістрального провідника при застосуванні одного виду мідних з'єднувальних дротів з площею поперечного перерізу жили 0,5 мм^2 та одного виду детонаторного мідного проводу з площею поперечного перерізу жили 0,2 мм^2. Застосування такого виду з'єднувальних і детонаторних дротів обумовлено найбільшою їх розповсюдженістю у вітчизняних і закордонних виробників з одночасно мінімально допустимою витратою матеріалу жили дроту.

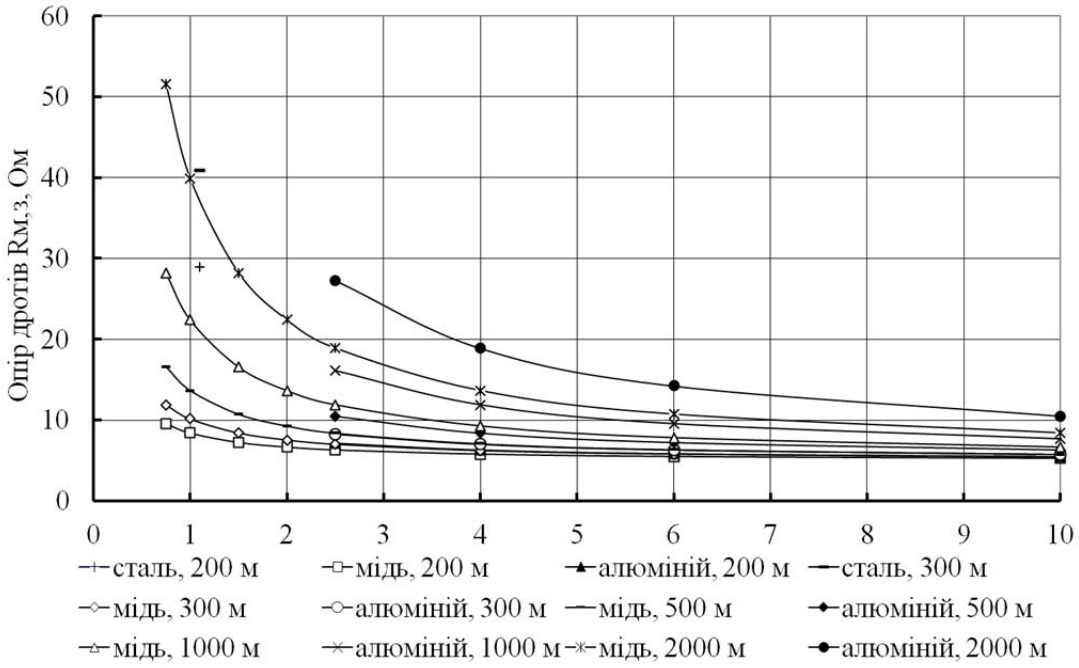


Рисунок 1 – Залежність загального опору електропровідної мережі в залежності від параметрів магістрального провідника

Джерело: розроблено автором

Отриманий загальний опір електропровідної мережі збільшується при переході матеріалу жили від міді до алюмінію і потім сталі, а також при збільшенні довжини дротів і зменшенні площі поперечного перерізу жили, що повністю узгоджується з закономірностями фізичних явищ.

На рис. 2 та рис. 3 наведено залежності величини сили струму в магістральному провіднику послідовно-паралельної електропровідної мережі детонаторів при проходженні тунелів від матеріалу, довжини та площі поперечного перерізу його жили за напруги 380 В та 220 В, відповідно. Характеристики з'єднувальних та детонаторних дротів в цьому випадку такі ж як і при визначенні опору дротів.

Величина сили струму в мережі зменшується при: переході жили проводу від міді до алюмінію і сталі або зменшенні її поперечного перерізу; збільшенні довжини дротів та збільшенні кількості детонаторів. Такі процеси повністю узгоджуються з загально-фізичними явищами.

Зменшення змінної напруги з 380 В до 220 В закономірно призводить до зменшення сили струму в магістральному провіднику. Мідна та алюмінієва жили повністю забезпечують гарантійний струм, величина якого повинна становити не менше 2,5 А, не залежно від величини змінної напруги, досліджуваної довжини магістрального провідника від 200 м до 2000 м та навіть при мінімально допустимій

площі поперечного перерізу: 0,75 мм^2 для міді та 2,5 мм^2 для алюмінію. Лише оцинкована сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм^2 не здатна забезпечити гарантований струм при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 2000 м і більше та напрузі 380 В (ці дані не винесені на графічне зображення рис. 2 та рис. 3 через інше потрібне масштабування шкал).

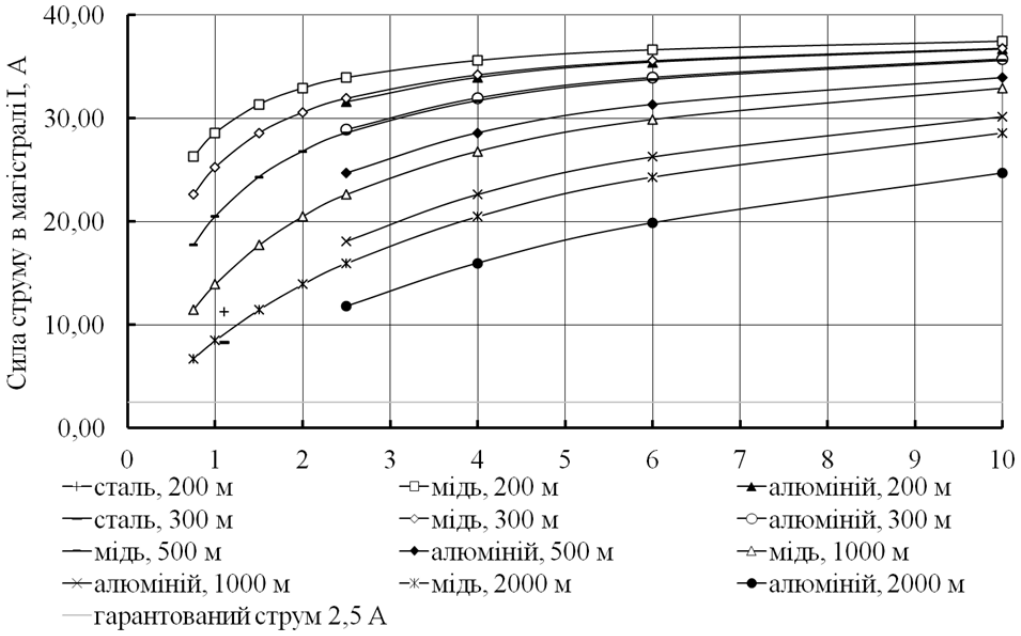


Рисунок 2 – Залежність сили струму в магістральному провіднику електропровідної мережі від його параметрів за змінної напруги 380 В

Джерело: розроблено автором

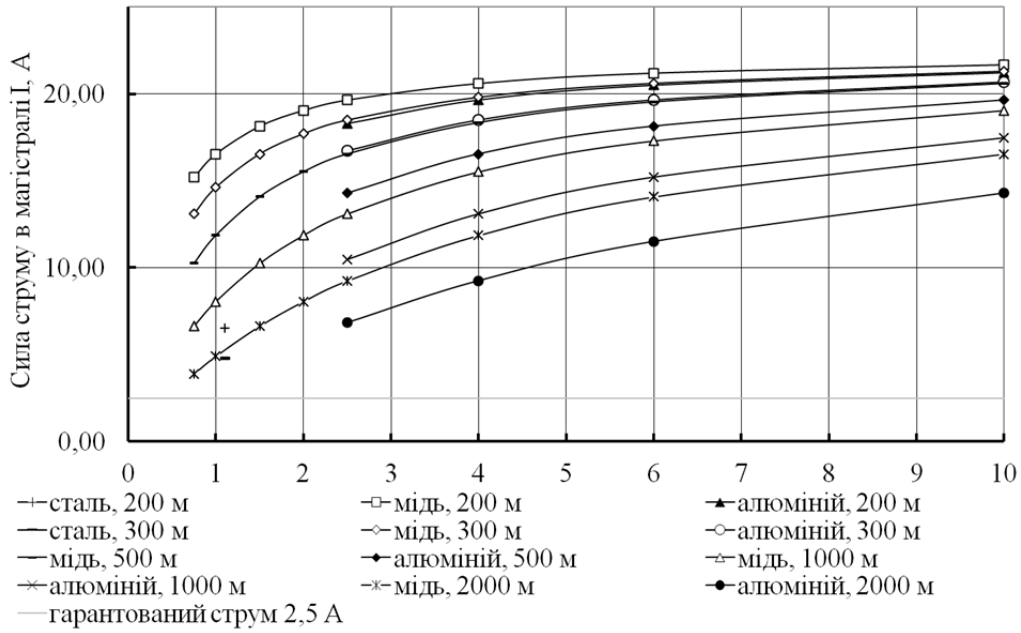


Рисунок 3 – Залежність сили струму в магістральному провіднику електропровідної мережі від його параметрів за змінної напруги 220 В

Джерело: розроблено автором

У відповідності до рис. 4 та рис. 5 сила струму в детонаторах прямо пропорційна до вище розглянутої сили струму в магістральному провіднику (рис. 2 та рис. 3) і є меншою за величиною значення. Зменшення змінної напруги з 380 В до 220 В призводить до зменшення сили струму в детонаторах, аналогічно магістральному провіднику.

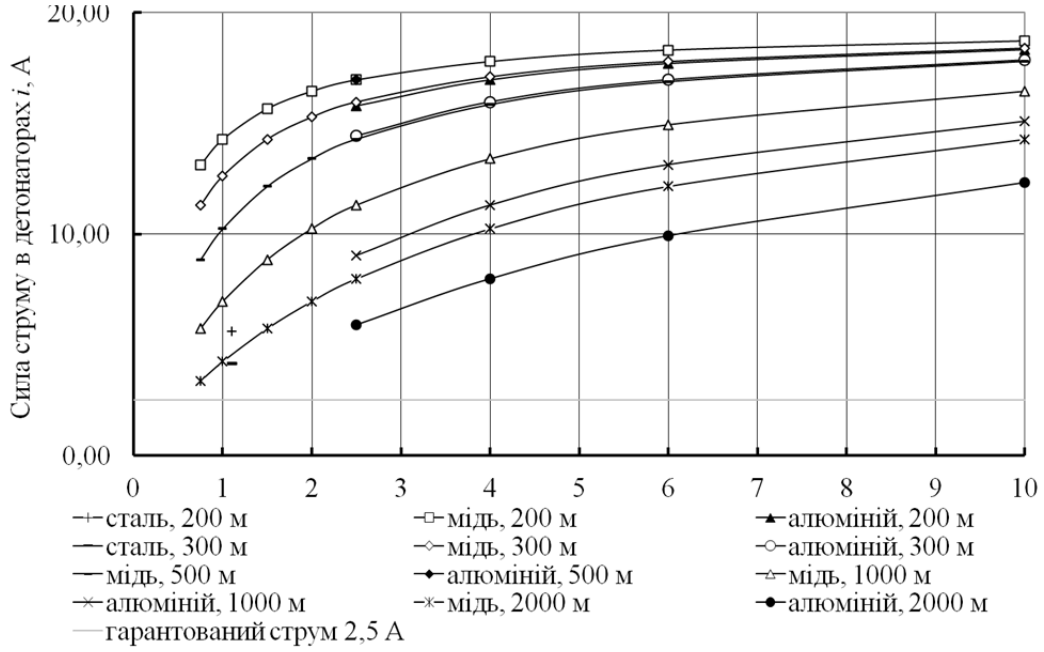


Рисунок 4 – Залежність сили струму в детонаторах від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 380 В

Джерело: розроблено автором

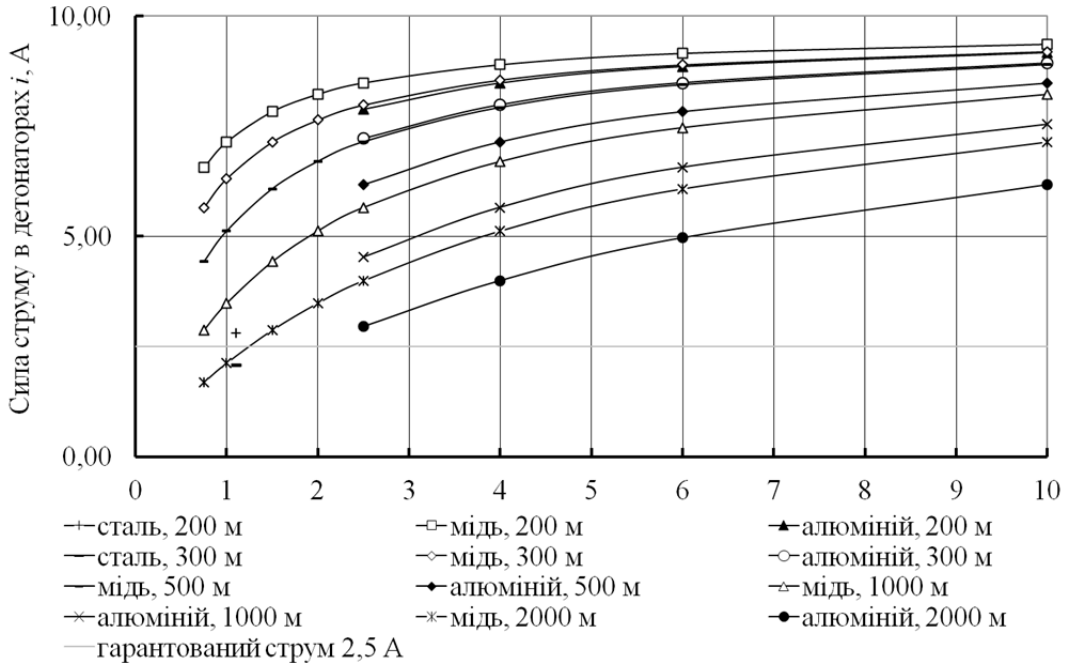


Рисунок 5 – Залежність сили струму в детонаторах від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 220 В

Джерело: розроблено автором

Мідна та алюмінієва жили забезпечують гарантійний струм в детонаторах, не залежно від величини змінної напруги, досліджуваної довжини магістрального провідника та його площі поперечного перерізу, крім мідної жили площею поперечного перерізу до 1,2 мм^2 та довжиною 2000 м і більше за змінної напруги 220 В. Оцинкована сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм^2 не здатна забезпечити гарантований струм в детонаторах при довжині магістрального провідника 300 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В (дані не винесені на зображення рис. 4 та рис. 5 через інше потрібне масштабування шкал).

Висновки. Проведено огляд актуальних досліджень і наукової літератури стосовно схем електричних мереж детонаторів, що використовуються в тунельних вибухових роботах. На основі проведеного огляду поставлена мета та задачі дослідження щодо побудови типових залежностей фізичних величин послідовно-паралельної електродетонаторної мережі від її параметрів при проходженні тунелів. Встановлені та побудовані залежності сили струму в магістральному провіднику та детонаторах електропровідної мережі від параметрів магістрального провідника за змінної напруги 220 В та 380 В. Мідна та алюмінієва жили повністю забезпечують гарантійний струм в магістральному провіднику в усьому діапазоні досліджуваних його параметрів не залежно від величини змінної напруги при проходженні тунелів. Оцинкована сталь за поперечного перерізу в 1,1 мм^2 не здатна забезпечити гарантований струм при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 2000 м і більше та напрузі 380 В. Гарантійний струм в детонаторах не здатні забезпечити: мідні жили площею поперечного перерізу до 1,2 мм^2 та довжиною 2000 м і більше за змінної напруги 220 В; оцинкована сталь з вище розглянутими параметрами при довжині магістрального провідника 300 м і більше та напрузі 220 В, а також при довжині магістрального провідника 1000 м і більше та напрузі 380 В.

Список літератури

1. Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів. В 3 ч. Ч. 1 / Ю.М. Айвазов. Київ: НТУ, 2005. 187 с.
2. Лапченко А.С. Вплив меленого доменного шлаку та пластифікуючої добавки на міцністні властивості дорожнього бетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2025. № 23. С. 143-154. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14
3. Лапченко А.С. Порівняння властивостей дорожнього цементобетону з додаванням поліпропіленових та базальтових фібр. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. № 12 (43). С. 358-365. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.358-365
4. Лапченко А.С. Оцінка недоліків проведення буровибухових робіт в різних гірських масивах. *Збірник наукових праць національного гірничого університету.* 2025. № 83 (4). С. 280-287. https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.280
5. Симанович Г.А., Хоменко О.Є., Кононенко М.М. Руйнування гірських порід вибухом: навч. посіб.. Дніпропетровськ: НГУ, 2014. 207 с.
6. Кравець В.Г., Зуєвська Н.В. Проектування вибухових робіт: навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 217 с.
7. Руйнування гірських порід вибухом / Шевцов М.Р., Таранов П.Я., Левіт В.В., Гудзь О.Г. Донецьк: ДонНТУ, 2003. 248 с.
8. Айвазов Ю.М., Підгорний О.В. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Підземні транспортні споруди» для студентів спеціальності 2911 «Мости та транспортні тунелі». Київ: УТУ, 1998. 36 с.
9. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.): підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / за ред. В. Г. Бар'яхтара, С. О. Довгого. Харків: Вид-во «Ранок», 2019. 272 с.
10. Shi J.-J., Guo S.-C., Zhang W. Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science*. 2022. № 10. 889504. https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504

References

1. Aivazov, Yu.M. (2005). Survey and design of mountain transport tunnels. (Vol. 1). Kyiv: NTU [in Ukrainian].
2. Lapchenko, A.S. (2025). The influence of ground blast furnace slag and plasticizing additive on the strength properties of road concrete. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 143-154. https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14 [in Ukrainian].
3. Lapchenko, A.S. (2025). Comparison of Road Cement Concrete Properties with Polypropylene and Basalt Fibers Addition. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 12 (43), 358-365. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.358-365 [in Ukrainian].
4. Lapchenko, A.S. (2025). Disadvantages's evaluation of drilling and blasting works in various rock. *Collection of research papers of the National mining university*, 83 (4), 280-287. https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.280 [in Ukrainian].
5. Symanovich, G.A., Khomenko, O.E., Kononenko, M.M. (2014). Destruction of rocks by explosion. Dnipropetrovsk: NGU [in Ukrainian].
6. Kravets, V.G., Zuevska, N.V. (2020). Design of blasting works. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].
7. Shevtsov, M.R., Taranov, P.Ya., Levit, V.V., Gudz, O.G. (2003). Destruction of rocks by explosion. Donetsk: DonNTU [in Ukrainian].
8. Aivazov, Yu.M., Pidgorny, O.V. (1998). Methodological guidelines for the implementation of a course project in the discipline "Underground transport structures". Kyiv: UTU [in Ukrainian].
9. Baryakhtar, V. G., Dovgy, S. O., Bozynova, F. Ya., Kiryukhina, O. O. (2019). Physics (standard level, according to the curriculum of the author's team under the leadership of Loktyev V. M.). Kharkiv: Publishing house "Ranok" [in Ukrainian].
10. Shi, J.-J., Guo, S.-C., Zhang W. (2022). Expansion of Blast Vibration Attenuation Equations for Deeply Buried Small Clearance Tunnels Based on Dimensional Analysis. *Frontiers in Earth Science*, 10, 889504. https://doi.org/10.3389/feart.2022.889504 [in Ukrainian].

Artem Lapchenko, Senior Researcher, Ph.D tech. sci
National Transport University, Kyiv, Ukraine

Parameters of a Series-Parallel Electrodetonator Network When Passing Tunnels

The review of current research and scientific literature on the schemes of detonators's electrical networks used in tunnel blasting operations was conducted. Based on the review, the goal and objectives of the study were set to construct typical dependences of physical quantities of a series-parallel electric detonator network on its parameters when passing through tunnels. The dependences of the current strength in the main wire and detonators of the electrical network from the parameters of the main wire at alternating voltages of 220 V and 380 V were established and constructed. Copper and aluminium cores fully provide the guarantee current in the main wire in the entire range of its parameters under study, regardless of the magnitude of the alternating voltage when passing through tunnels. Galvanized steel with a cross section of 1.1 mm^2 is not able to provide a guaranteed current with a main wire length of 1000 m and more and a voltage of 220 V, as well as with a main conductor length of 2000 m and more and a voltage of 380 V. The current strength in detonators is directly proportional to the current strength in the main wire and is smaller in magnitude. Reducing the alternating voltage from 380 V to 220 V leads to a decrease in the current strength in detonators, similarly to the main wire. Copper and aluminium wires provide a guaranteed current in detonators, regardless from the magnitude of the alternating voltage, the investigated length of the main wire and its cross-sectional area, except for a copper wire with a cross-sectional area of up to 1.2 mm^2 and a length of 2000 m or more at an alternating voltage of 220 V. Galvanized steel with a cross-section of 1.1 mm2 is not able to provide a guaranteed current in detonators with a main wire length of 300 m or more and a voltage of 220 V, as well as with a main wire length of 1000 m or more and a voltage of 380 V.

aluminum, copper, current strength, detonator, galvanized steel, series-parallel electrodetonator network, tunnel, wire resistance

Одержано (Received) 01.04.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 13.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 17.04.2026

УДК 699.887.2 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).220-227

В.А. Настоящий, проф., канд. техн. наук, **В.А. Пашинський,** проф., д-р техн. наук,
О.В. Лізунков, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vanast52@ukr.net

Практичний досвід проєктування системи захисту від блискавки для будівлі ліцею

Показано, що лінійні та кульові блискавки спричиняють численні пожежі та руйнування будівель, травмування й загибель людей. На прикладі будівлі ліцею, що підлягає реконструкції, відображено порядок оцінювання ризиків від ударів блискавки та практичний досвід проєктування системи блискавкозахисту. Розроблена система зовнішнього блискавкозахисту будівлі ліцею, яка складається із захисної сітки на покрівлі, доземних провідників, горизонтальних і вертикальних уземлювачів.
блискавка, ризики для людей та будівлі, система блискавкозахисту

Постановка проблеми. Блискавка представляє собою надзвичайно потужний електричний розряд між хмарою та землею або між двома хмарами. Найчастіше спостерігаються іскрові розряди, які називають лінійними блискавками. Набагато рідше спостерігається кульова блискавка, яка представляє собою сферичний розряд в атмосфері. В цілому по планеті блискавки виникають не менше 60 разів на секунду і при цьому щорічно ранять і вбивають до 250000 осіб. Поряд з травмуванням та загибеллю людей, удари лінійних та кульових блискавок можуть спричиняти пожежі та руйнування будівель, що призводить до значних втрат. Відомі засоби захисту будівель від блискавок відображені в нормативних документах України та інших країн світу, але практичне застосування способів блискавкозахисту по відношенню до конкретних будівельних об'єктів залишається актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з поясненнями [1], розрізняють лінійні, кульові, плоскі та точкові блискавки. Найчастіше спостерігаються та наносять найбільші втрати лінійні та кульові блискавки. Канал лінійної блискавки має діаметр порядку 10 см, а величина струму може сягати 20000 А. Тривалість дії лінійного розряду блискавки, протягом якого відбувається декілька імпульсів струму, зазвичай близька до однієї секунди. Досить часто спостерігається одночасна реалізація декількох каналів блискавки, як це показано на рисунку 1. Кульова блискавка представляє собою розряд у формі сфери червонуватого кольору діаметром 10…20 см, який повільно рухається разом з атмосферним повітрям та вибухає, стикаючись з перепонами.



Рисунок 1 – Блискавки над містом

Джерело: [2]

© В. А. Настоящий, В. А. Пашинський, О. В. Лізунков, 2026

При попаданні в матеріальні об'єкти (поверхню землі, дерева, будівлі, споруди, тварин та людей) лінійні та кульові блискавки спричиняють значні руйнування, пожежі, відмову електричних приладів, ураження людей та тварин. Приклади руйнування та пожежі, спричиненої блискавкою, показані на рисунку 2.



Рисунок 2 – Руйнування та пожежі, спричинені блискавкою

Джерела: [3, 4]

Наслідки дії блискавок відображені в численних інтернет-публікаціях [2…8]. Зокрема, в статті [3] описані руйнування будинку в с. Вербаїв у 2023 році, а в [4] – пожежа будинку на Волині у 2025 році. У статті [5] описані наслідки удару блискавки в 2025 році поблизу будинку в м. Первомайськ, де згоріла побутова техніка та постраждала електропроводка. Там же вказано, що в 2001…2020 роках в Україні зафіксовано 194 смерті від блискавки (третє місце в Європі). Більшість смертей сталася з чоловіками під час роботи на відкритому повітрі в період з травня по серпень.

Досить часто спостерігаються удари блискавки у високі будівлі та споруди. Наприклад, в [6] відмічені попадання блискавки в статую Христа-Спасителя у 2014 та в 2023 роках, а в [7] надана інформація про пожежу купола одного з храмів Одеси внаслідок удару блискавки у 2024 році.

Значні ушкодження можуть спричинити також кульові блискавки, що проникають в будівлі. Наприклад, у статті [8] описані часткові руйнування житлового будинку в Петрівському районі Кіровоградської області у 2020 році; вихід з ладу електронних пристроїв у м. Олександрія у 2019 році; пожежа на подвір'ї у с. Тарасівка Запорізької області, яка у 2018 році знищила літню кухню та гараж з автомобілем; значні руйнування будинку, знищення електричної проводки та приладів, а також травмування господині в Черкаській області в 2016 році.

Захист будівель і споруд від дії блискавок здійснюється шляхом улаштування спеціальних систем блискавкозахисту, проєктування яких здійснюється згідно з міжнародними стандартами, імплементованими в Україні у вигляді ДСТУ [9 – 11]. Ці стандарти регламентують загальні принципи проєктування систем блискавкозахисту, методи оцінювання ризиків та управління ризиками, а також вимоги щодо захисту будівель і споруд від фізичного руйнування та захисту від небезпеки для життя людей, включаючи вказівки щодо проєктування систем захисту.

Виконаний бібліографічний огляд показав, що ураження блискавками будівель, споруд та людей є досить поширеним і небезпечним явищем, яке може викликати пожежі та руйнування будівель і споруд, а також втрату здоров'я й життя людей. Це вимагає улаштування систем блискавкозахисту, які мінімізують імовірні матеріальні збитки та соціальні втрати від удару блискавки.

Постановка завдання. Виходячи з вимог чинних норм і практичного досвіду проєктування, розробити алгоритм вибору необхідного класу захисту та раціональний порядок проєктування зовнішньої системи блискавкозахисту. Проілюструвати

використання запропонованого алгоритму прикладом проєктування системи зовнішнього блискавкозахисту для будівлі, яка підлягає реконструкції.

Виклад основного матеріалу. Аналіз необхідності улаштування та вибір класу системи зовнішнього блискавкозахисту здійснюється за результатами розрахункової оцінки ризиків при ураженнях блискавкою. Цей аналіз та проєктування системи блискавкозахисту рекомендується виконувати за алгоритмом, який базується на вимогах ДСТУ [9, 10, 11] і складається з наступних кроків.

1. Для більшості громадських будівель оцінюється ризик загибелі та травмування людей у будівлі R_1, а також ризик втрати громадських послуг R_2.

2. Початковими даними для оцінювання вказаних ризиків та проєктування системи блискавкозахисту є:

- конструкція будівлі та її частин;
- структурно-фізичні та електротехнічні характеристики ґрунтів основи;
- наповнення будівлі (перелік та характеристики обладнання, внутрішніх мереж і систем, присутність і кількість людей);
- середньорічна кількість ударів блискавки в будівлі чи мережі та поблизу них;
- імовірності ураження живих істот, фізичних пошкоджень будівлі та збою внутрішніх систем при ударах в будівлю, в під'єднані мережі чи поблизу них;
- розміри втрат унаслідок перелічених подій.

3. За рекомендаціями ДСТУ [10] встановлюється величина допустимого ризику, яка для громадських будівель дорівнює $R_T = 10^{-5}$ 1/рік у випадку травмування чи загибелі людей та $R_T = 10^{-3}$ 1/рік у випадку припинення надання громадських послуг.

4. Поетапно визначаються компоненти ризику:

R_A – втрата життя унаслідок ураження електричним струмом при ударі в будівлю;

R_B – фізичне пошкодження будівлі при ударі блискавки в будівлю;

R_C – відмова внутрішніх систем при ударі блискавки в будівлю;

R_M – відмова внутрішніх систем від перенапруги при ударі поблизу будівлі;

R_U – втрата життя унаслідок ураження електричним струмом при ударі блискавки в лінію, що приєднана до будівлі;

R_V – пошкодження будівлі при ударі блискавки в лінію, що приєднана до будівлі;

R_W – відмова внутрішніх систем від перенапруги при ударі блискавки в лінію, що приєднана до будівлі;

R_Z – відмова внутрішніх систем від перенапруги при ударі блискавки поблизу лінії, що приєднана до будівлі.

5. Кожен із вказаних компонентів ризику по мірі їх обчислення порівнюється з допустимим значенням R_T. Якщо один з обчислених компонентів ризику перевищує допустиме значення, захист від блискавки вважається необхідним і подальші розрахунки не виконуються.

6. Обираються клас блискавкозахисту та засоби захисту від блискавки згідно з рекомендаціями ДСТУ [10, 11].

7. Здійснюється загальна компоновка блискавкоприймачів і струмовідводів згідно з рекомендаціями ДСТУ [11] та з урахуванням наявних на ринку виробів. У якості блискавкоприймачів можуть використовуватися стержні, троси чи захисні сітки. Для плоских поверхонь покрівель та фасадів зазвичай використовують захисні сітки з розміром комірки від 5×5 м до 20×20 м, що залежить від класу блискавкозахисту. Система струмовідводів (доземних провідників) проєктується таким чином, щоб забезпечити мінімальний шлях проходження струму при наявності кількох паралельних струмовідводів.

8. Виходячи з надземної частини системи блискавкозахисту та з урахуванням характеристик ґрунту, обирається конструкція земляного закінчення та вибір необхідних конструктивних елементів. Необхідна площа контакту уземлення з ґрунтом

залежить від питомого опору ґрунту, який змінюється від 20…50 Ом·м для вологої глини до 500…1000 Ом·м і більше для сухого піску та скелястих порід. Тип, розміри та кількість елементів уземлення обираються з урахуванням типу, структури та вологості ґрунту, а також його сезонних змін (опади, пересихання, промерзання), отриманих у результаті інженерно-геологічних досліджень.

9. Виконуються робочі креслення системи зовнішнього блискавкозахисту.

Комплекс зовнішнього блискавкозахисту розроблено для будівлі Мурахівського ліцею Миколаївської області, який не експлуатується та підлягає реконструкції. Одноповерхова будівля ліцею має складну форму в плані з габаритними розмірами 42×53 м. Будівля безкаркасна, з несучими зовнішніми та внутрішніми цегляними стінами й перегородками товщиною 250…510 мм. Горищне перекриття виконане з порожнистих збірних залізобетонних плит з утепленням. У результаті реконструкції холодна покрівля має бути виконана з металочерепиці по дерев'яній кроквяній системі. Підвальні приміщення відсутні. Відповідно до ДБН [12], об’єкт відноситься до класу відповідальності СС2. План та фасади будівлі ліцею зображені на рисунку 3.

У результаті обчислень за наведеним вище алгоритмом з урахуванням табличних даних [10] отримано $R_A = 1{,}53\times10^{-5} > R_T = 10^{-5}$ 1/рік, $R_B = 3{,}82\times10^{-3} > R_T = 10^{-3}$ 1/рік. Таким чином, ризики втрати життя та руйнування будівлі перевищують допустимі значення, що вимагає улаштування системи блискавкозахисту.

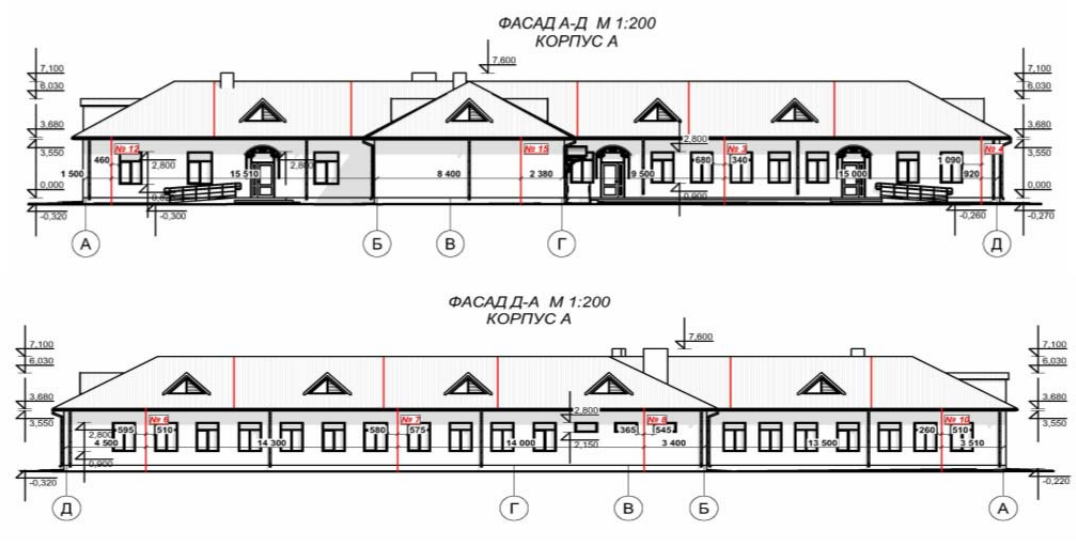
Розроблення системи зовнішнього блискавкозахисту здійснено згідно з вказівками ДСТУ [11] з метою захисту від прямих ударів та вторинних дій блискавки, а також від крокової напруги. Для третього класу блискавкозахисту надійність захисту від прямих ударів блискавки прийнята рівною 0,9. Система складається з трьох підсистем: блискавкоприймачів (перехоплювачів), доземних провідників (струмовідводів) та земляного закінчення. Матеріал і розміри усіх елементів встановлені згідно з вимогами ДСТУ [11].

У якості блискавкоприймача на покрівлі встановлюється блискавкозахисна сітка із сталевого оцинкованого дроту діаметром 8 мм з розміром чарунки не більше 15×15 м. Схема монтажу блискавкозахисної сітки зображена на рисунку 4, де позначені такі елементи: 1 – тримач коньків прямий; 2 – тримач дроту рядовий; 3 – злучник для дроту універсальний; 4 – дріт сталевий оцинкований діаметром 8 мм. Усі тримачі, злучники та інші деталі прийняті українського виробництва за каталогом «Блискавкозахист FS» [13].

Доземні провідники зі сталевого оцинкованого дроту діаметром 8 мм прокладаються відкрито по фасаду на відстані по периметру будівлі не більше 15 м, що відповідає вимогам ДСТУ [11]. Для забезпечення можливості виконання вимірювань опору заземлюючого пристрою поблизу землі на кожному доземному провіднику на стіні будівлі встановлюються контрольні злучники для дроту й заземлюючої смуги.

В якості заземлюючого пристрою запроєктована система земляного закінчення з горизонтальних та вертикальних уземлювачів. Підвищення ефективності цієї системи реалізоване за рахунок розширення геометрії шляхом збільшення кількості вертикальних стрижнів до 15 та улаштування закільцьованого горизонтального уземлювача. Вертикальні уземлювачі виконані зі стержнів діаметром 16 мм довжиною 3 м та з’єднується з горизонтальними уземлювачами зі сталевої оцинкованої смуги перерізом 40×4 мм. Кільцевий горизонтальний уземлювач прокладається на глибині не менше 0,7 м від рівня землі та на відстані не менше 1,0 м від фундаменту будівлі. У місцях перетину горизонтальних уземлювачів з металевими підземними комунікаціями вони прокладаються в трубах діаметром 90 мм.

Схема розміщення блискавкозахисної сітки, доземних провідників та системи земляного закінчення наведена на плані й фасадах будівлі, показаних на рисунку 3.



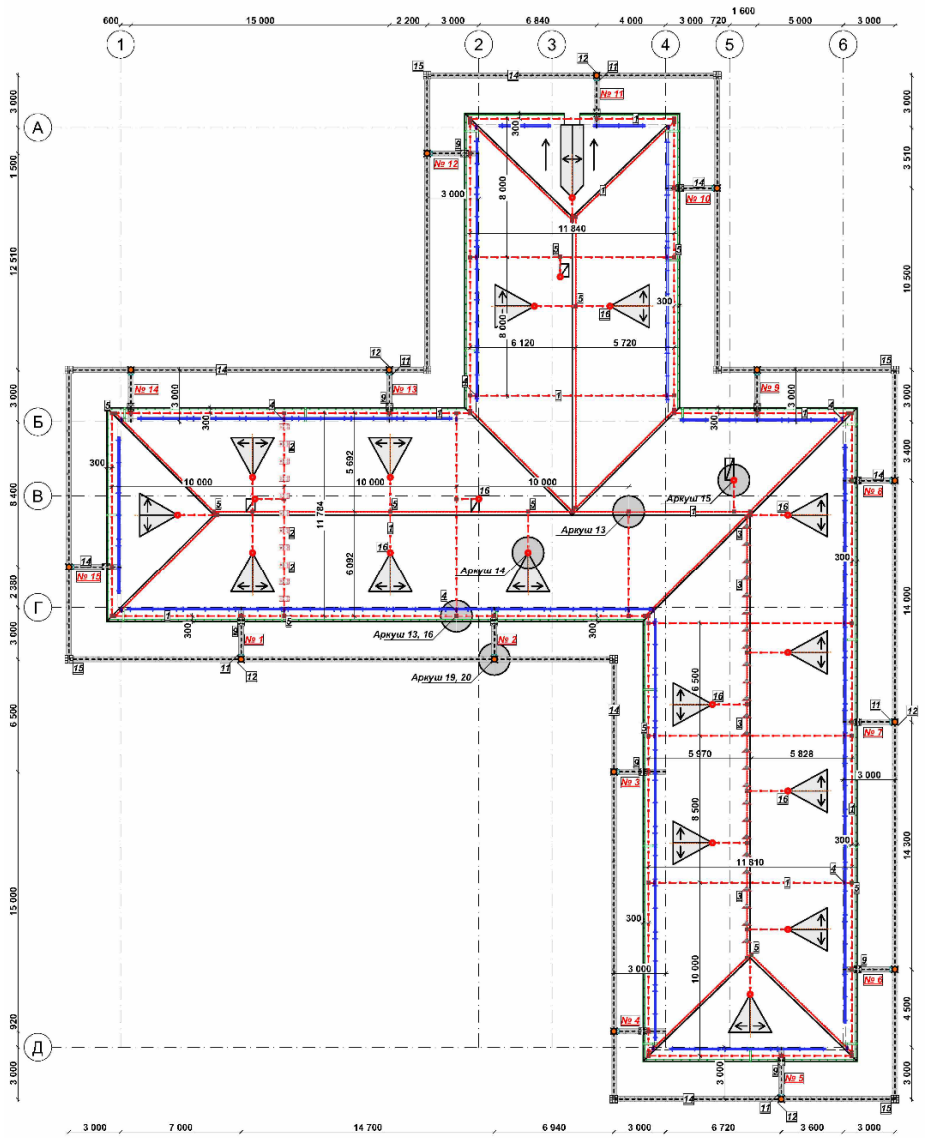


Рисунок 3 – Об'ємно-планувальне рішення будівлі ліцею

Джерело: розроблено авторами

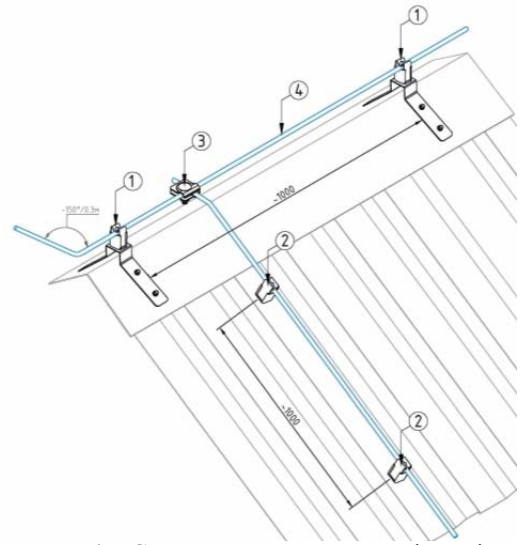


Рисунок 4 – Схема прокладання провідників по поверхні скатної покрівлі
жерело: [13]

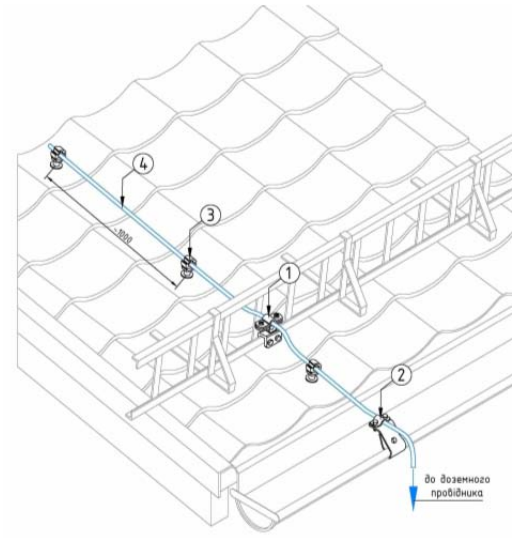


Рисунок 5 – Схема з'єднання систем зовнішнього блискавкозахисту з металоконструкціями будівлі
Джерело: [13]

Захист від вторинних дій блискавки здійснено шляхом екранування для ослаблення електромагнітних перешкод, з'єднання металевих частин для ослаблення різниці потенціалів між ними, а також заземлення для відводу струму блискавки в землю. Екранування виконується шляхом з'єднання всіх металевих конструкцій покрівлі та фасадів із системою зовнішнього блискавкозахисту, як показано на рисунку 5. Це з'єднання виконується за допомогою таких елементів: 1 – клема фальцева металева; 2 – зажим для дроту до ринви; 3 – тримач дроту пластиковий; 4 – дріт сталевий оцинкований діаметром 8 мм.

Захист від крокової напруги реалізовано шляхом улаштування закільцьованої системи з 15-ти доземних провідників, розташованих у місцях малоймовірного перебування людей з відповідними попереджувальними надписами, а також асфальтного відмощення по усьому контуру будівлі.

Висновки:

1. На території України досить часто спостерігаються ураження будівель та людей лінійними чи кульовими блискавками, які можуть викликати пожежі та руйнування будівель і споруд, а також втрату здоров'я й життя людей. Це вимагає улаштування систем блискавкозахисту, які повинні відповідати вимогам чинних норм і мінімізувати ймовірні матеріальні збитки та соціальні втрати від удару блискавки.

2. На основі чинних нормативних документів розроблений алгоритм аналізу необхідності улаштування та проєктування системи блискавкозахисту, який забезпечує раціональний вибір засобів захисту та проєктних рішень.

3. Виконаний за розробленим алгоритмом аналіз показав, що ризики небезпеки для людей та руйнування будівлі обстеженого ліцею перевищують допустимі значення і вимагають улаштування системи блискавкозахисту.

4. Запроєктована система зовнішнього блискавкозахисту будівлі ліцею, конструкція якої виконується з елементів вітчизняного виробництва та забезпечує надійний захист будівлі від блискавок.

5. Описаний алгоритм аналізу ризиків та розроблення системи блискавкозахисту може бути використаний при проєктуванні та реконструкції інших житлових і громадських будівель подібного типу.

Список літератури

1. Блискавка, взаємодія з поверхнею землі та розташованими на ній об'єктами. *Wikipedia*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Блискавка (дата звернення: 04.11.2025).
2. Сім речей, яких ви, мабуть, не знаєте про блискавку. URL: https://www.nikopoltoday.com/article-2099/ukraina-sim-recej-akih-vi-mabut-ne-znaete-pro-bliskavku (дата звернення: 04.11.2025).
3. У селі поблизу Луцька удар блискавки зруйнував будинок. URL: https://vsn.ua/news/u-seli-poblizu-lutska-udar-bliskavki-zruynuvav-budinok-31153 (дата звернення: 04.11.2025).
4. На Волині через удар блискавки горів будинок. URL: https://novosti-n.org/ua/news/Na-Volyni-cherez-udar-blyskavky-goriv-budynok-foto--319338 (дата звернення: 04.11.2025).
5. Удар блискавки в будинок у Первомайську залишив мешканців без техніки. *Thegard*. URL: https://thegard.city/articles/421564/bliskavka-v-pervomajsku (дата звернення: 04.11.2025).
6. У Бразилії блискавка вдарила в статую Христа-Спасителя. *24tv.ua*. URL: https://24tv.ua/bliskavka-vluchila-statuyu-hrista-spasitelya-video-foto-braziliyi_n2253928 (дата звернення: 04.11.2025).
7. В храм в Одесі влучила блискавка. URL: https://odessa.comments.ua/ua/article/society/developments/10889-v-hram-v-odesi-vluchila-bliskavka-scho-ce-oznachae-za-narodnimi-povir-yami.html (дата звернення: 04.11.2025).
8. Кульові блискавки в оселях українців. *RBC.UA*. URL: https://www.rbc.ua/rus/news/k-kulovi-bliskavki-narobili-liha-oselyah-1719140072.html (дата звернення: 04.11.2025).
9. ДСТУ EN 62305-1:2012. Блискавкозахист. Загальні принципи. - К. : Мінрегіон України, 2012. - 52 с.
10. ДСТУ EN 62305-2:2021. Захист від блискавки. Частина 2. Управління ризиками (EN 62305-2:2011, IDT: IEC 62305-2:2010, MOD). К. : Мінрегіон України, 2021. 74 с.
11. ДСТУ EN 62305-3:2021. Блискавкозахист. Частина 3. Фізичні пошкодження будівель і небезпека для життя (EN 62305-3:2011, IDT: IEC 62305-3:2010, MOD). К. : Мінрегіон України, 2021. 92 с.
12. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд [Чинний з 01.01.2019] : зі зміною № 1. К. : Мінрегіон України, 2022. 34 с.
13. Каталог продукції Компанії FS Lightning Protection Systems. URL: https://fs-lps.com/catalog/ (дата звернення: 04.11.2025).

References

1. Wikipedia. (n.d.). Lightning: Interaction with the Earth’s surface and objects located on it. Retrieved November 4, 2025, from https://uk.wikipedia.org/wiki/Блискавка
2. Nikopol Today. (n.d.). Seven things you probably didn’t know about lightning. Retrieved November 4, 2025, from https://www.nikopoltoday.com/article-2099/ukraina-sim-recej-akih-vi-mabut-ne-znaete-pro-bliskavku
3. VSN News. (n.d.). In a village near Lutsk, a lightning strike destroyed a house. Retrieved November 4, 2025, from https://vsn.ua/news/u-seli-poblizu-lutska-udar-bliskavki-zruynuvav-budinok-31153
4. Novosti-N. (n.d.). A house caught fire in Volyn due to a lightning strike. Retrieved November 4, 2025, from https://novosti-n.org/ua/news/Na-Volyni-cherez-udar-blyskavky-goriv-budynok-foto--319338
5. The Gard. (n.d.). A lightning strike in Pervomaisk left residents without electrical appliances. Retrieved November 4, 2025, from https://thegard.city/articles/421564/bliskavka-v-pervomajsku
6. 24tv.ua. (2024, February 13). Lightning struck the statue of Christ the Redeemer in Brazil. Retrieved November 4, 2025, from https://24tv.ua/bliskavka-vluchila-statuyu-hrista-spasitelya-video-foto-braziliyi_n2253928
7. Comments.ua. (n.d.). A lightning bolt hit a church in Odesa: What it means according to folk beliefs. Retrieved November 4, 2025, from https://odessa.comments.ua/ua/article/society/developments/10889-v-hram-v-odesi-vluchila-bliskavka-scho-ce-oznachae-za-narodnimi-povir-yami.html
8. RBC-Ukraine. (2024, June 23). *Ball lightning caused damage to homes in Ukraine.* Retrieved November 4, 2025, from https://www.rbc.ua/rus/news/k-kulovi-bliskavki-narobili-liha-oselyah-1719140072.html
9. DSTU EN 62305-1:2012. *Lightning protection. General principles*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
10. DSTU EN 62305-2:2021. *Protection against lightning. Part 2: Risk management (EN 62305-2:2011, IDT; IEC 62305-2:2010, MOD)*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
11. DSTU EN 62305-3:2021. *Lightning protection. Part 3: Physical damage to structures and life hazard (EN 62305-3:2011, IDT; IEC 62305-3:2010, MOD)*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
12. DBN V.1.2-14:2018. *Reliability and safety system of building structures. General principles for ensuring reliability and structural safety of buildings and structures* (Amendment No. 1). Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2022.
13. FS Lightning Protection Systems. (n.d.). *Product catalog.* Retrieved November 4, 2025, from https://fs-lps.com/catalog/

Vladyslav Nastoyashchiy, Prof., PhD tech. sci., **Victor Pashynskyi,** Prof., DSc., **Oleksandr Lizunkov,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Practical Experience in Designing a Lightning Protection System for a Lyceum Building

The study was carried out with the aim of demonstrating practical experience in lightning risk assessment and the design of an external lightning protection system in accordance with the requirements of current Ukrainian regulatory documents. The risk analysis and design of the lightning protection system were performed for a specific lyceum building that is currently out of operation and subject to reconstruction.

The surveyed lyceum building has a complex plan configuration with overall dimensions of 42×53 m. There is no basement. The building is a frameless structure with load-bearing exterior and interior brick walls and partitions 250–510 mm thick. The attic floor is made of precast hollow-core reinforced concrete slabs. As a result of the reconstruction, the cold roof will be made of metal tiles installed on a wooden rafter system. According to DBN B.1.2-14:2018, the facility has a responsibility class of CC2.

Calculations by the methodology of DSTU EN 62305-2:2021 showed that the risks of injury or loss of life due to electric shock, as well as the risk of physical damage to the lyceum building caused by a lightning strike, exceed permissible values. These significant risks necessitate the installation of a lightning protection system for the building.

The external lightning protection system of the lyceum building was designed in accordance with DSTU EN 62305-3:2021 requirements. It consists of a protective mesh with 15×15 m cells located on the surface of the pitched roof, down conductors, and both horizontal and vertical earthing electrodes forming a closed-loop contour. The mesh and down conductors are made of galvanised steel wire with a diameter of 8 mm. All connecting and fastening components of the lightning protection structure are manufactured using domestically produced materials.

Based on the design results, the proposed configuration of the external lightning protection system ensures reliable protection of the building against lightning strikes. The described methodology for risk analysis and system design can be applied to the design and reconstruction of other residential and public buildings of a similar type.

lightning, risks to people and buildings, lightning protection system

Одержано (Received) 07.11.2025 *Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2025*
Прийнято до друку (Approved) 30.01.2026

УДК 691.88 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).227-233

І. О. Скриннік, доц. канд. техн. наук, **М. О. Федотова,** канд. техн. наук,
В. В. Дарієнко, доц. канд. техн. наук, **В. В. Яцун,** проф. канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький Україна
e-mail: Skrynnik_2002@ukr.net

Застосування швидкотвердіючих цементних складових в бетонах при зведенні будівель та споруд на об’єктах в будівництві

У статті розглянуто сучасні підходи до створення швидкотвердіючих цементних сумішей на основі портландцементу, а також застосування таких бетоних сумішей в якості моноліту в будівництві. Проаналізовано проблеми забезпечення інтенсивного набору міцності бетону в ранні строки твердіння за умов підвищеної рухомості бетонних сумішей. Обгрунтовано доцільність застосування нанотехнологічної концепції керування структуроутворенням цементного каменю з метою регулювання кінетики гідратаційних процесів та формування щільної мікроструктури бетону.

швидкотвердіючі цементуючі системи, високофункціональні бетони, міцність бетону, портландцемент, структуроутворення

© І. О. Скриннік, М. О. Федотова, В.В. Дарієнко, В. В. Яцун, 2026

Постановка проблеми. Перспективним та технолонічним методом застосування портландцементних сумішей є впровадження нанотехнологічної концепції [6,9]. Вона ґрунтується на цілеспрямованому управлінні формуванням твердої фази шляхом введення спеціально синтезованих первинних нанорозмірних компонентів або шляхом ініціювання утворення наномасштабних структур безпосередньо в об'ємі матеріалу. Такий підхід дозволяє регулювати кінетику гідратаційних процесів, морфологію продуктів твердіння та щільність цементного каменю. Застосування наномодифікації відкриває нові можливості для створення швидкотвердіючих цементних систем, орієнтованих на одержання високофункціональних бетонних композитів із заданими експлуатаційними характеристиками. Реалізація цієї концепції сприяє зниженню матеріало та енергоємності будівельного виробництва, підвищенню довговічності та надійності будівельних конструкцій, а також забезпеченню їх ефективної роботи в різних умовах експлуатації. Для високофункціональних бетонів визначальним є забезпечення підвищених реологічних характеристик бетонних сумішей, зокрема високої рухливості, оптимальної в'язкості, стійкості до розшарування та здатності до самонівелювання у густоармованих конструкціях [3,8]. Важливим показником є також ефективне самовільне видалення бульбашок повітря, що безпосередньо впливає на щільність та міцність сформованої бетонної структури. Водночас застосування спеціальних видів цементів, зокрема лужних, безгіпсових, або глиноземистих, супроводжується необхідністю використання спеціальної сировинної бази та створення окремих технологічних ліній для помелу, зберігання і транспортування. Це суттєво підвищує їхню собівартість та обмежує можливість широкого використання у виробництві швидкотвердіючих бетонів [5,9]. Крім того, підвищений вміст високоалітових портландцементів у бетонних композиціях може призводити до зростання усадкових деформацій, а застосування традиційних добавок-прискорювачів нерідко негативно впливає на довговічність бетону та корозійну стійкість арматури.

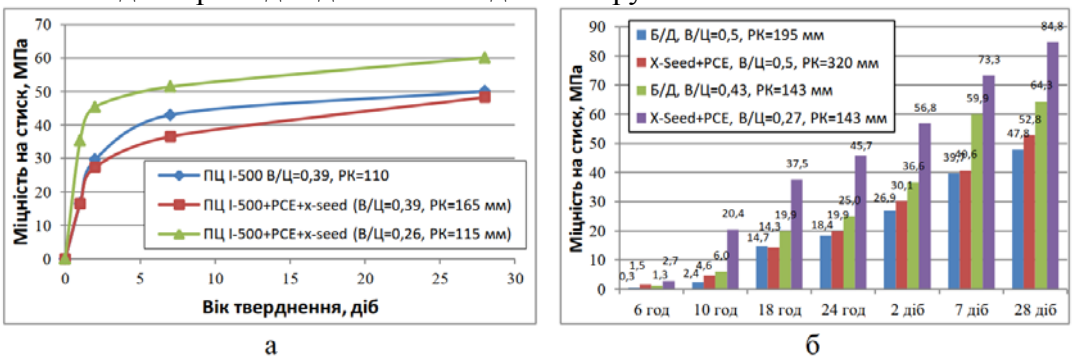
Аналіз останніх досліджень і публікацій. В традиційних будівельних технологіях на виробництві для швидкого досягнення твердості бетонної суміші досягається переважно за рахунок жорстких бетонних сумішей з низьким водоцементним співвідношенням [9], збільшення витрати портландцементу, застосування спеціальних цементів та прискорювачів тверднення або механічної активації цементу (Ю. В. Олевич, О. Р. Позняк, А. П. Горпинко, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, Л. Й. Дворкін, Т. П. Кропивницька, М. А. Саницький, І. К. Гев'юк, Т. Кропивницька, та ін [1-8]). Для високофункціональних бетонів ключовою вимогою є підвищена реологічна ефективність сумішей – оптимальна рухливість, контрольована в'язкість, стійкість до сегрегації та здатність до самовільного видалення повітря, особливо у густоармованих конструкціях. Виробництво спеціальних цементів (лужних, безгіпсових, галогенвмісних, глиноземистих) потребує суворого контролю сировинної бази та спеціалізованого обладнання, що значно підвищує їхню вартість. Тому для забезпечення високих показників ранньої та проектної міцності високофункціональних бетонів при збереженні рухливості сумішей необхідно шукати нові технічні рішення для створення швидкотвердіючих в'яжучих із покращеними експлуатаційними характеристиками. Інноваційним напрямом є модифікування структури цементних систем шляхом введення спеціально синтезованих наночастинок або формування нанометричних елементів безпосередньо в об'ємі матеріалу (М. А. Саницький, І. К. Гев'юк, Т. Кропивницька, А. П. Горпинко, Ю. В. Олевич та ін [5-8]). Аналіз швидкотвердіючих бетоних сумішей з гарними характеристиками наведеними в роботах I. Kirakevych, M. Sanytsky, O. Shyiko, R. Kagarlitskiy, T. Kropyvnytska, T. Rucińska, O. Rykhlitska, A. Volianiuk, H. Najm, P. Balaguru [10-14].

Постановка завдання. У сучасному будівництві особливе значення має скорочення строків виконання робіт при збереженні високих експлуатаційних характеристик бетонних конструкцій. Швидкотвердіючі цементні суміші дозволяють отримувати бетонні суміші з підвищеною ранньою міцністю, що забезпечує раннє навантаження конструкцій і прискорює введення об'єктів в експлуатацію. Однак застосування таких цементів у високорухливих та густоармованих бетонних сумішах пов'язане з рядом проблем: необхідністю забезпечення оптимальної структури цементного каменю, регулювання водопотреби, контролю процесів гідратації та структуроутворення, підвищення тріщиностійкості та довговічності матеріалів. Крім того, вплив наномодифікації в'яжучих систем на раннє формування міцності, реологічні властивості сумішей і структурні характеристики бетонної суміші потребує системного наукового дослідження. Таким чином, основна **задача** даного полягає у вивченні та оптимізації складів швидкотвердіючих цементних систем для високофункціональних бетонів, що дозволить:

1. Забезпечити високу ранню та проектну міцність бетонних конструкцій.
2. Оптимізувати технологічні властивості бетонних сумішей для застосування у густоармованих конструкціях.
3. Вивчити вплив модифікаторів і дисперсного армування на структуроутворення та тріщиностійкість бетонної суміші.

Виклад основного матеріалу. Теперешній стан будівництва зводиться до експлуатаційної надійності, довговічності та технологічної ефективності будівельних матеріалів [1,9]. Особливої актуальності набуває розроблення високофункціональних бетонів, здатних забезпечувати задані експлуатаційні характеристики за скорочених строків будівництва, обмежених технологічних умов та підвищених навантажень. Однією з ключових проблем при використанні високорухомих бетонних сумішей є забезпечення достатнього набору міцності в ранній період твердіння. Традиційні підходи, що ґрунтуються на застосуванні спеціальних швидкотвердіючих цементів, обмежуються їх високою вартістю, складністю виробництва та необхідністю створення окремих технологічних ліній. У зв'язку з цим актуальним напрямом є розроблення модифікованих цементуючих систем на основі портландцементу, здатних забезпечити прискорене структуроутворення без істотного ускладнення технології [6,9]. Надшвидкотверднучі цементуючі системи традиційно реалізуються шляхом використання спеціальних видів в'яжучих, таких як глиноземисті, кальційалюмосульфатні, алінітові або лужноактивовані цементи. Незважаючи на їхню ефективність, практичне застосування таких матеріалів обмежується високою собівартістю та складністю інтеграції у масове будівельне виробництво. Альтернативним напрямом є модифікація портландцементних систем за рахунок введення багатокомпонентних комплексів хімічних та мінеральних добавок, що впливають на кінетику гідратації та морфологію продуктів твердіння. Принципово новим підходом до синтезу надшвидкотверднучих цементуючих систем є впровадження нанотехнологічної концепції, яка базується на управлінні процесами формування твердої фази та порового простору на ультрамікроскопічному рівні. Це досягається застосуванням частинок та наноструктуровані добавки виконують роль активних центрів кристалізації, прискорюючи процеси гідратації клінкерних мінералів та сприяючи формуванню більш щільної й однорідної структури цементного каменю [9]. У результаті зменшується капілярна пористість, підвищується контактна міцність у зоні «цементний камінь – заповнювач» та покращуються фізико-механічні характеристики бетону. Застосування швидкотвердіючих цементих сумішей створюють передумови до отримання широкого спектра різних бетонів, зокрема високоміцних, самоущільнювальних, дисперсно-армованих та реакційно-порошкових бетонів. Такі матеріали поєднують високу рухомість бетонної суміші з інтенсивним набором міцності в ранні строки твердіння. Наномодифікація дозволяє не лише підвищити ранню та марочну міцність бетону, але й

істотно покращити його довговічність, морозостійкість, водонепроникність і тріщиностійкість [3,9]. Це особливо важливо для конструкцій, що експлуатуються в складних кліматичних та агресивних середовищах, а також для об'єктів, де необхідне скорочення строків введення в експлуатацію [3,4]. Застосування наномодифікованих швидкотвердіючих цементуючих систем на основі портландцементу дозволяє уникнути використання дефіцитних і дорогих спеціальних в'яжучих, забезпечуючи при цьому високий рівень експлуатаційних властивостей бетонів. Такий підхід сприяє зниженню матеріало та енергоємності будівельного виробництва, підвищенню економічної ефективності та екологічної доцільності будівельних технологій. Крім того, керування структуроутворенням бетону відкриває можливості цілеспрямованого проєктування матеріалів із регламентованими властивостями залежно від умов експлуатації та технологічних вимог. Проте практичне застосування таких наномодифікаторів обмежується низкою факторів, зокрема складністю забезпечення їх рівномірного розподілу в об'ємі цементної матриці через схильність до агломерації, недостатньою адгезією нанотрубок до продуктів гідратації цементу, а також зростанням собівартості бетонів. На відміну від інертних нанодобавок, ці компоненти виконують не лише функцію мікронаповнювачів, але й беруть безпосередню участь у хімічних процесах твердіння, сприяючи утворенню додаткової кількості гідросилікатів кальцію [1,9]. Саме ці сполуки є основними носіями міцності та довговічності цементної суміші визначають експлуатаційні властивості бетонних композитів. Забезпечення високої надійності та довговічності бетонних конструкцій потребує комплексного врахування сумісної дії деформаційних процесів. Особливого значення набуває аналіз механізмів зародження, розвитку та поширення тріщин з метою підвищення тріщиностійкості бетону на різних етапах його твердіння та експлуатації (див.рис.1). Для інтегрального оцінювання внеску окремих фракцій у розвиток питомої поверхні застосовано феноменологічний підхід, відповідно до методології, розробленої під керівництвом М.А. Саницького[5-8], який базується на використанні диференційного коефіцієнта поверхневої активності, що враховує як поверхневу активність частинок, так і їхній кількісний вміст у системі. На основі даних гранулометричного аналізу та оцінки поверхневої активності частинок встановлено, що навіть незначна кількість нанодисперсних компонентів забезпечує істотний внесок у формування сумарної питомої поверхні полідисперсних цементуючих систем. Підвищення дисперсності супроводжується зростанням кількості частинок в одиниці об'єму, що інтенсифікує міжчастинкову взаємодію, сприяє формуванню більш розвиненої просторової структури та, як наслідок, призводить до зростання в'язкості систем і збільшення водопотреби для досягнення однакової рухливості.



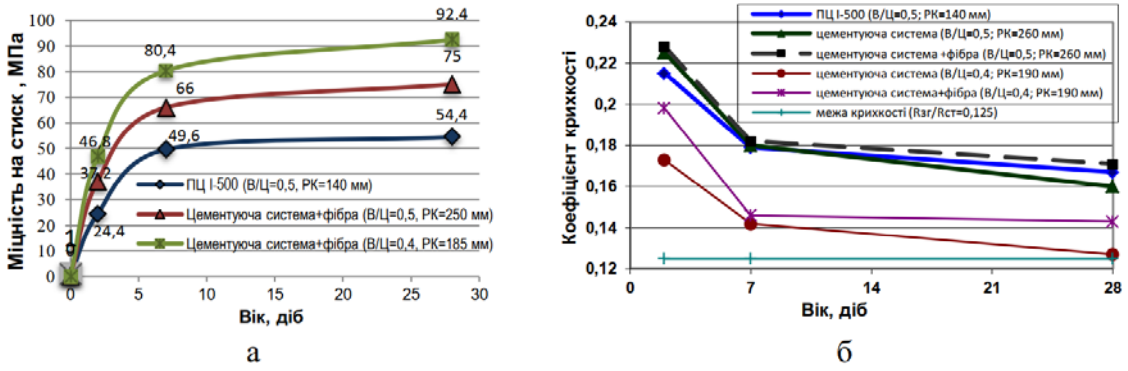
а б

а) від x1 (x3=0); б) від x2 (x1=0)

Рисунок 1 – Графіки залежності стискання портландцементних сумішей з модифікованих компонентів згідно з ДСТУ
Вік твердіння (а) та години твердіння (б)

Джерело: розроблено на підставі [1]

Експериментально встановлено [9], що водопотреба мінеральних нанодобавок, необхідна для покращення міцності цементної суміші, що дає змогу бетону мати кращу пластичність, суттєво збільшується і складає близько 65 % для метакаоліну, 93 % для мікрокремнезему та 121 % для аеросилу. Зазначені особливості обумовлюють необхідність використання високоефективних хімічних добавок для регулювання властивостей наномодифікованих систем. Підвищення технологічної ефективності наномодифікованих цементних суміщей досягається шляхом введення суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з наноспроєктованою молекулярною будовою. Завдяки їх адсорбції на поверхні нанорозмірних частинок відбувається модифікація молекулярної природи міжфазної поверхні, що забезпечує зниження пластичності цементних симішей у 2,5–5,2 раза. На підставі узагальнення результатів експериментальних досліджень сформульовано принципи композиційного проєктування бетоних сумішей за рахунок швидкотвердіючих цементних складових, орієнтованих на реалізацію технології бетонування конструкцій густоармованих безвібраційної дії. Аналіз характеристик показників міцності дозволив оптимізувати вміст мінеральних складових, зокрема застосування такого матеріалу як вапнякового наповнювача а також застосування добавок мінеральних на основі метакаоліну, що забезпечує формування стабільної структури бетонної суміші та підвищення експлуатаційних властивостей бетону (див.рис. 2).



а б

Рисунок 2 – Графіки залежності стискання (а) тріщиностійкості коефіцієнт (б) суміш цементуюча

Джерело: розроблено на підставі [1]

Використання таких матеріалів є перспективним напрямом для сучасного будівництва, що забезпечує скорочення строків зведення споруд та підвищення ефективності будівельного виробництва.

Висновки.

1. В результаті проведеного аналізу та досліджень виконано обгрунтування доцільність застосування нанотехнологічної концепції для створення швидкотвердіючих цементних сумішей на основі портландцементу.

2. Доведено, що модифікація дозволяє ефективно керувати кінетикою гідратації та процесами раннього структуроутворення цементного каменю.

3. Визначено, що високофункціональні суміші бетоні створені за рахунок модифікованих сумішей є підвищеними показниками ранньої та марочної міцності, довговічності та експлуатаційної надійності бетонів.

4. Встановлено, що міцність бетону, що тужавів 1 добу за нормальних умов і мав вміст модифікаторів, прогріваючи бетон до 190 °С, зростає у 2,3 рази зрівнюючи з контрольним зразком без домішок. Зростання межі міцності через 2 доби тужавлення і прогрівання до 190 °С складає 46,3%, а вже через 7 діб – складає 12,7%. При

підвищенні температури до 340 °С межа міцності такого бетону, що тужавів 2 та 7 діб, відповідно збільшилась і склала 121,2 та 129,3 МПа.

Список літератури

1. Позняк О. Р., Мазурак О. Т., Марущак У. Д. Особливості процесів гідратації портландцементних систем з модифікаторами на основі полікарбоксилатів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2008. № 609. С. 310–314.
2. Кіракевич І. І., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Дрібнозернисті самоущільнювальні бетони для дорожньо-ремонтних робіт. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.* 2010. № 38. С. 333–338.
3. Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія. Рівне : НУВГП, 2017, 331 с.
4. Кропивницька Т. П., Саницький М. А., Гев'юк І. М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони : монографія. Львів : Простір-М, 2021, 194 с.
5. Саницький М., Кропивницька Т., Гев'юк І., Горпинко А. Високоякісні швидкотверднучі портландцементи виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент». *Будівельні матеріали та вироби*. 2018, №1-2(97), С. 34–37.
6. Марущак У. Д., Олевич Ю. В. Модифіковані бетони для енергоефективних технологій збірного залізобетону. *Актуальні задачі сучасних технологій* : збірник 34 тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Т. 1. Тернопіль. 2017. С. 138–139
7. Позняк О. Р., Саницький М. А., Марущак У. Д., Кіракевич І. І.. Дрібнозернисті самоущільнювальні бетони в монолітному будівництві. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка : наук.-техн. зб.* Київ : Знання, 2010. Вип. 35. С. 78–83.
8. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2013. 236 с.
9. Марущак У.Д. Наномодифіковані надшвидкотвердіючі цементуючі системи та високофункціональні бетони на їх основі: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 Львів, 2019. 432 с.
10. Kirakevych I., Sanytsky M., Shyiko O., Kagarlitskiy R. Modification of cementitious matrix of rapid-hardening high-performance concretes . *JTBP*. 2021. Vol. 3, №1, S. 79–84.
11. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucińska T., Rykhlitska O. Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6 No.6 (102), С. 38–48.
12. Volianiuk A., Kropyvnytska T. Development of rapid-hardening high-strength fiber-reinforced concrete with increased impact resistance . *Journal of Theory and Practice of Construction.* 2025. Vol. 7, №2, С. 83–88.
13. Elfakhrany, M.H., Zamrawi, A., Ibrahim, W. *et al.* Experimental study on the mechanical properties and structural performance of the rapid hardening concrete. *J. Eng. Appl. Sci.* **71**, 74 (2024). https://doi.org/10.1186/s44147-024-00410-0
14. Najm H., Balaguru P. Rapid Hardening Concrete Mixes . *Journal of Materials in Civil Engineering,* ASCE . 2005.

References

1. Pozniak, O. R., Mazurak, O. T., & Marushchak, U. D. (2008). Peculiarities of hydration processes of Portland cement systems with polycarboxylate-based modifiers. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika» : Khimiia, tekhnolohiia rechovyn ta yikh zastosuvannia*, 609, 310–314 [in Ukrainian].
2. Kirakevych, I. I., Pozniak, O. R., & Marushchak, U. D. (2010). Fine-grained self-compacting concrete for road repair works . *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury,* 38, 333–338 [in Ukrainian].
3. Dvorkin L. Y., Babych Ye. M., Zhytkovskyi V. V. (2017). *High-strength rapid-hardening concretes and fiber-reinforced concretes*. Rivne : NUVHP 314 [in Ukrainian].
4. Kropyvnytska, T. P., Sanytskyi, M. A., & Heviuk, I. M. (2021). *Rapid-hardening clinker-efficient cements and concretes*. Lviv : Prostir-M [in Ukrainian].
5. Sanytskyi, M., Kropyvnytska, T., Heviuk, I., & Horpynko, A. (2018). Vysokoiakisni shvydkotverdnuchi portlandtsementy vyrobnytstva PrAT «Ivano-Frankivsktsement». *Budivelni materialy ta vyroby*, 1-2(97), 34–37. [in Ukrainian].
6. Marushchak, U. D., & Olevych, Yu. V. (2017). Modified concretes for energy-efficient precast concrete technologies. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii* : zbirnyk 34 tez dopovidei VI Mizhnarodnoi

naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv (pp. 138–139). Vol. 1. Ternopil [in Ukrainian].
7. Pozniak, O. R., Sanytskyi, M. A., Marushchak, U. D., & Kirakevych, I. I. (2010). Dribnozernysti samoushchilniuvalni betony v monolitnomu budivnytstvi. *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika : nauk.-tekhn. zb.* Kyiv : Znannia, 35, 78–83 [in Ukrainian].
8. Sanytskyi, M. A., Pozniak, O. R., & Marushchak, U. D. (2013). *Energy-saving technologies in construction*. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky. [in Ukrainian].
9. Marushchak, U.D. (2019). *Nanomodified ultra-fast-hardening cementitious systems and high-performance concretes based on them* . Candidate's thesis. Lviv [in Ukrainian].
10. Kirakevych, I., Sanytsky, M., Shyiko, O., & Kagarlitskiy, R. (2021). Modification of cementitious matrix of rapid-hardening high-performance concretes . *JTBP*, Vol. 3, №1, P. 79–84.
11. Kropyvnytska, T., Sanytsky, M., Rucińska, T., & Rykhlitska, O. (2019). Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6, No.6 (102), P. 38–48.
12. Volianiuk, A., & Kropyvnytska, T. (2025). Development of rapid-hardening high-strength fiber-reinforced concrete with increased impact resistance . *Journal of Theory and Practice of Construction.* Vol. 7, №2, P. 83–88.
13. Elfakhrany, M.H., Zamrawi, A., Ibrahim, W. *et al.* (2024). Experimental study on the mechanical properties and structural performance of the rapid hardening concrete. *J. Eng. Appl. Sci.* 71, 74https://doi.org/10.1186/s44147-024-00410-0
14. Najm, H., & Balaguru, P. (2005). Rapid Hardening Concrete Mixes Journal of Materials in Civil Engineering, *ASCE* .

Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova,** PhD tech. sci., **Viktor Darienko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Yatsun,** Profes., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The use of Rapid-Hardening Cement Components in Concrete During the Construction of Buildings and Structures at Construction Sites

The article considers modern approaches to the creation of nanomodified ultra-fast-hardening cementing systems based on Portland cement and high-performance concretes based on them. The problems of ensuring intensive strength gain of concrete in the early stages of hardening under conditions of increased mobility of concrete mixtures are analyzed. The feasibility of using the nanotechnological concept of controlling the structure formation of cement stone in order to regulate the kinetics of hydration processes and form a dense microstructure of concrete is substantiated.

It has been shown that the use of nanomodifiers allows for the production of highly functional concretes with increased strength, durability, and operational reliability without the need to use special types of cements. The modern development of construction technologies is accompanied by increasing requirements for manufacturability, functional efficiency, durability and operational reliability of building materials. In these conditions, highly functional concretes, made from highly mobile concrete mixtures and characterized by regulated construction and technical properties, acquire special importance. One of the key requirements for such materials is to ensure intensive strength gain of concrete in the early hardening period, especially when using concrete mixtures with increased mobility.

This necessitates the use of ultra-rapid-hardening cements or cementing systems capable of providing accelerated development of the structure and formation of the bearing capacity of the material at the initial stages of hardening. In this regard, a relevant direction is the development of modified ultra-rapid-hardening cementing systems based on Portland cement clinker, which can be integrated into traditional technological schemes for concrete production.

fine-grained concrete, hydraulic structures, waterproofing, frost resistance, durability, modified concretes

Одержано (Received) 16.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 10.03.2026

UDK 699.86:620.9 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).234-244

Stanislav Dzhyrma, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Pashynskyi,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Perun**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: stas55871@ukr.net

Technological Solutions for Increasing the Energy Efficiency of Windows in new Construction and Housing Stock Reconstruction

The article considers the problem of increasing the energy efficiency of translucent enclosing structures of residential buildings. Based on computer modeling of temperature fields in the THERM software package, the influence of the geometric parameters of the windows (exterior window trim, the window's position in a wall cross-section) on the thermal performance of the junction is analysed. The effectiveness of using traditional brick exterior casing in new construction is studied and technological solutions are proposed for the reconstruction of existing housing using polystyrene foam exterior casing. The optimal position of a window in a cavity wall is determined to avoid moisture condensation and minimize the possibility of the cold bridges formation.
energy efficiency, window junction, temperature fields, cold bridge, isotherm, THERM, reconstruction, dew point

Problem formulation. Construction is one of the most energy-intensive sectors of the economy, which makes it necessary the implementation of strict requirements for energy saving at the design stage. Determining and further minimising heat loss in buildings is an important area of scientific research and practical development today. One of the most vulnerable elements of a building's thermal insulation is translucent structures, through which 20% to 30% of thermal energy is lost. At the same time, a significant part of these losses occurs through the areas of connection between windows and wall structures, as well as through the window jambs [1].

Modern regulatory requirements set high standards for the heat transfer resistance of enclosing structures. The practical implementation of these standards is often complicated by an insufficient level of research into the design features of junctions, which leads to a decrease in the energy efficiency of the building.

Analysis of recent research and publications. The theoretical foundation of thermal physics in construction is based on the works of the classics of science, which formed the basis for modern standardisation of thermal insulation. A significant contribution to the development of methods for calculating energy efficiency and adapting the Ukrainian regulatory framework to European standards was made by such Ukrainian scientists as G. Fareniuk, M. Tymofeyev, E. Fareniuk, L. Chernykh, M. Savitskyi and others [2-6]. Their research allowed us to develop methods for assessing heat loss, determining the thickness of insulation, and the required values for energy efficiency indicators of buildings.

However, general methods often consider wall structures as homogeneous elements and do not always take into account the specifics of the building structures junctions.

The issues of increasing the thermal reliability of window junctions are addressed in the works of W. Maref, A. Stolarska, C. Misiopecki, V. Pashynskyi, S. Dzhyrma and other researchers [7-12]. Their works consider the problems of window nodes sealing, the influence

© Stanislav Dzhyrma, Mykola Pashynskyi, Serhii Perun, 2026

of the position of the window in a cavity wall on the thermal regime of the junction, and methods for eliminating cold bridges in buildings. In particular, in works [9-11] it is proven that shifting the window block inside the building wall increase it's thermal efficiency, and the temperature on the surface of the inner jamb.

Foreign research experience confirms the importance of the geometry of the mounting unit. Studies by C. Misiopecki (Norway) [9] using thermal modeling have shown that the position of the window has a significant impact on the linear heat transfer coefficient, and for different types of walls there are optimal zones for installing windows. The work [9] presents the results of modeling, which demonstrate that the correct positioning of the window can reduce linear heat loss by more than 50%. The researcher W. Maref (Canada) [7] in his works focuses on the risks of moisture condensation in the places where windows adjoin, assessing them using full-scale tests and numerical modeling.

In a significant number of publications, most of the research is focused on the thermal characteristics of the double-glazed windows themselves (K-glass, I-glass, argon filling) and on the general insulation of facades. The issue of the complex influence of the geometry of the window opening, namely the presence or absence of the window casing and it's material (brick or polystyrene foam), on the temperature characteristics of the junction in the reconstruction of the housing stock of Ukraine conditions has not been sufficiently studied.

Most of the existing scientific works concern either new construction or complete thermal modernisation of the facade, consider standard solutions, while during reconstruction there is often a need to create artificial window casing.

Technological solutions for partial modernisation of openings are insufficiently developed, when complete insulation of the facade is impossible. The issue of the absence of a window casing, the replacement of a "cold" brick casing with a "warm" polystyrene foam casing and the simultaneous shift of the window block towards the room has not been studied sufficiently. The impact of the listed constructive and technological solutions on the thermal reliability of the junction requires a detailed study of temperature fields using computer modeling (FEM analysis) and modern software like the THERM software package [13].

Setting the task. The main heat losses through the so-called "cold bridges" occur in cases where materials with different thermal conductivity are joined or the enclosing structures change their geometric shape. In the window installation area, the wall configuration changes, which leads to a decrease in heat transfer resistance. The wall, the installation seam and the window block are made of materials that have different thermal conductivity indicators. All these circumstances create unfavoruable conditions for the stability of the temperature regime in the window installation area. As a result, additional heat losses appear in the joint area and on the jamb, which are especially noticeable in the cold season.

Isotherms (lines connecting points with the same temperature) allow for a fairly accurate assessment of temperature fluctuations in various structural elements and in the installation node areas.

Depending on the material in the wall structure, the course of the isotherms changes, which show the temperature in the thickness of the wall. When approaching the window, the parallel isotherms bend towards the outer surface and pass into the plane of the mounting seam and frame [14] (Fig. 1).

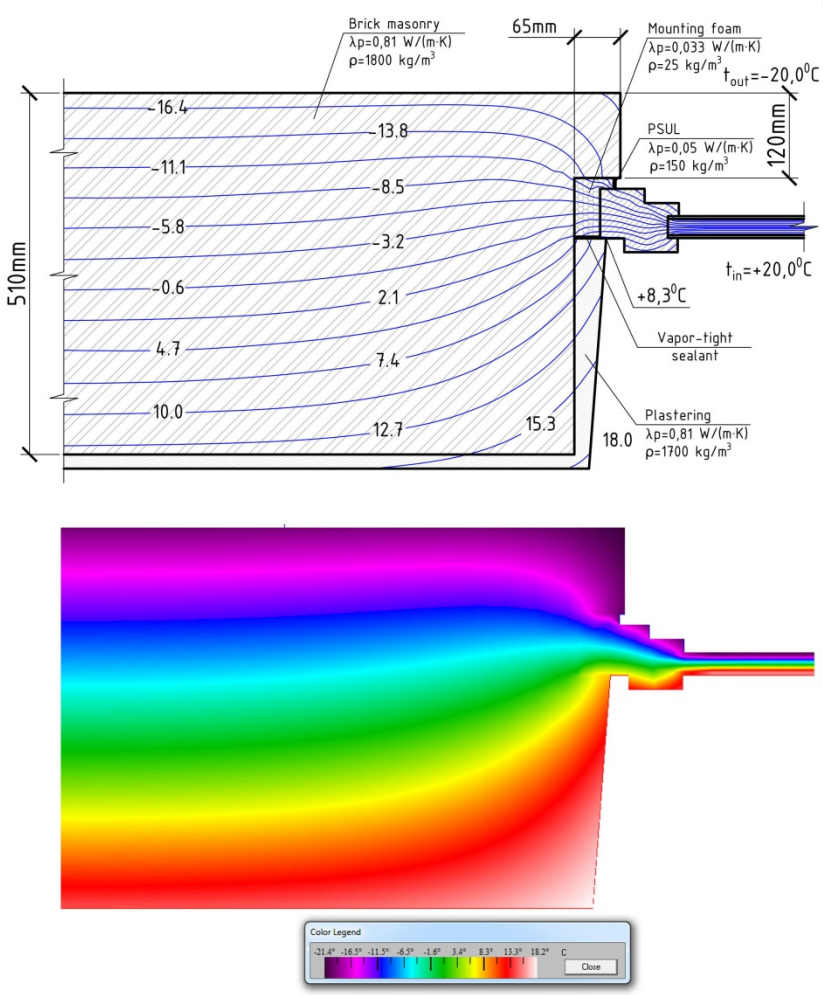


Figure 1 – Temperature distribution in a solid brick wall and window junction

Source: developed by the authors

Of particular importance is the isotherm 10.0°C, which is used to determine the so-called "dew point". This indicator is the main one for assessing the prevention of condensation and moisture formation inside and outside wall, window structures and junctions.

The choice of this isotherm is not accidental. According to the standards [15], to prevent the formation of condensate and moisture, the temperature on the inner surface of the structure under design conditions (20.0°C and relative humidity 50-55%) should not fall below the dew point, which is approximately +10.0°C.

Provided that the temperature isotherm +10.0°C passes within the enclosing structure and the installation joint zone, the process of water vapor condensation in the specified area does not occur. This, in turn, prevents the formation of local freezing zones and reduces heat loss. The maximally smoothed configuration of the isotherm +10.0°C and its remote location from the inner surface of the enclosure contributes to the stabilisation of the temperature regime in the junction zone. This can be achieved by shifting the window block towards the interior of the building, which allows reducing the intensity of heat losses in the installation zone. As a result, the overall energy efficiency of the enclosing system increases and the operational characteristics of translucent structures improve. The feasibility of such a constructive solution is confirmed by the results of numerical modeling and experimental studies presented in the works [10-12].

During the Soviet construction practice, window casings in brick walls (the so-called "window quarters") was necessarily made and had standard dimensions of 120x65 mm. They played an important role in protecting the junction between the window and the wall from the influence of external weather factors: rain, wind, snow and solar radiation. Even in multi-storey residential buildings, concrete panels and blocks were manufactured in factories with ready-made "quarters". Thanks to this, the junction of the window and the wall received additional heat-technical and waterproofing properties, which contributed to increasing the energy efficiency of the premises.

Today, buildings with window openings without quarters are quite common. The absence of this structural detail is explained by several factors: an increase in the area of natural lighting of the premises, improved aesthetic visualisation of facades, as well as the use of modern building materials that allow for reliable connection of windows with the wall.

In existing buildings (secondary real estate market) and often in new construction, the influence of the geometric parameters of the junction and the location of the window block on thermal fields is not taken into account.

The absence of a constructive casing or incorrect location of the window block within the thickness of the cavity wall leads to a decrease in the thermal properties of the junction. Under such conditions, the temperature of the inner surface of the window jamb decreases to values lower than the "dew point" temperature (+10.0°C), which causes the surface of the jamb and the installation joint zone to become humid. The accumulation of moisture leads to a decrease in the effective protection of the node materials, the emergence of zones of intense heat flow ("cold bridges") and creates conditions for periodic freezing of the enclosing structure. As a result, the heat-shielding characteristics of the window casing deteriorate and the energy efficiency of external enclosing structures decreases.

The purpose of the article is to substantiate effective technological solutions for window arrangement through computer modeling. The study is aimed at determining the optimal configuration of the opening (using a "quarter"), the depth of the window installation for new construction, as well as developing recommendations for the use of thermal inserts as a casing and insulation of the external jamb during the reconstruction of buildings.

Presentation of the main material. The study object is the junction of the metal-plastic window (profile system with a thickness of 70 mm) to the external load-bearing wall of the building, which is made of solid ceramic brick (density $\rho = 1800$ kg/m^3). The thickness of the masonry is 510 mm (two bricks). The THERM software package [13] was used to conduct numerical experiments, which is based on the finite element method and allows modeling two-dimensional heat transfer fields of building structures.

Boundary conditions of the conducted studies. The design parameters were taken for the 1st temperature zone of Ukraine (Kropyvnytskyi city) [2]. According to [15], the indoor air temperature: $t_{in} = +20.0$°C, the outdoor air temperature: $t_{out} = -22.0$°C. Relative humidity: 50-55%. "Dew point" temperature (critical condensation temperature): $t = +10.0$°C. The study was conducted through a series of calculations with varying the depth of window installation from 120 mm to 270 mm from the facade surface of the wall in increments of 15 mm.

At the first stage, two variants of the window frame design were studied:

Variant 1 - straight opening (without a casing): a solution for many types of modern masonry or panel construction;

Variant 2 - opening with a brick casing: a classic solution with a size of 120x65 mm.

For both variants, the initial position of the window is determined at a distance of 120 mm from the outer surface of the wall. The shift of the window block in the direction of the room is planned in increments of 15 mm, which allows analysing the influence of the

installation position of the window on the thermal insulation properties of the entire "wall-nodes-window" system.

The simulation results (option 1) presented in Fig. 2 for a straight opening (without a casing) showed that when installing a window at a standard distance of 120 mm from the facade of the wall, the temperature in the inner corner of the jamb is only +7.7°C. This value is significantly lower than the "dew point" (+10.0°C). Temperature fields visualisation demonstrates that the isotherms in this case are sharply curved, approaching the surface of the outer jamb and the isotherm (+10.0°C) is located from the facade of the wall outside the junction point and the window block. This creates a zone of guaranteed condensation and, as a result, freezing and the formation of a "cold bridge". Even high-quality sealing of the installation joint is not able to compensate for the freezing of the wall around the window frame.

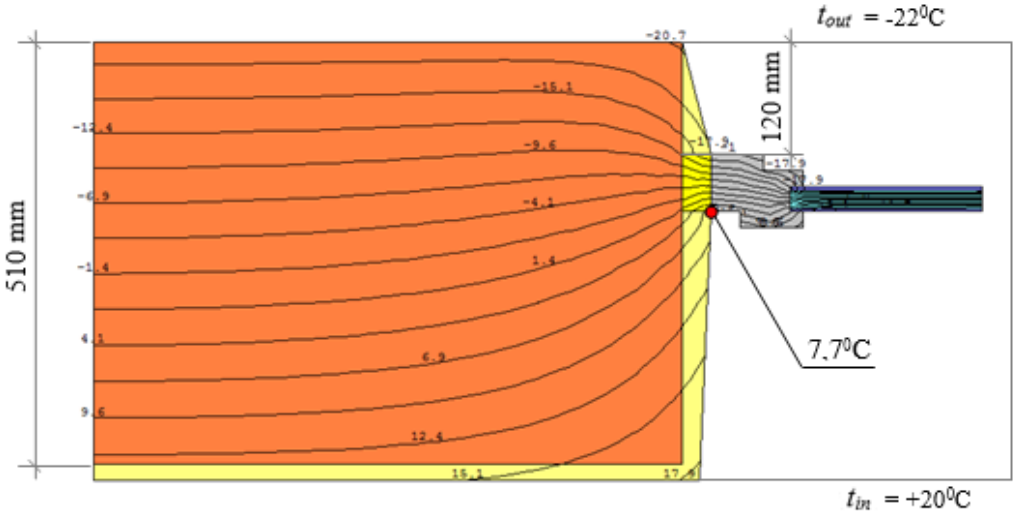


Figure 2 – Temperature distribution in the wall and in the window nodes area without a casing in a brick wall (the window is located at a distance of 120 mm from the facade surface of the wall)
Source: developed by the authors

The use of a brick casing (option 2) changes the picture of thermal fields for the better. Under the same conditions (distance 120 mm from the facade surface), the temperature on the inner jamb increases to +8.3°C (Fig. 3).

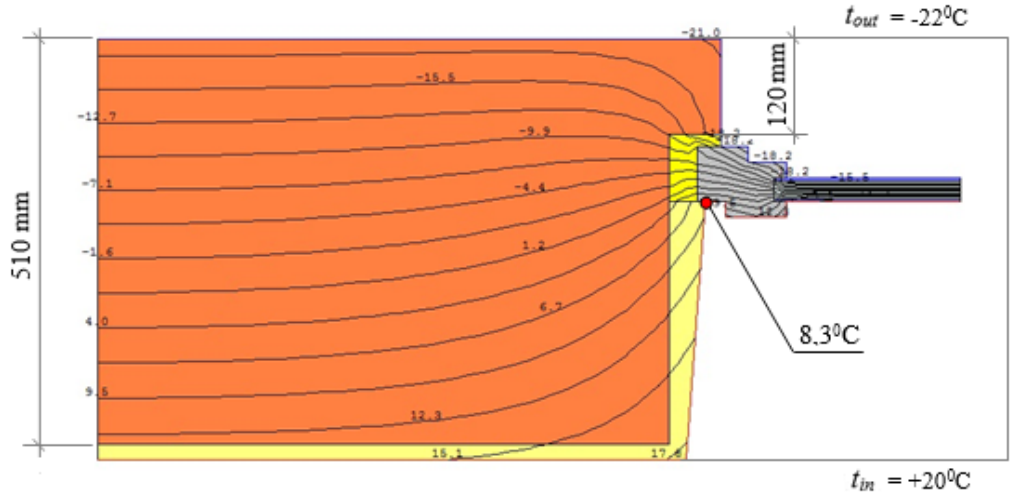
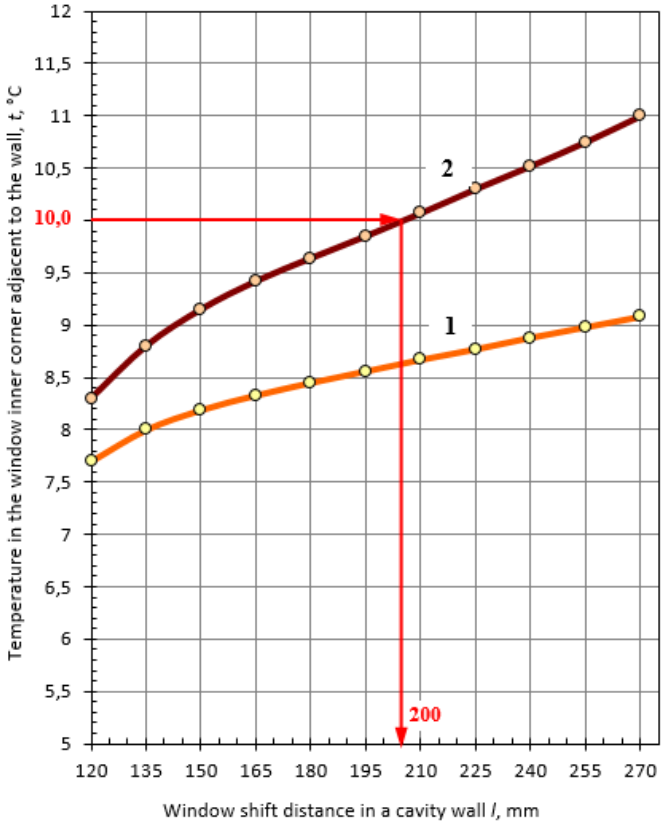


Figure 3 – Temperature distribution in the wall and in the area where the window adjoins the wall with in a brick wall with a casing (the window block is located at a distance of 120 mm from the facade surface of the wall)
Source: developed by the authors

This value is still insufficient to exceed the "dew point" value (+10°C). However, the presence of a casing allowed to increase the temperature in the inner corner of the window frame to the wall, since this zone is potentially critical in terms of the formation of cold bridges and moisture condensation. The increase in temperature can be explained by the fact that the presence of a casing creates an additional barrier to heat loss, protects the installation seam from cold air and atmospheric influences.

As part of the study, 12 numerical calculations were carried out in the THERM program for each of the study options. Different locations of the window at a distance of 120 to 270 mm from the outer surface of the wall with a window block shift step of 15 mm were taken into account.

Based on the obtained research results, a graphical dependence was compiled for two variants of window configurations and different positions of the window block, demonstrating the temperature change in the inner corner of the window junction depending on the depth of its installation in the cavity wall. For each variant, corresponding curves were constructed separately (Fig. 4), which makes it possible to assess the thermal conditions and the nature of the temperature fields distribution at the junction.



1 – window without casing; 2 – window with a 120x65 mm brick casing

Figure 4 – Graphical dependences demonstrating the temperature change in the inner corner of a window depending on the depth of its installation in the brick wall cavity

Source: developed by the authors

Analysis of temperature change graphs (Fig. 4) allowed to establish a clear correlation: shifting the window block into the room (into a warmer zone of the wall) linearly increases the temperature of the internal jamb. For a brick wall with a casing, the optimal installation depth is determined to be 200-210 mm. With this arrangement, the +10°C isotherm shifts

inside the structure, and the jamb surface temperature reaches safe values, which makes it impossible to form moisture and eliminates the possibility of freezing of the window junction.

A significant part of the existing houses has windows without casing or with destroyed external jambs. The formation of a new brick casing during reconstruction is a labor-intensive process that requires special work to connect the brick casing with the main mass of the masonry and loads the facade.

As an alternative, a technological solution with the formation of an artificial casing from an effective insulation of expanded polystyrene (EPS) (option 3) is proposed, which involves the installation of an EPS casing measuring 120x65 mm, instead of a classic brick one. This technological solution does not cause difficulties, since the expanded polystyrene casing is not difficult to manufacture and it is easily glued and fastened using special dowels to the brick side surface of the window.

The study of the windows with an EPS casing was carried out similarly to previous studies with similar conditions (Fig. 5).

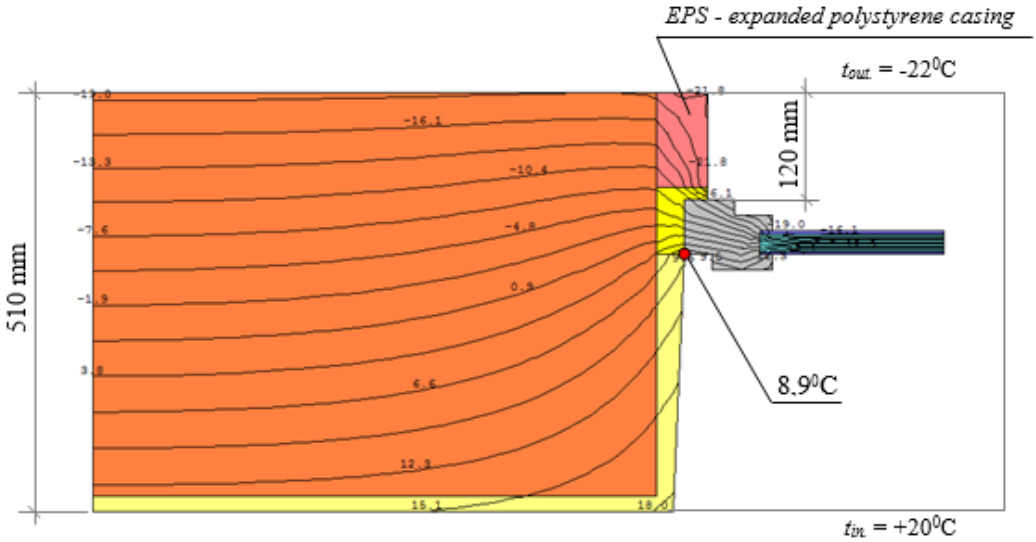


Figure 5 – Temperature distribution in the brick wall and window junction, with a polystyrene foam casing measuring 120x65 mm (the window is located at a distance of 120 mm from the facade surface of the wall)
Source: developed by the authors

Comparison of modeling results revealed the advantage of the method with the EPS casing in the window opening. At the same installation depth (120 mm from the facade surface of the wall), the brick casing provides a jamb temperature of +8.3°C, and the EPS casing provides a jamb temperature of +8.9°C.

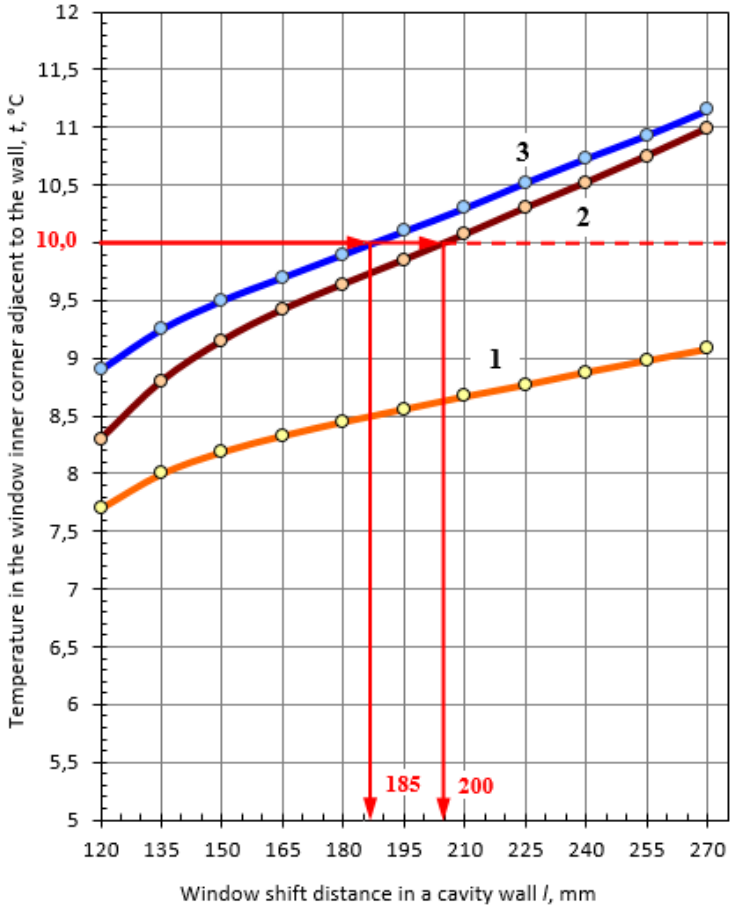
This is explained by the fact that polystyrene foam has a significantly lower thermal conductivity coefficient compared to brick, playing the role of a thermal break that cuts off the cold bridge along the perimeter of the window.

Similar numerical studies of thermal fields were conducted for different window locations at a distance of 120 to 270 mm for window blocks installed in openings with an EPS casing. When the window is shifted, the external jamb is mandatory insulated, which can be performed using a thermal insert (for example, polystyrene foam). The conditions are similar to previous studies.

Thus, during thermal modernisation of old buildings, the arrangement of window casing with polystyrene foam and external jamb insulation is a technological measure for restoring the geometry and an effective way to increase the energy efficiency of the building.

The summarized research diagram (Fig. 6) allows to draw the following conclusions and demonstrates three variants of the behavior of the temperature field at the window junction with the wall.

Curve 1 (window block without a casing) has the worst performance. All temperatures are less than the "dew point" (+10°C). Even a deep shift of the window (to the maximum possible distance), without additional insulation of the external jamb does not guarantee the absence of condensation and the probability of freezing of the junction is quite high.



1 – window block made without casing; 2 – window block with a brick casing of 120x65 mm; 3 – window block equipped with a polystyrene foam casing (120x65 mm)

Figure 6 – Graphical dependences demonstrating the change in temperature at the inner corner of the window structure depending on the depth of its installation in the cavity of a brick wall

Source: developed by the authors

Curve 2 (window block with a brick casing) and curve 3 (window block with an EPS casing) show similar dynamics, but the option with an EPS casing consistently shows higher temperatures (by 0.7-0.5°C) in the junction zone.

A good level of energy efficiency is achieved with a comprehensive solution, a combination of two factors, the optimal depth of the window in a cavity wall (260 mm) and the installation of a "warm" casing made of expanded polystyrene. In this case, the temperature of the junction rises to +11.0°C, which is a safety margin relative to the dew point (+10.0°C). This completely eliminates the risk of moisture condensation, freezing and the formation of a "cold bridge" even when the humidity in the room rises above the standard 55%.

Conclusions. Designing window openings in brick walls without casing for new construction is an erroneous decision from the point of view of thermophysics. It is recommended to install brick casing and shift the window block to a depth of 200-220 mm from the outer (facade) surface of the wall, which corresponds approximately to the middle of the brick wall structure with a thickness of 510 mm (two rows of bricks). This ensures that the +10°C isotherm is located inside the enclosing structures and indicates optimal thermal conditions for the operation of the junctions.

During reconstruction, the most effective technological solution for the modernisation of windows in existing residential buildings is the installation of artificial casing made of expanded polystyrene. This solution allows to restore the architectural appearance of the facades and provides better thermal performance of the window junction (+8.9°C as opposed to +8.3°C in the brick version with the classic location of the window right behind the casing) and to ensure a temperature in the junction of 11.0°C by installing the window in the zone of positive temperatures at a distance of 260-265 mm from the outer surface of the wall.

The implementation of the proposed technological and design solutions allows to significantly reduce the likelihood of the "cold bridges" formation that occur along the perimeter of the window, minimize heat losses through the assembly unit and, accordingly, increase the overall level of energy efficiency of buildings, which meets modern requirements for reducing energy consumption.

List of References

1. Вплив положення віконних блоків по товщині стіни на теплотехнічні характеристики вузла їх примикання / Пашинський В.А., Настоящий В.А., Джирма С.О. та ін. *Sciences of Europe. Global Science Center LP.* 2017. Вип. 3, №21. С. 8-13.
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Київ, 2022. 23 с.
3. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. [Чинний від 2023-03-01]. Київ, 2022. 60 с. (Національний стандарт України).
4. ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014. Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків. [Чинний від 2015-10-01]. Київ, 2014. 67 с.
5. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. [Чинний від 2023-03-01]. Київ, 2023. 153 с.
6. Фаренюк Є. Г. Тепловий режим світлопрозорих огороджувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель: дис. … д-ра техн. наук : 05.23.01 / НУВГП. Рівне, 2015. 172 с.
7. Maref W., Van Den Bossche N., Armstrong M., Lacasse M., Elmahdy H., Glazer R. Condensation risk assessment on box windows: The effect of the window-wall interface // *Journal of Building Physics.* 2012. Vol. 36. P. 35–55. DOI: 10.1177/1744259111411653.
8. Stolarska A., Strzałkowski J., Garbalińska H. Using CFD software for the evaluation of hygrothermal conditions at wall-window perimeters . *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 415. P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/415/1/012046.
9. Misiopecki C., Bouquin M., Gustavsen A., Jelle B. P. Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position . *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 158. P. 1079–1086. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.021..
10. Kariuk A., Rubel V., Pashynskyi V., Dzhyrma S. Improvement of residential buildings walls operation thermal mode . *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations (ICBI 2019).* Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 73. P. 75–81. DOI: 10.1007/978-3-030-42939-3_9.
11. Pashynskyi M., Dzhyrma S., Pashynskyi V., Nastoyashchiy V. Providing the thermal reliability of window junctions during the thermal modernization of civil buildings // *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2020. № 21. P. 45–54. DOI: 10.13167/2020.21.4.
12. Пашинський В.А., Пашинський М.В., Джирма С.О. Імовірнісний аналіз теплової надійності вузлів цегляних стін житлових будівель. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2022. Вип. 5(36). С. 137-145.
13. Windows and Daylighting Berkeley Lab: THERM Version 7.8.80. URL: https://windows.lbl.gov/therm-software-downloads (дата звернення 17.12.2025).

14. Тукало О. С., Джирма С. О. Дослідження впливу положення вікон з ПВХ в товщі стін на тепловтрати існуючих житлових будівель вторинного ринку нерухомості в м. Кіровоград. *Досвід впровадження у навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій:* зб. тез доповідей IV Всеукраїнського студ. наук.-практ. сем., 27-28 жовтня 2016 р. Кіровоград: КНТУ, 2016. С. 59-66.
15. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-11-01]. Київ, 2011. 131 с.

References

1. Pashynskyi, V. A., et al. (2017). Influence of the position of window blocks within the wall thickness on the thermal performance of their junctions. *Sciences of Europe*, 3(21), 8-13.
2. State Building Codes of Ukraine. (2022). DBN V.2.6-31:2021. *Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
3. State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality". (2022). DSTU 9191:2022. *Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation material for building insulation*. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
4. State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality". (2014). DSTU-N B V.3.2-3:2014. *Guidelines for the implementation of thermal modernization of residential buildings*. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
5. State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality". (2022). DSTU 9190:2022. *Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting, and domestic hot water*. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].
6. Farenyuk, Ye. H. (2015). *Thermal regime of translucent building envelope structures of modern multi-storey buildings* (Doctoral dissertation, National University of Water and Environmental Engineering). Rivne, Ukraine [in Ukrainian].
7. Maref, W., Van Den Bossche, N., Armstrong, M., Lacasse, M., Elmahdy, H., & Glazer, R. (2012). Condensation risk assessment on box windows: The effect of the window–wall interface. *Journal of Building Physics*, 36(1), 35–55. https://doi.org/10.1177/1744259111411653
8. Stolarska, A., Strzałkowski, J., & Garbalińska, H. (2018). Using CFD software for the evaluation of hygrothermal conditions at wall–window perimeters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 415*, 012046. https://doi.org/10.1088/1757-899X/415/1/012046
9. Misiopecki, C., Bouquin, M., Gustavsen, A., & Jelle, B. P. (2018). Thermal modeling and investigation of the most energy-efficient window position. *Energy and Buildings, 158*, 1079–1086. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.021
10. Kariuk, A., Rubel, V., Pashynskyi, V., & Dzhyrma, S. (2020). Improvement of residential buildings walls operation thermal mode. In V. Onyshchenko, G. Mammadova, S. Sivitska, & A. Gasimov (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations (ICBI 2019)*. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 73, pp. 75–81. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_9
11. Pashynskyi, M., Dzhyrma, S., Pashynskyi, V., & Nastoyashchyi, V. (2020). Providing the thermal reliability of window junctions during the thermal modernization of civil buildings. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek (e-GFOS),* (21), 45–54. https://doi.org/10.13167/2020.21.4
12. Pashynskyi, V. A., Pashynskyi, M. V., & Dzhyrma, S. O. (2022). Probabilistic analysis of thermal reliability of brick wall joints in residential buildings. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5(36), 137–145 [in Ukrainian].
13. Windows and Daylighting Group, Lawrence Berkeley National Laboratory. (2025). *THERM (Version 7.8.80)*. Retrieved December 17, 2025, from https://windows.lbl.gov/therm-software-downloads
14. Tukalo, O. S., & Dzhyrma, S. O. (2016). Study of the influence of PVC window position within wall thickness on heat losses of existing residential buildings in the secondary real estate market of Kirovohrad. *In Proceedings of the IV All-Ukrainian Student Scientific and Practical Seminar "Experience of Implementing Modern Computer Technologies in the Educational Process"* (pp. 59–66). KNTU. [in Ukrainian].
15. State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality". (2011). DSTU-N B V.1.1-27:2010. *Protection against hazardous geological processes, harmful operational impacts, and fire. Building climatology*. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].

С. О. Джирма, доц., канд. техн. наук, **М. В. Пашинський**, доц., канд. техн. наук, **С. С. Перун**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Технологічні рішення для підвищення енергоефективності віконних прорізів при новому будівництві і реконструкції житлового фонду

У статті розглянуто проблему підвищення енергоефективності світлопрозорих огороджувальних конструкцій житлових будинків. На основі комп'ютерного моделювання температурних полів у програмному комплексі THERM проаналізовано вплив геометричних параметрів віконного прорізу (наявність чверті, місце встановлення віконного блоку в товщі стіни) на теплотехнічні показники вузла примикання. Досліджено ефективність застосування традиційних цегляних чвертей у новому будівництві та запропоновано технологічні рішення для реконструкції існуючого житлового фонду з використанням пінополістирольних чвертей і вставок. Обґрунтовано оптимальну глибину монтажу віконних блоків від фасадної поверхні зовнішніх стін для уникнення конденсації вологи та мінімізації можливості утворення містків холоду. Встановлено, що під час реконструкції найбільш ефективним технологічним рішенням для модернізації віконних прорізів існуючих житлових будівель є влаштування штучних чвертей з пінополістиролу. Це рішення дозволяє відновити архітектурний вигляд фасадів і забезпечує кращі теплотехнічні показники вузла примикання віконних блоків (+8,9°С на відміну від +8,3°С у цегляному варіанті при класичному розташуванні вікна відразу за чвертю), забезпечити температуру у вузлі примикання не меншу за 11,0°С, встановивши вікно у зоні позитивних температур на відстані 260-265 мм від зовнішньої площини стіни.

енергоефективність, віконний проріз, вузол примикання, температурні поля, місток холоду, ізотерма, THERM, реконструкція, точка роси

Одержано (Received) 07.01.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 23.01.2026*
Прийнято до друку (Approved) 10.02.2026

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 633.1:681.78 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).245-256

С. П. Степаненко, ст. наук. співр., д-р техн. наук
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної Академії Аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна
e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Удосконалення процесу оптичного сортування дрібнонасіннєвих культур

Стаття присвячена вирішенню проблеми низької точності фотосепарації дрібного насіння, спричиненої хаотичним рухом частинок під дією повітряних потоків ежекторів. Проаналізовано недоліки існуючих гравітаційних та механічних систем подачі в умовах запиленості. Запропоновано конструкцію пневмомеханічної системи, де використання барабана з каліброваними отворами забезпечує чітке позиціонування насінин, а стиснене повітря виконує роль безконтактного виштовхувача. Встановлено, що такий підхід дозволяє поєднати високу точність механічного дозування з надійністю та низьким травмуванням насіння, характерним для пневматичних систем.
дрібнонасіннєві культури, фотосепаратор, система подачі, барабанний дозатор, пневмомеханічний метод, точність сортування

Постановка проблеми. Насіння багатьох кормових, лікарських, декоративних, олійних та овочевих культур характеризується малими розмірами – зазвичай не більше 3 мм [1–2]. Використання сучасних зерноочисних машин для дрібнонасіннєвих сумішей не завжди забезпечує високий рівень очищення: наприклад, після першого проходу насіння кормових трав може містити до 30 % домішок [3–5]. Через дрібні розміри насіння та індивідуальні коливання розмірів зерен різних культур необхідна висока точність виготовлення робочих деталей машин і мінімальні допуски, щоб забезпечити ефективне сортування, що ускладнює конструкцію та підвищує вартість обладнання.

Останнім часом у післязбиральній обробці насіння почали застосовувати фотосепарацію – метод, який суттєво підвищує якість очищення (до 99 %) [6–7]. Проте при сортуванні дрібного насіння спостерігається значне збільшення кількості повноцінного насіння у відходах та зниження ефективності очищення за один прохід у порівнянні з насінням середніх розмірів. Основною причиною цього є недостатня ефективність систем подачі дрібного насіння до оптичної камери фотосепаратора. Тому розробка та обґрунтування системи подачі дрібного насіння до фотосепаратора залишається актуальним і важливим завданням сучасної післязбиральної технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.. Проблема підвищення якості показників оптичного сортування насіннєвого матеріалу висвітлена у працях багатьох вітчизняних та закордонних учених. Зокрема, досліджені питання використання нейронних мереж [8-10] та спектрального аналізу [11-12] для розпізнавання дефектів та домішок. У цих роботах доведено, що точність розпізнавання об’єктів сьогодні сягає 99%.

Проте ефективність сортування значною мірою залежить не лише від зору камери, а й від динаміки руху насіння в зоні сканування [13]. Традиційні гравітаційні системи подачі, що розглядалися у дослідженнях [14-15], мають обмеження при роботі з дрібнонасіннєвими культурами через високу аеродинамічну чутливість часток. Зокрема, у роботі [16] вказано на проблему турбулентних потоків, що виникають під час роботи пневмоежекторів, що може призводити до хибного відсіву якісного насіння.

© С. П. Степаненко, 2026

Водночас, питання створення надійних механічних дозаторів для дрібного насіння залишається дискусійним через їхню схильність до абразивного зношування в запиленому середовищі [17].

Текстура зображення є важливою характеристикою природних об'єктів та суттєво впливає на процес їх сприйняття. У машинному аналізі зображень зерна текстурні ознаки відіграють ключову роль, особливо при задачах сегментації та класифікації зерен за якістю, розміром чи типом. Значна частина досліджень присвячена саме методам автоматичного розпізнавання зерна за текстурними характеристиками [18-20].

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання стабілізації дистанції між насінинами дрібнонасіннєвих культур у потоці при збереженні довговічності робочих органів залишається недостатньо вивченим. Потребує розробки система, яка б поєднала точність механічного позиціонування з перевагами безконтактного пневматичного впливу.

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є теоретичне та практичне обґрунтування використання пневмомеханічної системи подачі насіння в оптичних сортувальниках для покращення точності розділення дрібнонасіннєвих культур та підвищення надійності обладнання в умовах запиленості.

Виклад основного матеріалу. Для обґрунтування подачі дрібного насіннєвого матеріалу до оптичної камери фотосепаратора був застосований функціонально-фізичний метод. Цей підхід базується на аналізі функцій окремих елементів системи подачі насіння та використанні фізичних явищ, таких як сила реакції повітряного струменя і проходження твердих частинок через вузькі канали. Використання цього методу дозволяє оцінити вплив конструктивних і експлуатаційних параметрів на рівномірність подачі насіння та зменшення втрат повноцінного зерна.

Додатково застосовувався метод синектики, який дав змогу обґрунтувати доцільність використання вакууму в системі подачі насіння до оптичної камери. Цей підхід дозволяє інтегрувати різні фізичні та конструктивні рішення для забезпечення більш стабільної та безперервної роботи фотосепаратора, зменшуючи ймовірність захоплення сусідніх насінин і втрат дрібного зерна.

Для практичної реалізації досліджень було проведено аналіз існуючих систем подачі насіння на українському ринку та виявлено їхні обмеження при роботі з дрібним насінням. Це дозволило визначити ключові параметри, які потребують удосконалення: відстань між робочими отворами, форма та діаметр каналів подачі, а також характеристики повітряного потоку.

На основі отриманих даних розроблено концепцію пневмомеханічної системи подачі, яка поєднує переваги механічних і пневматичних рішень. Система забезпечує регульовану відстань між насінинами та контроль викиду надлишкових зерен за рахунок стисненого повітря, що дозволяє зменшити втрати повноцінного насіння та підвищити ефективність сортування дрібного насіннєвого матеріалу.

Усі експериментальні дослідження проводилися з урахуванням варіацій розмірів насіння різних культур, що дозволило оцінити універсальність та адаптивність запропонованої системи подачі.

Для високоточних систем розпізнавання зерна найбільш ефективним є застосування методів на основі марковських випадкових полів (MRF). Моделі Маркова дозволяють враховувати просторові залежності між пікселями зображення, що є критично важливим при аналізі текстур зерен, де сусідні пікселі часто мають схожі характеристики. Завдяки цьому марковські моделі широко застосовуються для сегментації та класифікації зображень у системах машинного зору.

Основні поняття, необхідні для опису методу: Поле зору (T) – довільне кінцеве множинне представлення області зображення, зазвичай у вигляді двовимірної

цілочисельної решітки. Піксель – елементарний елемент поля зору, якому присвоюється натуральне число з множини {1, 2, … , m}. Палітра (*X*) - множина кольорових або інтенсивнісних значень, що можуть бути присвоєні пікселям. Колір або інтенсивність – конкретне значення з палітри, призначене пікселю. Зображення – функція **x**: $T \rightarrow X$, що встановлює відповідність між пікселем та його значенням у палітрі. Значення функції для пікселя *t* позначається *xt*, а обмеження функції на підмножину τ поля зору – як $x\tau$. Сегментація – розбиття поля зору *T* на *l* сегментів через функцію kT: $T \rightarrow \{1, 2, \dots, l\}$, де множина {1, 2, …, *l*} є набором міток сегментів.

Якщо на множині всіх можливих зображень задано випадкову величину *N*, її називають випадковим полем. Марковським полем називають випадкове поле, ймовірнісний розподіл якого описується співвідношенням:

$$p(X) = K^{-1} exp\left(\sum \varphi(X)\right), \quad (1)$$

де φ(*X*) – функція потенціалу, що відображає взаємодію пікселів; *K* – нормалізаційний коефіцієнт.

Використання таких моделей дозволяє ефективно моделювати просторову структуру зернової текстури та покращує точність автоматичного розпізнавання окремих зерен оптичними камерами.

У даному підході структурна сегментація зображень розглядається як окремий випадок генерації марковських випадкових полів. Кожен піксель зображення описується двома компонентами - інтенсивністю (або кольором) та міткою сегмента. При цьому передбачається, що структура поля зору однакова для різних типів зерна, що дозволяє уніфікувати аналіз текстур.

Перевага такого підходу полягає в тому, що кожна сегментація та текстура моделюються своїм марковським полем, незалежним від інших. Це забезпечує простоту модифікації системи розпізнавання: введення нового класу зерна або видалення існуючого виконується легко в межах однієї моделі. Крім того, така модель дозволяє враховувати апріорні знання про сегментацію та характеристики зерен, що підвищує точність класифікації.

Кожна марковська модель $\lambda = (A, B, \pi)$ представляє собою набір *N* станів $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, між якими можливі переходи. У будь-який момент часу система перебуває у конкретному стані. У найбільш поширених моделях першого порядку вважається, що наступний стан залежить лише від поточного стану.

При переході у стан генерується спостережуваний символ, який відповідає фізичному сигналу, що надходить з виходу системи розпізнавання. Набір можливих символів для кожного стану задається множиною $V = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$, де *M* – кількість символів. Символ у стані $q_t = S_j$ у момент часу *t* генерується з ймовірністю:

$$bj(k) = P(v_M \mid q_t = Sj). \quad (2)$$

Всі такі ймовірності формують матрицю $B = \{bj(k)\}$, яка описує розподіл спостережуваних характеристик для кожного стану. Для задач розпізнавання зерна ці символи можуть відповідати інтенсивності пікселів, текстурним ознакам або кольоровим компонентам зерен, що дозволяє системі точно відокремлювати окремі зерна від фону та домішок.

Матриця переходів $A = \{a_{ij}\}$ визначає ймовірність переходу системи з одного стану S_i у інший стан S_j:

$$a_{ij} = P\left(q_{t+1} = S_j \mid q_t = S_i\right), i, j = 1, \dots, N_{ij}. \quad (3)$$

Зазвичай вважають, що матриця A не залежить від часу. Якщо з будь-якого стану можна досягти будь-якого іншого за один перехід (усі $a_{ij} > 0$), модель називають ергодичною. Крім того, модель містить ймовірності початкових станів $\pi = \{\pi_i\}$, де $\pi_i = P[q_1 = S_i]$.

У реальних процесах послідовність станів часто є прихованою, а відомі лише спостережувані сигнали – у випадку зерна це, наприклад, інтенсивність пікселів, колір чи текстурні характеристики, отримані оптичними камерами. Спостережувана послідовність позначається як $O = O_1\ O_2\ \dots\ O_T$.

Для розпізнавання зерен застосовуються скриті марковські моделі (Hidden Markov Models, HMM). Кожному класу зерна відповідає своя модель λ_i. Зображення зерна представляють у вигляді послідовності спостережень O. Для кожної моделі обчислюють ймовірність того, що саме вона могла згенерувати цю послідовність. Клас зерна, який відповідає моделі з максимальною ймовірністю, вважається ідентифікованим.

Математично, задача оцінки ймовірності генерації спостережень послідовністю O при налаштованій моделі $\lambda = (A, B, \pi)$ формулюється як:

$$P[\,O \mid \lambda\,] = \prod_{t=1}^{T} b_{q_t}(O_t), \tag{4}$$

де $b_{qt}\,(O_t)$ – ймовірність спостереження O_t у стані q_t.

Основні задачі роботи з HMM:

1. Розпізнавання: оцінка ймовірності P [O | λ] для послідовності спостережень.
2. Декодування: визначення оптимальної послідовності станів $Q = q_1\ q_2\ \dots\ q_T$ для заданої послідовності спостережень O. Для цього використовується алгоритм Вітербі [21].
3. Навчання: підбір параметрів моделі $\lambda\,(A, B, \pi)$ для максимізації ймовірності P [O | λ]. Для цього застосовується алгоритм Баум-Велча, що є варіантом градієнтного методу оптимізації [22].

У контексті розпізнавання зерна оптичними камерами ці методи дозволяють ефективно класифікувати зерна різних типів та сортів на основі аналізу текстури, кольору та інших піксельних характеристик, забезпечуючи високу точність автоматичного сортування в фотосепараторах.

У навчальному наборі даних кожна модель реагує на приклади з певною ймовірністю. Відсортовані таким чином моделі формують початкове ранжування. Для невідомого зображення моделі також ранжуються за ймовірністю відповіді на новий вхідний сигнал. Велике відхилення отриманого ранжування від початкового сигналізує про те, що зображення належить до невідомого класу зерна.

У традиційній практиці визначення розміру зерна часто здійснюється візуально, наприклад, у агропромислових лабораторіях. Метод полягає у порівнянні з еталонними шкалами під збільшенням у 100 разів, при якому оператор вибирає кілька типових ділянок і порівнює їх із еталонами. Такий підхід не тільки має низьку точність, а й значно ускладнює процес аналізу, потребуючи значних витрат часу та досвіду оператора.

Для підвищення точності рекомендується застосовувати комплексні методи аналізу, що дозволяють мінімізувати похибки. До таких методів відноситься підрахунок кількості зерен на одиниці площі з подальшим визначенням середнього діаметра та площі зерна. Метод полягає у визначенні кількості зерен на одиниці площі (наприклад, 1 мм²) та обчисленні середньої площі перетину та середнього діаметра зерна. Підрахунок здійснюється на мікрофотографії в межах поля зору, обмеженого колом діаметром 80,0–100,0 мм, що відповідає площі 0,5 мм² при збільшенні у 100 разів.

На практиці ці залежності можна відобразити графічно (рис. 1): залежність середньої площі перетину зерна від його порядкового номера дозволяє оцінити варіації розмірів у вибірці; залежність кількості зерен на одиниці площі від порядкового номера демонструє щільність розподілу зерен у пробі; залежність середнього діаметра зерна від порядкового номера відображає однорідність розмірів зерен та можливі аномалії у вибірці.

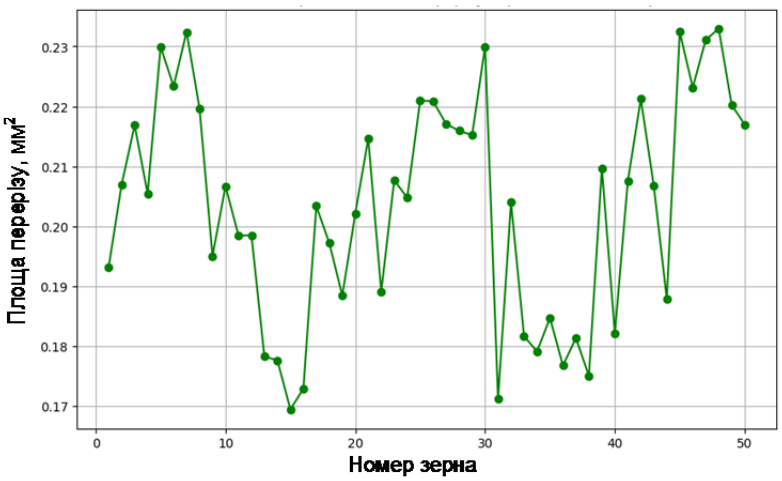


Рисунок 1 – Графік середньої площі перерізу зерна від його номера
Джерело: розроблено авторами

Використання таких кількісних методів у поєднанні з оптичним розпізнаванням дозволяє автоматизувати процес сортування та класифікації зерен, зменшити людський фактор та підвищити точність фотосепарації дрібного насіння або зерна.

Для аналізу було розглянуто типовий принцип подачі насіння до оптичної камери фотосепаратора, що пропонується на ринку (рис. 2). Насіння під дією сили тяжіння рухається по лотку одним рядком, формуючи шар завтовшки в одну насінину. З нижньої частини лотка насіння падає у зону освітлення, проходячи повз лампу та ежектор. Дві CCD-камери та одна NIR-камера фіксують обидві сторони насінини та передають зображення на комп'ютер для порівняння з еталонним зразком. У разі невідповідності заданим параметрам насінина відсівається струменем повітря з ежектора.

Аналіз показав, що така система подачі ефективна лише тоді, коли відстань між насінинами під час падіння значно перевищує ширину повітряного струменя ежектора.

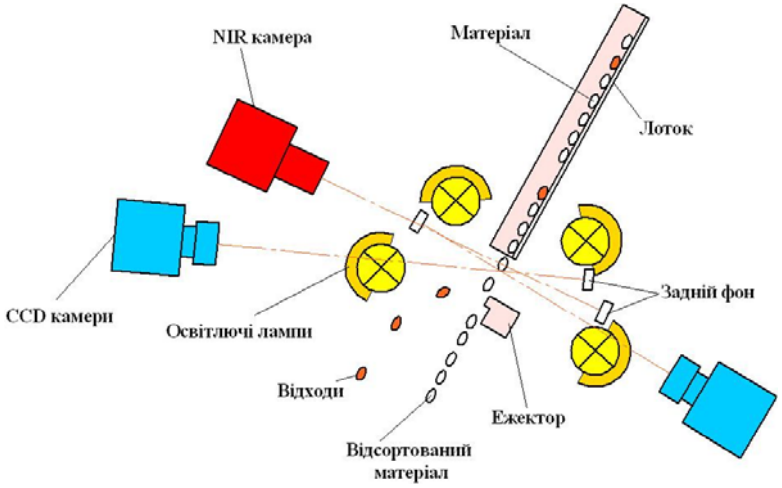


Рисунок 2 – Технологічна схема роботи фотосепаратора
Джерело: розроблено авторами

У випадку дрібного насіння або при високій щільності ряду зерен спостерігається захоплення сусідніх насінин, що призводить до збільшення втрат повноцінного зерна та зниження точності сортування. Це підтверджує недостатню ефективність традиційних систем подачі при роботі з дрібними культурами, такими як трави, овочеві та олійні рослини.

Додатково проведено моделювання руху насінин у лотку з використанням комп'ютерного аналізу траєкторій. Результати показали, що невелика зміна кута нахилу лотка або швидкості подачі значно впливає на відстань між насінинами під час падіння та на ймовірність захоплення сусідніх зерен струменем повітря. Це свідчить про необхідність точного налаштування параметрів подачі для забезпечення стабільної роботи фотосепаратора.

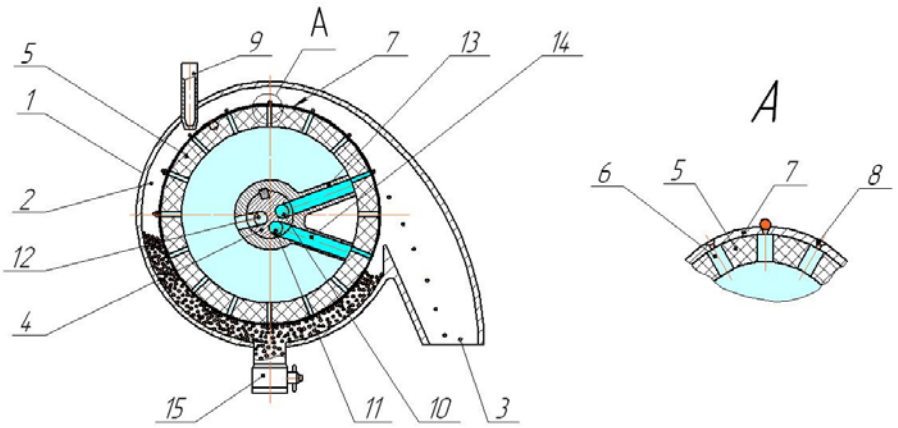
На основі отриманих даних було запропоновано використання пневмомеханічної системи подачі дрібного насіння, у якій відстань між насінинами регулюється шляхом зміни діаметра та розташування отворів у барабані подачі. Виштовхування надлишкового насіння здійснюється під дією стисненого повітря, що дає можливість мінімізувати захоплення сусідніх зерен і підвищити ефективність сортування. Такий підхід забезпечує більш рівномірну подачу насіння, зменшує втрати повноцінного зерна та покращує якість сортування дрібного насіннєвого матеріалу.

В результаті впровадження пневмомеханічної системи спостерігається підвищення коефіцієнта очищення дрібного насіння на 15–20 % порівняно з традиційною подачею, що робить метод перспективним для використання у сучасних фотосепараторах.

При подачі дрібного насіння відстань між окремими зернами невелика, тому при видаленні неякісного насіння повітряний потік може захоплювати сусідні насінини. Це призводить до збільшення кількості повноцінного насіння у відходах порівняно з насінням середнього розміру. Крім того, щільне розташування насінин під час фотозйомки підвищує ймовірність помилок при обробці зображень, що негативно впливає на якість сортування. Тому для ефективної фотосепарації дрібного насіння важливо забезпечити регулювання відстані між зернами. Оскільки у стандартних фотосепараторах ця відстань не контролюється, для дрібнонасіннєвого матеріалу необхідний спеціальний механізм подачі.

Найбільш економічним варіантом регулювання відстані є механічний метод. Проте його застосування вимагає високої точності виготовлення робочих деталей, оскільки розмір дрібного насіння не перевищує 3 мм, а допустиме відхилення деталей не більше 0,05 мм. Постійна наявність пилу у дрібнонасіннєвих сумішах призводить до поступового збільшення відхилень розмірів деталей, а через їх малий розмір термін служби механічної системи виявляється обмеженим. Таким чином, використання лише механічного регулювання відстані між насінинами є неефективним.

Подовжити термін експлуатації системи можна, поєднуючи механічний метод з пневматичним. Це досягається за допомогою барабана з радіально розташованими каліброваними отворами. Зміна відстані між отворами дозволяє регулювати інтервал між насінинами під час падіння в оптичну камеру. Насінини присмоктуються до отворів під дією вакууму, а у зоні падіння вакуум перекривається, забезпечуючи їхнє вільне відділення. Для очищення отворів від пилу та зайвих зерен використовується струмінь стисненого повітря. Такий підхід поєднує доступність механічного методу та надійність пневматичного. Запропонований метод реалізований у конструкції фотосепаратора, технологічна схема якого наведена на рис. 3.



1 – корпус; 2 – приймач насіння; 3 – горловина; 4 – горизонтальний вал; 5 – барабан; 6 – радіальні отвори; 7 – змінна сітка; 8 – калібровані отвори; 9 – сопло; 10 – основний повітропровід; 11 – додатковий повітропровід; 12 – вакуумпровід; 13 – відсікач вакууму; 14 –сопло; 15 – пристрій для скидання насіння

Рисунок 3 – Технологічна схема подачі дрібнонасіннєвого матеріалу в оптичну камеру фотосепаратора
Джерело: розроблено авторами

Технологічний процес реалізується наступним чином. Насіннєва суміш надходить у приймач насіння 2 і заповнює його (рис. 2). При обертанні барабана 5 насіння, що знаходиться у приймачі, притискається атмосферним тиском до каліброваних отворів 8 змінної сітки 7 і переміщується до горловини 3, де відбувається його скидання. Викидання насіння з барабана здійснюється струменем стисненого повітря, що подається з внутрішньої порожнини барабана 5. Зайві насінини, які розташовані на краях каліброваних отворів 8 і утримуються менш щільно, видуваються потоком повітря з продувного сопла 14, у результаті чого в кожному каліброваному отворі залишається лише одна насінина.

Застосування повітряних потоків дозволяє зменшити кількість механічних деталей у контакті з насінням, підвищити термін служби системи подачі дрібного насіння та знизити ризик його пошкодження під час подачі.

Графік на рис. 4. демонструє залежність середньої відстані між насінинами від кута нахилу лотка до вертикалі. Як видно, збільшення кута нахилу лотка призводить до більшого прискорення насіння під дією сили тяжіння, що, у свою чергу, збільшує відстань між зернами під час падіння в оптичну камеру.



Рисунок 4 – Вплив кута нахилу лотка на відстань між насінинами
Джерело: розроблено авторами

Це важливо для оптичної сепарації дрібного насіння, оскільки більш рівномірна відстань між зернами зменшує ймовірність захоплення сусідніх насінин повітряним струменем при видаленні неякісного насіння. Водночас занадто великий кут нахилу може прискорювати насіння настільки, що воно пролітає через оптичну камеру з меншою точністю визначення якості.

Оптимальний кут нахилу дозволяє поєднати мінімальні втрати повноцінного насіння та високий коефіцієнт відділення домішок. У практичній реалізації його значення підбирається експериментально для кожного типу насіння, враховуючи розмір зерен та їх масу.

Крім того, цей графік показує, що регулювання кута нахилу є одним із найпростішим механізмів контролю інтервалу між насінинами без застосування додаткових складних систем, що знижує вартість обладнання.

На графіку (рис. 5) наведена залежність ймовірності захоплення сусідніх насінин від швидкості подачі насіння в лоток. Збільшення швидкості подачі підвищує ймовірність того, що сусідні зерна потраплять під повітряний струмінь, призначений для видалення дефектних насінин.

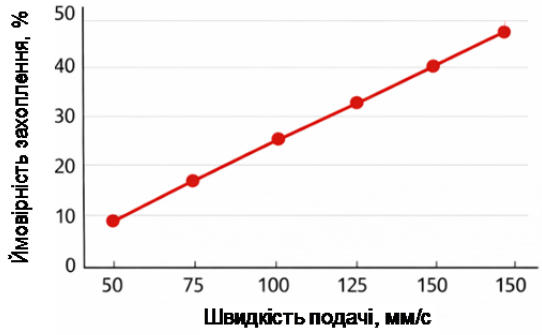


Рисунок 5 – Вплив швидкості подачі на захоплення сусідніх насінин
Джерело: розроблено авторами

При високій швидкості насіння рухається швидше, і повітряний потік не встигає точно відсортувати окремі зерна. Це збільшує втрати повноцінного насіння та знижує ефективність фотосепаратора. Низька швидкість подачі зменшує ймовірність захоплення сусідніх насінин, але може призвести до накопичення насіння у зоні лотка та тимчасових блокувань.

Таким чином, існує оптимальна швидкість подачі, при якій забезпечується баланс між продуктивністю та якістю сортування. Ця швидкість залежить від типу насіння та його розміру, а також від характеристик повітряного струменя та каліброваних отворів.

Регулювання швидкості подачі є важливим інструментом для підвищення точності сортування дрібного насіння, особливо у випадку насіннєвих сумішей з різними культурами.

На графіку (рис. 6) показано залежність ймовірності попадання однієї насінини в калібрований отвір від його діаметра. Занадто малі отвори можуть спричиняти засмічення, затримку або пошкодження насіння через тертя.



Рисунок 6 – Вплив діаметра отворів на точність подачі насіння ріпаку
Джерело: розроблено авторами

З іншого боку, надто великі отвори дозволяють одночасно потрапляти кільком зернам, що знижує точність сортування та підвищує ймовірність втрат повноцінного насіння. Оптимальний діаметр забезпечує точну фіксацію однієї насінини на отвір і рівномірну подачу в зону фотосепарації.

Цей графік демонструє необхідність балансування між конструктивною точністю барабана та ефективністю пневматичної системи видалення зайвого насіння. Підбір оптимального діаметра є ключовим етапом у розробці пневмомеханічних систем подачі дрібного насіння.

Вплив діаметра отворів особливо важливий для дрібного насіння (до 3 мм), оскільки будь-яке відхилення більше 0,05 мм значно знижує ефективність сортування і може призводити до збільшення втрат.

На рис. 7 наведено «тепловий графік», який показує комбінований вплив кута нахилу лотка та швидкості подачі на відсоток втрат повноцінного насіння. Зі зміною кута нахилу та швидкості подачі змінюється ефективність подачі та точність сортування.

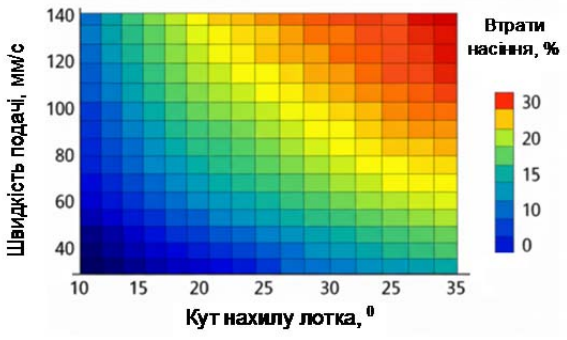


Рисунок 7 – Вплив кута нахилу лотка та швидкості подачі на втрати насіння ріпаку
Джерело: розроблено авторами

На графіку видно, що при малих кутах нахилу і низькій швидкості подачі втрати насіння мінімальні, але продуктивність системи низька. При великих кутах і високій швидкості втрати значно зростають через захоплення сусідніх насінин повітряним потоком.

Оптимальна зона на графіку виділена як область з найменшими втратами насіння (синьо-зелена ділянка), що демонструє необхідність балансування між швидкістю та кутом нахилу для забезпечення високої продуктивності та мінімізації втрат. Цей графік дозволяє вибирати оптимальні налаштування обладнання під конкретний тип дрібного насіння, підвищуючи ефективність сортування та зменшуючи виробничі втрати.

Висновки. Для ефективної фотосепарації дрібного насіння доцільно застосовувати пневмомеханічну систему подачі, яка поєднує доступність механічних рішень, надійність пневматики та мінімальний ризик пошкодження насіння.

Регулювання відстані між отворами барабана системи подачі дозволяє точно контролювати інтервал між насінинами під час їхнього руху через оптичну камеру. Це забезпечує оптимальні умови для фотографування зерен та точне відділення дефектного насіння струменем повітря від ежектора.

Впровадження такої системи підвищує якість сортування дрібного насіння, зменшує втрати повноцінного зерна та забезпечує стабільну роботу фотосепаратора при обробці насіння різних культур.

Дослідження виконано в рамках проекту 2025.02/0002 Розробити метод оптичного контролю якості процесу фракціонування зерна, що фінансується Національним фондом досліджень України (Конкурс на одержання щорічних грантів Президента України докторам наук (до 45 років включно) для проведення наукових досліджень і розробок.

Список літератури

1. Алієв Е. Б., Лупко К. О. Морфологічні характеристики та фізико-механічні властивості насіння дрібнонасіннєвих культур. *Конструювання виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 50. С. 27–35. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.35-41.
2. Овсянникова Л. К. Фізико-технологічні властивості сучасних сортів дрібнонасіннєвих культур. *Зернові продукти і комбікорми.* 2017. Вип. 17, №1. С. 9–15.
3. Спірін А. В., Цуркан О. В., Твердохліб І. В., Омельянов О. М. Шляхи інтенсифікації виробництва насіння трав. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (103). С. 110–120. https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-4-12.
4. Бакум М. В., Крекот М. М., Михайлов А. Д. та ін. Дослідження ефективності пневматичного сепаратора з нахиленим каналом на підготовці насіннєвого матеріалу сафлору. *Вісник Львівського національного університету*. 2022. № 26. С. 28–35. https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.02.
5. Степаненко С. П., Никифоров А. О. Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасіннєвих матеріалів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2024. № 24. С 52–68. https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.52-68.
6. Алієв Е. Б. Обгрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника. *Наукові горизонти*. 2019. № 5 (78). С. 23–30.
7. Cujbescu D, Nenciu F, Persu C, Găgeanu I, Gabriel G, Vlăduț N-V, Matache M, Voicea I, Pruteanu A, Bularda M, et al. Evaluation of an Optical Sorter Effectiveness in Separating Maize Seeds Intended for Sowing. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(15). 8892. https://doi.org/10.3390/app13158892.
8. Sabanci K., Kayabasi A., Toktas A. Computer vision-based method for classification of wheat grains using artificial neural network. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 97. P. 2588–2593. https://doi.org/10.1002/jsfa.8080.
9. Stepanenko S., Kuzmych A., Kharchenko S., Borys A., Dnes V., Volyk D., Kalinichenko R. A machine vision approach for grain quality control during separation. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 2025. Vol. 12(1), P. E9–E17. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e2.
10. Stepanenko S., Kuzmych A., Borys A., Dnes V., Kharchenko S., Rogovskii I., Golub G., Berezovyi M., Lutsiuk A. Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol 4, No. 2 (136). P. 81–92. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124.
11. Mensah B., Prasifka J., Hulke B., Monono E., Sun X. Detection of insect-damaged sunflower seeds using near-infrared hyperspectral imaging and machine learning. *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 12. 101110. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101110.
12. Zade N., Gupte A., Gupta P., Detalle N., Mannion A., Voyle R. Spectral Feature Extraction and Ensemble Learning for Multiclass Aircraft Damage Identification. *MethodsX*. 2025. Vol. 15. 103625. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103625.
13. Yang M., Shi Y., Song Q., Wei Z., Dun X., Wang Z., Cheng X. Optical sorting: past, present and future. *Light: Science & Applications*. 2025. Vol. 14(1), 103. https://doi.org/10.1038/s41377-024-01734-5.
14. Su C., Hong J., Wang J., Yang Y. Quick and Accurate Counting of Rapeseed Seedling with Improved YOLOv5s and Deep-Sort Method. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*. 2023. Vol. 92(9). P. 2611–2632. https://doi.org/10.32604/phyton.2023.029457.
15. Hardwick J., Morgan Z., Hirayama R. Acoustophoretic system for seed separation on conveyor belts. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, 6975. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62006-3.
16. Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C.J.R. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation. *Minerals Engineering*. 2018. Vol 121. P 169–179. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.004.
17. Fei Y., Li Z., Zhu T., Chen Z., Ni C. Nondestructive detection and classification of impurities-containing seed cotton based on hyperspectral imaging and one-dimensional convolutional neural network, *Digital Communications and Networks*, 2025. Vol. 11, No. 2, P. 308–316, https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.05.008.

18. Hall W., Seagar A., Palmer S. Automatic grain texture analysis using integral transforms. *Holzforschung*. 2012. Vol. 66(2). P. 231–236. https://doi.org/10.1515/HF.2011.127.
19. Latif G., Bouchard K., Maitre J., Back A., Bédard L. P. Deep-Learning-Based Automatic Mineral Grain Segmentation and Recognition. *Minerals*. 2022. Vol. 12(4), 455. https://doi.org/10.3390/min12040455.
20. Lin F., Fang H., Liu H., Zhang Y., Jensen D. J., Hovad E. Automatic detection of grains in partially recrystallized microstructures using deep learning, *Materials Characterization*. 2025. Vol. 219, 114576. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114576.
21. Cetin G., Fadali S. Optimal resource allocation in networked control systems using viterbi algorithm. Bulletin of Electrical *Engineering and Informatics*. 2021. Vol. 10, No. 3. P. 1524–1535. https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.3022.
22. Steeneck D., Eng-Larsson F. The Baum-Welch algorithm with limiting distribution constraints. *Operations Research Letters.* 2018. Vol. 46 (6). P. 563–567. https://doi.org/10.1016/j.orl.2018.08.008.

References

1. Aliiev, E. B., & Lupko, K. O. (2020). Morphological characteristics and physical and mechanical properties of seeds of small-seeded crops. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 50, 27–35 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.35-41.
2. Ovsiannykova, L. K. (2017). Physico-technological properties of modern varieties of small-seeded crops. *Grain products and compound feeds*, 17 (1), 9–15 [in Ukrainian].
3. Spirin, A. V., Tsurkan, O. V., Tverdokhlib, I. V., & Omelianov, O. M. (2021). Ways to intensify the production of grass seeds. *Vibrations in engineering and technologies*, 4(103), 110–120 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-4-12.
4. Bakum, M., Krekot, M., Abduev, M., Mikhailov, A., Maiboroda, M., Chalaya, O., Bezpalko, B., et al. (2021). Study of the efficiency of a pneumatic separator with an inclined channel on the preparation of safflor seed material. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, 25, 28–35 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.028.
5. Stepanenko, S. P., & Nykyforov, A. O. Research on impact of alternating air flow on quality of vibro-frictional separation of fine-seed materials. (2024). *Technical service of agriculture, forestry and transport*, 24, 52–68 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.52-68.
6. Aliiev, E. (2019). Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. *Scientific Horizons*, 22(5), 23–30 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30.
7. Cujbescu, D., Nenciu, F., Persu, C., Găgeanu, I., Gabriel, G., Vlăduț, N.-V., Matache, M., et al. (2023). Evaluation of an Optical Sorter Effectiveness in Separating Maize Seeds Intended for Sowing. *Applied Sciences*, 13(15), 8892. https://doi.org/10.3390/app13158892.
8. Sabanci, K., Kayabasi, A. & Toktas, A. (2017). Computer vision-based method for classification of wheat grains using artificial neural network. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2588–2593. https://doi.org/10.1002/jsfa.8080
9. Stepanenko S., Kuzmych A., Kharchenko S., Borys A., Dnes V., Volyk D., & Kalinichenko R. (2025). A machine vision approach for grain quality control during separation. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 12(1), E9–E17. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e2.
10. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Borys, A., Dnes, V., Kharchenko, S., Rogovskii, I., Golub, G., et al. (2025). Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2 (136), 81–92. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124.
11. Mensah, B., Prasifka, J., Hulke, B., Monono, E., & Sun, X. (2025). Detection of insect-damaged sunflower seeds using near-infrared hyperspectral imaging and machine learning. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101110. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101110.
12. Zade, N., Gupte, A., Gupta, P., Detalle, N., Mannion, A., & Voyle, R. (2025). Spectral Feature Extraction and Ensemble Learning for Multiclass Aircraft Damage Identification. *MethodsX*. 15. 103625. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103625.
13. Yang, M., Shi, Y., Song, Q., Wei, Z., Dun, X., Wang, Z., Cheng, X., et al. (2025). Optical sorting: past, present and future. *Light: Science & Applications*, 14(1), 103. https://doi.org/10.1038/s41377-024-01734-5.
14. Su, C., Hong, J., Wang, J., & Yang, Y. (2023). Quick and Accurate Counting of Rapeseed Seedling with Improved YOLOv5s and Deep-Sort Method. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 92(9), 2611–2632. https://doi.org/10.32604/phyton.2023.029457.
15. Hardwick, J., Morgan, Z. & Hirayama, R. (2025). Acoustophoretic system for seed separation on conveyor belts. *Nature Communications*, 16, 6975. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62006-3.

16. Nadolski, S., Samuels, M., Klein, B., & Hart, C.J.R. (2018). Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation, *Minerals Engineering*, 121, 169–179. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.004.
17. Fei, Y., Li, Z., Zhu, T., Chen, Z., & Ni, C. (2025). Nondestructive detection and classification of impurities-containing seed cotton based on hyperspectral imaging and one-dimensional convolutional neural network, *Digital Communications and Networks*, 11(2), 308–316. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.05.008.
18. Hall, W., Seagar, A. & Palmer, S. (2012). Automatic grain texture analysis using integral transforms. *Holzforschung*, 66(2), 231–236. https://doi.org/10.1515/HF.2011.127.
19. Latif, G., Bouchard, K., Maitre, J., Back, A., & Bédard, L. P. (2022). Deep-Learning-Based Automatic Mineral Grain Segmentation and Recognition. *Minerals*, 12(4), 455. https://doi.org/10.3390/min12040455
20. Lin, F., Fang, H., Liu, H., Zhang, Y., Jensen, D. J., Hovad, E. (2025). Automatic detection of grains in partially recrystallized microstructures using deep learning, *Materials Characterization*, 219, 114576. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114576.
21. Cetin, G., Fadali, S. (2021). Optimal resource allocation in networked control systems using viterbi algorithm. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(3), 1524–1535. https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.3022.
22. Steeneck, D., Eng-Larsson, F. (2018). The Baum-Welch algorithm with limiting distribution constraints. *Operations Research Letters*, 46 (6), 563–567. https://doi.org/10.1016/j.orl.2018.08.008.

Serhii Stepanenko, Senior Researcher, DSc.
Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine

Improvement of the Optical Sorting Process for Small-Seed Crops

The purpose of the study is to provide theoretical and practical justification for the use of a pneumatic seed feeding system in optical sorters to improve the accuracy of separating small-seed crops and increase the reliability of equipment in dusty conditions.

The study is devoted to solving the problem of low accuracy of photo-separation of small seeds caused by chaotic movement of particles under the action of air flows from ejectors. The shortcomings of existing gravitational and mechanical feeding systems in dusty conditions are analyzed. A design for a pneumatic-mechanical system is proposed, in which the use of a drum with calibrated holes ensures precise positioning of the seeds, and compressed air acts as a contactless ejector. It has been established that this approach combines high precision mechanical dosing with the reliability and low seed damage characteristic of pneumatic systems. For effective photo separation of small seeds, it is advisable to use a pneumatic-mechanical feeding system, which combines the accessibility of mechanical solutions, the reliability of pneumatics, and minimal risk of seed damage.

Adjusting the distance between the holes in the feeding system drum allows you to precisely control the interval between seeds as they move through the optical camera. This provides optimal conditions for photographing grains and accurately separating defective seeds with a jet of air from the ejector. The implementation of such a system improves the quality of small seed sorting, reduces the loss of full-fledged grains, and ensures stable operation of the photo separator when processing seeds of different crops.

small-seed crops, photo separator, feeding system, drum feeder, pneumatic-mechanical method, sorting accuracy

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 26.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 631.171:621.311:636.5 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).257-267

О. І. Кепко, доц., канд. техн. наук, **І. О. Лісовий**, доц., канд. техн. наук
Уманський національний університет, м. Умань, Україна
e-mail: piop@udau.edu.ua

Автоматизація режимів освітлення для підвищення надійності та ефективності птахівництва

Розроблено алгоритм автоматизованого управління світловими режимами пташника для 56-денного циклу вирощування бройлерів. З метою підвищення експлуатаційної надійності системи обґрунтовано триетапну модель імітації «світанку-заходу», що обмежує пускові струми та подовжує ресурс ламп. Доведено, що циклічне зниження освітленості між годівлями підвищує загальну енергоефективність, знижує стрес птиці та оптимізує витрати кормів, забезпечуючи стабільність технологічного процесу.
автоматизація, світловий режим, птахівництво, енергоефективність, експлуатаційна надійність, алгоритм управління

Постановка проблеми. Сучасне промислове птахівництво базується на високій інтенсифікації, де світлове середовище є одним із головних чинників впливу на біологічний потенціал вирощуваного поголів'я [1, 13]. Глобальні наукові виклики вимагають поєднання продуктивності з високими стандартами добробуту сільськогосподарської птиці та екологічної стійкості виробництва [2, 12].

Світло виступає фундаментальним регулятором життєвих ритмів, метаболізму та поведінки особин, що безпосередньо впливає на їхню імунну систему та загальний фізіологічний стан [5, 6, 17]. Це робить параметри освітленості ключовим інструментом управління здоров'ям популяції у пташнику.

Воєнні дії в Україні спричинили енергетичну кризу з частими вимкненнями електроенергії, що створює жорсткий стрес для біологічних об'єктів при різких переходах на резервне живлення. Впровадження систем, здатних автоматично відновлювати світлові програми та забезпечувати плавні переходи після появи напруги, стало питанням виживання галузі [9, 15].

Дефіцит потужностей та висока вартість палива для генераторів роблять використання інтелектуальних LED-технологій із можливістю плавного регулювання яскравості (димування) стратегічним шляхом зниження собівартості продукції [3, 14].

Різке ввімкнення чи вимкнення освітлення провокує оксидативний стрес. Розробка систем з імітацією плавних циклів «світанок-захід» дозволяє нівелювати негативні наслідки нестабільного енергопостачання та покращити продуктивні показники досліджуваних об'єктів [7, 18].

Робота спрямована на цифрову трансформацію АПК через розробку автономних мікроконтролерних систем керування, що зберігають налаштування при збоях у мережі [3, 8, 19]. Це значно підвищує технологічну стійкість галузі в умовах воєнного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують, що світлове середовище є визначальним чинником впливу на біологічний потенціал та фізіологічний стан сільськогосподарської птиці [1, 13, 14]. Назаренко С. О. [1] наголошує на критичній важливості імітації циклів «світанок-захід» для мінімізації стресу та зниження падежу. Цю думку підтримують Gündoğar A. [7] та автори праць [6, 17], доводячи, що плавні світлові переходи та оптимізація спектрального складу (зокрема повний спектр та інфрачервоне випромінювання) зміцнюють імунітет та покращують якість м’яса.

© О. І. Кепко, І. О. Лісовий, 2026

Ефективність змінної інтенсивності освітлення (*Variable Lighting*) для покращення метаболізму та зниження рівня кульгавості особин продемонстрована у роботі [4]. У контексті підвищення продуктивності та вивчення поведінкових реакцій вагомими є результати Pap T. I. [2] та Wang S.Y. [18], які дослідили характеристики попиту на світло та зміни у моделях годівлі. Вплив різних джерел світла на відтворні показники та економічну ефективність висвітлено у працях [10, 15, 16], а особливості вирощування в умовах сучасних промислових кросів — у дослідженні [11].

Технічна реалізація таких режимів сьогодні базується на впровадженні мікроконтролерних систем (зокрема Arduino) та IoT-технологій [3, 12]. Алгоритмічне забезпечення режимів «світанок-захід» для вітчизняних підприємств розглядалося Уткіною Т.Ю. [9], а загальні питання екологічного та енергоефективного впливу чинників середовища — у роботі [15].

Фундаментом для даного дослідження стали попередні напрацювання автора [8, 19], де було обґрунтовано структурно-логічні схеми автоматизації пташників та алгоритми управління освітленням. Вони дозволили сформувати принципи побудови автономних систем, що здатні ефективно функціонувати в умовах нестабільного енергозабезпечення.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері автоматизації пташників, питання стабільного функціонування інтелектуальних світлових програм в умовах критичних збоїв енергосистеми та необхідності швидкої адаптації до вимог сучасних кросів птиці залишаються недостатньо висвітленими

Постановка завдання та мета дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні економічної ефективності птахівництва та забезпеченні належного фізіологічного стану поголів'я шляхом теоретичного обґрунтування та розробки автоматизованої системи управління (АСУ) світловими режимами, що враховують добові та технологічні цикли вирощування.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання**:

Обґрунтувати цільову функцію ефективності управління, яка базується на максимізації узагальненого показника продуктивності птиці при одночасній мінімізації витрат на корми, електроенергію та заміну ламп.

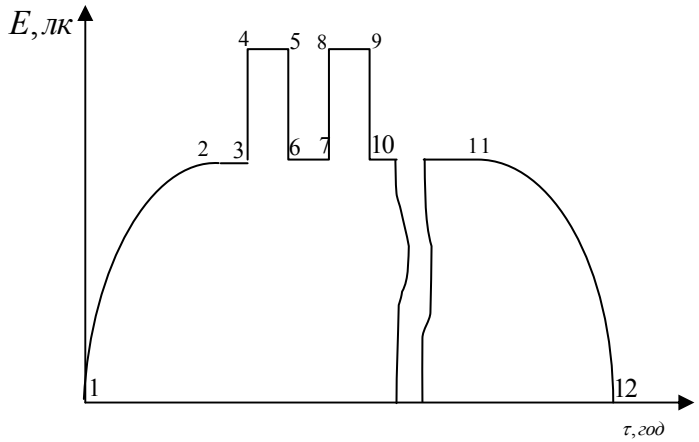
Розробити графік добового освітлювального циклу $E = f(t)$, що передбачає підтримання пониженої фонової освітленості з короткочасним її доведенням до зоотехнічної норми виключно в періоди годування.

Запропонувати енергоощадну триетапну модель зміни напруги на лампах у режимах «світанку-заходу» (стрибком до 60 В, плавно 60–200 В, стрибком до 230 В), що забезпечує ілюзію плавного переходу для зору птиці та подовжує термін служби освітлювальних приладів.

Сформулювати алгоритм управління АСУ як синхронного автомата з пам'яттю, здатного працювати у двох часових діапазонах — добовому та технологічному (на прикладі 56-денного циклу вирощування бройлерів).

Розробити функціональну блок-схему автоматизованої системи на базі цифрової системи фазового регулювання (ЦСФР), що забезпечує роботу пристрою в статичному режимі при реалізації локально-замкнутих підсистем освітлення.

Виклад основного матеріалу. Спостереження за птицею показали, що досягається позитивний ефект, якщо птицю утримувати при пониженій освітленості і лише при годуванні доводити освітленість до встановленої зоотехнічної норми. Схематично режим зміни освітленості $E = f(t)$ показаний на рис.1.



де: 1–2 – період «світанку»; 2–3, 5–7 – період стабільної освітленості; 3–5, 8–9 – період підвищеної освітленості під час годування; 11–12 – період «заходу»

Рисунок 1 – Режим освітлення пташника

Джерело: розроблено автором

Графік розбитий на ділянки. Від точки 1 до точки 2 проходить світанок. Точка 2 є тією верхньою межею освітленості, яка є максимальною для кожного конкретного періоду (віку) утримання птиці, ця межа підтримується на ділянках 2-3, 5-7... В точці 3 відбувається включення освітлення на повну потужність (U = 220В) і цей режим підтримується на ділянках 4-5, 8-9… на протязі часу годування. Кількість годувань залежить від технології утримання, ділянка 11-12 – захід. У точці 12 освітленість дорівнює нулю E = 0 лк. З ранку процес повторюється знову з точки 1.

Миттєве вмикання або вимикання освітлення провокує у поголів'я гострий фізіологічний стрес, що неминуче призводить до пригнічення загальної продуктивності [7]. Для нівелювання цього негативного фактора критично важливою є реалізація алгоритмів плавного переходу, які імітують природні цикли «світанку» та «заходу» [1, 9]. Відповідно до сучасних зоотехнічних регламентів та результатів досліджень, оптимальна тривалість таких перехідних періодів має становити в межах від 10 до 30 хвилин [7, 8, 13].

Енергоефективність системи забезпечується законом керування $U = f(t)$ при стабільній інтенсивності світла. Згідно з [8], імітація «світанку» реалізується у три етапи (рис. 2): імпульсний стрибок до 60 В, лінійне наростання (60–200 В) та перехід до номінальних 230 В.

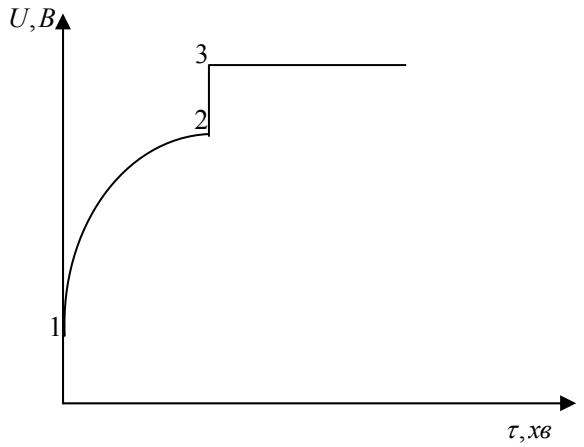
Така дискретна зміна напруги, на відміну від циклу 0–230 В, оптимізує енергоспоживання без втрати фізіологічного ефекту. Для зору птиці зберігається ілюзія плавного процесу, оскільки коливання напруги в діапазонах 0–60 В та 200–230 В є біологічно невідчутними, що підтверджує раціональність алгоритму [8].

Впровадження такого режиму управління спрощує конструкцію освітлювальної установки та забезпечує комплексний економічний ефект, який формується за чотирма взаємопов'язаними напрямами: зростання продуктивності птиці, зниження витрат кормів, економія електроенергії та подовження ресурсу ламп.

Тому мета управління є – максимізація ефективності утримання птиці через оптимізацію режиму освітлення. Цільова функція відповідно буде мати вигляд:

$$\text{Maximize } Z = \alpha_1 P - \alpha_2 C_k - \alpha_3 C_e - \alpha_4 C_l, \quad (1)$$

де Z – узагальнений показник ефективності; P – продуктивність птиці; C_k – витрати на корми; C_e – витрати електроенергії; C_l – витрати на заміну ламп; α_1, α_2, α_3, α_4 – вагові коефіцієнти, що відображають важливість кожного з критеріїв.



де: U_1 – стрибок напруги до 60 В; U_2 – зона плавного регулювання (60–200 В); U_3 – стрибок до номінальної напруги 230 В.

Рисунок 2 – Режим світанку

Джерело: розроблено на підставі [8]

Зниження рівня фонової освітленості пригнічує надмірну рухову активність птиці, що мінімізує прояви розкльовування (канібалізму) та стимулює інтенсивніший приріст живої маси [4, 7, 8]. Крім того, обмеження рухливості суттєво зменшує здіймання пилу, а отже — і концентрацію патогенних мікроорганізмів у повітряному середовищі пташника [15]. Таке покращення санітарно-гігієнічних умов позитивно позначається на імунному статусі поголів'я: скорочується відсоток падежу, зростає загальна продуктивність та нівелюється ризик масових епізоотій [6, 13, 17]. Додатковим економічним ефектом від зменшення активності птиці є пропорційне скорочення питомих витрат корму [2, 14, 18].

Економія електроенергії забезпечується зниженням фонової освітленості між годуваннями та плавним регулюванням напруги в режимах «світанок-захід». Поступове наростання напруги обмежує пускові струми, захищаючи лампи від передчасної деградації. Експлуатаційний ресурс ламп додатково зростає, оскільки за номінальної напруги вони працюють лише близько 20% загального часу [8]. Математично цю закономірність описує вираз:

$$\mathrm{T_ф} = \mathrm{T}\left(\frac{U}{U_н}\right)^{-n}, \text{год} \qquad (2)$$

де $T_ф$ – фактичний термін служби лампи, годин; T – номінальний термін служби лампи, годин; $U_н$ – номінальна напруга лампи, В; U – фактична напруга, В; n – показник ступеня.

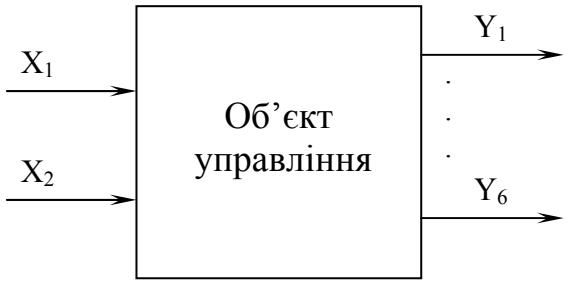
Підвищення терміну служби лампи веде до зменшення витрати ламп за одиницю часу, наприклад, за технологічний цикл вирощування бройлерів.

Теоретичне обґрунтування параметрів і режимів роботи пристрою.

В процесі проектування, слід визначити вид автоматичного пристрою, управління (АПрУ).

Процес освітлення розбитий на декілька мініпроцесів (рис.1), які слідують один за одним і зв'язані в один ланцюжок функцією часу. Наприклад, режим світанку (точки 1-2) переходить в режим стабільного освітлення (точки 2-3), а він у свою чергу в режим максимального освітлення (точки 3-4) і тощо. Такий процес відповідатиме АПрУ типу "автомат".

Модель об'єкту управління у вигляді чорного ящика приведена на рис. 3



де: X_1 – керуюча дія (напруга); X_2 – час доби; *У1* – освітлення в приміщенні впродовж всього циклу вирощування бройлерів (табл.1); *У2* – тривалість світлового дня; *У3* – імітація світанку; *У4* – імітація заходу; *У5* – тривалість годування; *У6* – подача управляючого сигналу устаткуванню для роздачі корму і прибирання посліду в момент включення освітлення на повну потужність.

Рисунок 3 – Модель об'єкту управління

Джерело: розроблено на підставі [8]

Визначимо керуючу дію, що діє на АПрУ. Щоб забезпечити заданий рівень освітленості необхідно змінити світловий потік лампи, що досягається зміною напруги яка до неї підводиться. Отже, управляючою дією будемо вважати напругу *Х1*. Рівень освітленості також залежить і від часу доби, відповідно другою управляючою дією буде час *Х2*.

Зазвичай, птахівницькі приміщення будуються без вікон, тому вплив на освітленість в приміщенні сонячного світла відсутній. Які-небудь джерела світла, окрім основного робочого, в приміщенні зазвичай не встановлюють, отже, на наш об'єкт управління які-небудь збурюючі дії не впливають.

Ця обставина дозволяє нам не вдаватися до проектування зворотного зв'язку.

Сформулюємо алгоритми функціонування і управлення. Покажемо алгоритм функціонування на прикладі технології вирощування бройлерів, яка застосовується в ПрАТ «Птахокомбінат «Бершадський» Вінницької області.

Цикл вирощування бройлерів складає 56 днів, протягом якого освітленість з 30 лк зменшується до 10 лк, а тривалість світлового дня скорочується з 23 до 8 годин (табл. 1).

Таблиця 1 – Світловий режим пташника

Вік, дні	Кількість годувань	Тривалість світлового дня, година	Вкл. освітлення	Викл. освітлення	Освітленість, лк
5	2	23	7.00	6.00	30
10	3	22	7.00	5.00	25
15	3	20	7.00	3.00	25
20	3	18	7.30	1.30	20
25	3	16	7.30	23.30	20
30	3	14	7.30	21.30	20
35	3	12	7.30	19.30	15
40	4	11	7.30	18.30	15
45	4	10	7.30	17.30	15
50	4	9	8.00	17.00	10
56	5	8	8.00	16.00	10

Джерело: розроблено автором

Кількість і періодичність годувань також залежить від віку птиці (табл. 1).
Протягом однієї доби освітлювальний цикл виглядає таким чином (табл. 2).

Таблиця 2 – Добовий освітлювальний цикл в пташнику (вік і =10 днів)

Час доби, година	Процес	Освітленість, лк
5.00–7.00	нічь	0
7.00–7.15	світанок	$0 \rightarrow 25$
7.15–10.00	нормов. осв-ть $E_н$ = 25лк	25
10.00–11.00	1-е годування	30
11.00–15.00	$E_{н_{10}}$ = 25 лк	25
15.00–16.00	2-е годування	30
16.00–20.00	$E_{н_{10}}$ = 25 лк	25
20.00–21.00	3-е годування	30
21.00–4.45	$E_{н_{10}}$ = 25 лк	25
4.45–5.00	захід	$25 \rightarrow 0$
5.00–7.00	нічь	0

Джерело: розроблено автором

Алгоритм функціонування автоматичного пристрою управління (АПрУ) реалізується у двох взаємопов'язаних часових циклах: загальнотехнологічному (56-денному) та добовому. У межах доби виділяються перехідні динамічні фази («світанок» і «захід»), що описуються функцією часу $E = f(t)$.

Базовий добовий алгоритм управління циклічно повторюється (з 1-го по 56-й день) із постійною адаптацією параметрів до поточного віку птиці та передбачає:

1. Імітацію «світанку» до нормативного фонового рівня освітленості.
2. Увімкнення освітлення на повну потужність під час годування із синхронною подачею керуючого сигналу на механізми кормороздачі та прибирання посліду.
3. Імітацію «заходу» з плавним зниженням освітленості до нуля (Е = 0 лк).
4. Забезпечення (за потреби) додаткових нічних циклів годування із дотриманням аналогічних плавних світлових переходів.

Графічну реалізацію розробленого алгоритму управління у вигляді блок-схеми наведено на рис. 4.

Представимо рівняння згідно з правилами булевої алгебри

Нехай:

- $I = \{1,2,3,4,5,6\}$ – множина індексів.
- N_k – кількість технологічних циклів.
- $N_k <= N_s$ – умова для переходу в блоці 6.
- N_{zi} – денний лічильник.
- $N_{zi} <= N_s$ – умова для переходу в блоці 12.
- $t_{zi} – t_3 <= 0$ – умова в блоці 9.

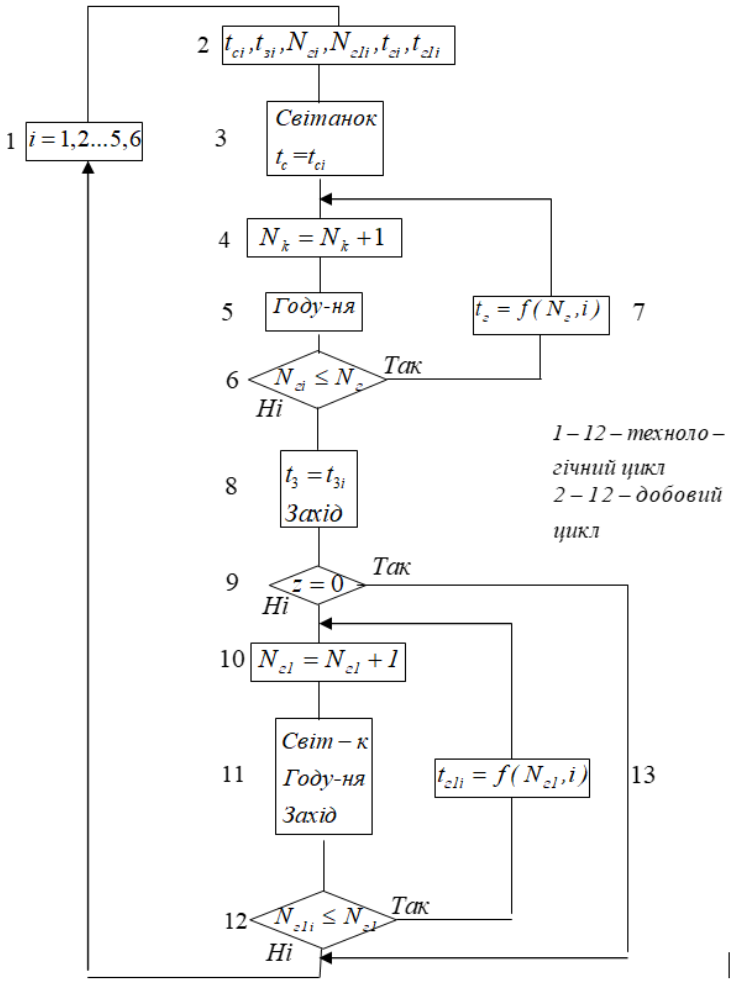
Введемо булеві змінні для умов:

- $A \equiv (N_k \leq N_s)$ – булева змінна для блоку 6.
- $B \equiv (t_{zi} – t_3 \leq 0)$ – булева змінна для блоку 9.
- $C \equiv (N_{zi} \leq N_s)$ – булева змінна для блоку 12.

Загальна булева логіка процесу (спрощена форма):

- Start = 1
- $A = (N_k \leq N_s)$

– $B = (t_{zi} - t_3 \le 0)$
– $C = (N_{zi} \le N_s)$
– $F = A \wedge B \wedge C$



1. завдання тривалості циклу вирощування бройлерів (56 днів); 2. завдання часу світанку t_{ci}, часу заходу t_{3i}, кількості годувань N_{ci}, кількість нічних годувань N_{z1i}, часу кожного конкретного денного t_{zi} і нічного t_{z1i} годування відносно i-го дня циклу; 3. світанок в заданий час t_{ci}; 4. лічильник числа годувань N_z; 5. годування; 6. перевірка завершення циклу денних годувань; 7. завдання часу годування, залежне від дня циклу i порядкового номера годування N_z; 8. захід в заданий час t_{3i}; 9. перевірка умови наявності нічного годування; 10. лічильник числа нічних годувань N_{z1}; 11. нічне годування, що починається світанком і завершується заходом; 12. перевірка завершення циклу нічних годувань; 13. завдання часу нічного годування аналогічно.

Рисунок 4 –Алгоритм управління

Джерело: розроблено на підставі [8]

Це означає, що повне виконання внутрішнього циклу можливе тоді, коли виконуються всі три умови. Якщо хоча б одна з них не виконується, алгоритм повертається до початку або переходить до наступного етапу за індексом і.

Алгоритм управління є основою для подальшого проектування.

Як видно з алгоритму управління автомат повинен володіти пам'яттю.

На рівні технологічного циклу пристрій повинен "пам'ятати" тривалість циклу (у нашому випадку 56 днів) для кожного дня, час включення світанку і заходу (тривалість світлового дня), рівень освітленості, число годувань.

На рівні добового циклу – теж, але для свого дня.

По вигляду пам'яті, що використовується пристрій буде синхронним, оскільки зміна параметрів АУУ відбуватиметься у момент надходження синхронізуючих імпульсів. Наявність у автомата затримки доцільним не є.

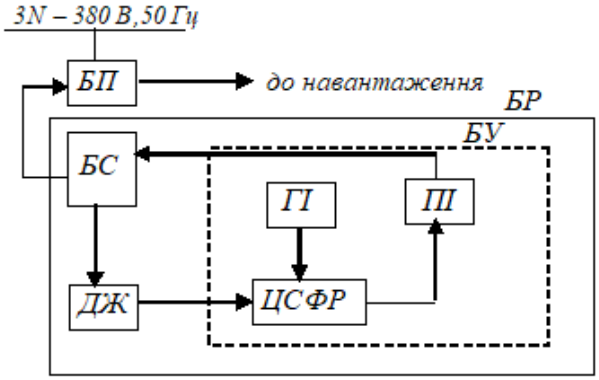
Будь-яка складна система управління може бути розбита на менш складні (локально-замкнуті).

У нашій установці можна виділити три основні локально-замкнуті системи:

– світанок;
– підвищене освітлення при годуванні;
– захід.

Кожна з цих систем може бути розглянута окремо.

З алгоритму функціонування видно, що різниця в часі між двома послідовними управляючими діями менше часу перехідних процесів, тому можна вважати, що система працює в статичному режимі. Виходячи з цього функціональна схема буде мати вигляд (рис.5):



БП – блок перемикача; БР – блок регулятора; БС – блок силовий; ГІ – генератор імпульсів; БУ – блок управління; ДЖ – джерело живлення; ЦСФР – цифрова система фазового регулювання; ПІ – підсилювач імпульсів

Рисунок 5 – Функціональна блок-схема АСУ Джерело: розроблено автором

Джерело: розроблено авторами

Висновки. У результаті проведених досліджень обґрунтовано оптимальні режими освітлення для пташників, що враховують як добові, так і технологічні цикли розвитку бройлерів. Застосування плавної зміни освітленості (імітація «світанку» та «заходу») дає змогу мінімізувати стрес у птиці, зменшити падіж та випадки розкльовування, а також покращити прирости живої маси.

Встановлено, що утримання птиці при зниженій освітленості між періодами годування з подальшим підвищенням до зоотехнічної норми під час годування сприяє економії електроенергії, зниженню витрат кормів та зменшенню запилення в приміщенні, що позитивно впливає на здоров’я поголів’я.

Запропонований алгоритм управління освітленням передбачає синхронізацію зміни світлового потоку з віком птиці, кількістю годувань та фазами добового циклу. Реалізація цього алгоритму у вигляді автоматизованої системи управління дозволяє підвищити продуктивність бройлерів без додаткових витрат на інші ресурси.

Розроблена функціональна модель і електронна схема автоматизованої системи управління освітленням забезпечують гнучке регулювання параметрів світлового середовища, спрощують конструкцію освітлювальної установки та збільшують строк служби ламп завдяки зменшенню часу роботи при номінальній напрузі.

Комплексна оптимізація світлового режиму відповідно до запропонованих рекомендацій дає змогу підвищити загальну ефективність виробництва бройлерів, об’єднуючи зростання продуктивності, покращення зоотехнічних показників і

зниження експлуатаційних витрат.

Список літератури

1. Назаренко С. О. Особливості регулювання світлового режиму для курчат-бройлерів сучасних кросів. *Таврійський науковий вісник*. 2013. Вип. 83. С. 181–187. URL: https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/issue-83-2013 (дата звернення: 26.01.2026).
2. Effect of lighting methods on the production, behavior and meat quality parameters of broiler chickens / Pap T. I. та ін. *Animals*. 2024. Vol. 14, № 12. Article № 1827. DOI: 10.3390/ani14121827.
3. Goswami S., Dangi A. Implementation of automatic lighting and heating system for poultry farm using Arduino. *The Pharma Innovation Journal*. 2022. Vol. 11, Special Issue 7. P. 1778–1781. DOI: 10.22271/tpi.2022.v11.i7Sw.13986.
4. Effects of a variable light intensity lighting program on the welfare and performance of commercial broiler chickens / Kang S. та ін. *Frontiers in Physiology*. 2023. Vol. 14. DOI: 10.3389/fphys.2023.1254345.
5. Impact of Light Wavelength on Growth and Welfare of Broiler Chickens – Overview and Future Perspective / Abdel-Moneim Eid A.-M. та ін. *Annals of Animal Science*. 2024. DOI: 10.2478/aoas-2024-0065.
6. Impact of Full-Spectrum and Infrared Lighting on Growth, Oxidative Stress, and Cecal Microbiota in Broilers / Khawar Hayat та ін. *Antioxidants*. 2024. Vol. 13, № 12. DOI: 10.3390/antiox13121542.
7. Effects of abrupt and gradual light/dark switching on growth performance, behavior, villus development, meat characteristics, and immunity of broilers / Gündoğar A. та ін. *Animal Science Journal*. 2024. Vol. 95, № 1. DOI: 10.1111/asj.13942.
8. 8 Кепко О. І., Черновол М. І., Лісовий І. О. Обґрунтування алгоритму управління освітленням пташника. *New development areas of digitalization at the beginning of the third millennium*: conference proceedings (December 10–11, 2021). Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2021. С. 45–50. DOI: 10.30525/978-9934-26-172-5-12.
9. Уткіна Т. Ю., Кісельов В. Є., Рябцев В. Г. Система автоматичного управління освітленням птахофабрики в режимах Світанок-Захід. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 3. С. 5–13. DOI: 10.24025/2306-4412.3.2021.242241.
10. Ганзюк Т. О., Приліпко Т. М., Шуляр А. Л. Вплив параметрів світлових програм на продуктивні і відтворні показники індичок. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2025. № 47. С. 37–41. DOI: 10.37406/2706-9052-2025-2.5.
11. Fijalovych L. M., Paskevych G. A**.** Peculiarities of the effective cultivation of broiler chickens. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*. 2025. Vol. 27, № 103. P. 3–9. DOI: 10.32718/nvlvet-a10301.
12. Sakata A. J., Siqueira J. A. C. Lighting in broiler poultry houses: optimization for growth, welfare and sustainability. *Revista Caribeña - QUALIS B1*. 2024. Vol. 13, № 12. DOI: 10.55905/rcssv13n12-007.
13. Light regimen on health and growth of broilers: an update review / Yujun Wu та ін. *Poultry Science*. 2022. Vol. 101, Issue 1. DOI: 10.1016/j.psj.2021.101545.
14. Effect of light sources on productivity, welfare aspects, and economic evaluation of commercial layers / Raziq F. та ін. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*. 2021. Vol. 45, № 1. P. 176–190. DOI: 10.3906/vet-2009-23.
15. Impact of environmental factors on poultry production / D Khonitan та ін. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1482. DOI: 10.1088/1755-1315/1482/1/012027.
16. Effect of different lighting sources on the performance of broiler breeder hens / Soliman A. S. та ін. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*. 2023. Vol. 11, № 3. DOI: 10.31893/jabb.23026.
17. Light wavelength and its impact on broiler health / Remonato Franco B. M. та ін. *Poultry Science*. 2022. Vol. 101, Issue 12. DOI: 10.1016/j.psj.2022.102178.
18. Light demand characteristics, production performance, and changes in the feeding patterns of broilers / **Wang S. Y.** та ін. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2024. Vol. 17, № 2. P. 68–73. DOI: 10.25165/j.ijabe.20241702.7411.
19. Кепко О. І., Лісовий І. О., Ковальчук Ю. О. Структурно-логічна схема автоматичної системи управління замкнутою системою опалення та вентиляції теплиць. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 56–62. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.294-304.

References

1. Nazarenko, S. O. (2013). Osoblyvosti rehuliuvannia svitlovoho rezhymu dlia kurchat-broileriv suchasnykh krosiv [Features of lighting regime regulation for broiler chickens of modern crosses]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk*, (83), 181–187. http://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/issue-83-2013 [in Ukrainian].

2. Pap, T. I., et al. (2024). Effect of lighting methods on the production, behavior and meat quality parameters of broiler chickens. *Animals*, *14*(12), 1827. https://doi.org/10.3390/ani14121827
3. Goswami, S., & Dangi, A. (2022). Implementation of automatic lighting and heating system for poultry farm using Arduino. *The Pharma Innovation Journal*, *11*(7), 1778–1781. https://doi.org/10.22271/tpi.2022.v11.i7Sw.13986
4. Kang, S., et al. (2023). Effects of a variable light intensity lighting program on the welfare and performance of commercial broiler chickens. *Frontiers in Physiology*, *14*. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1254345
5. Abdel-Moneim Eid, A.-M., et al. (2024). Impact of light wavelength on growth and welfare of broiler chickens – Overview and future perspective. *Annals of Animal Science*. https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0065
6. Khawar Hayat, et al. (2024). Impact of full-spectrum and infrared lighting on growth, oxidative stress, and cecal microbiota in broilers. *Antioxidants*, *13*(12), 1542. https://doi.org/10.3390/antiox13121542
7. Gündoğar, A., et al. (2024). Effects of abrupt and gradual light/dark switching on growth performance, behavior, villus development, meat characteristics, and immunity of broilers. *Animal Science Journal*, *95*(1), e13942. https://doi.org/10.1111/asj.13942
8. Kepko, O. I., Chernovol, M. I., & Lisovyi, I. O. (2021). Obgruntuvannia alhorytmu upravlinnia osvitlenniam ptashnyka [Substantiation of the poultry house lighting control algorithm]. *New development areas of digitalization at the beginning of the third millennium: conference proceedings*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 45–50. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-12 [in Ukrainian].
9. Utkina, T. Yu., Kiselov, V. Ye., & Riabtsev, V. H. (2021). Systema avtomatychnoho upravlinnia osvitlenniam ptakhofabryky v rezhymakh Svitanok-Zakhid [Automatic lighting control system of the poultry farm in Sunrise-Sunset modes]. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, (3), 5–13. https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2021.242241 [in Ukrainian].
10. Hanziuk, T. O., Prylipko, T. M., & Shuliar, A. L. (2025). Vplyv parametriv svitlovykh prohram na produktyvni i vidtvorni pokaznyky indychok [Impact of lighting program parameters on productivity and reproductive performance of turkeys]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika*, (47), 37–41. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-2.5 [in Ukrainian].
11. Fijalovych, L. M., & Paskevych, G. A. (2025). Peculiarities of the effective cultivation of broiler chickens. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, *27*(103), 3–9. https://doi.org/10.32718/nvlvet-a10301
12. Sakata, A. J., & Siqueira, J. A. C. (2024). Lighting in broiler poultry houses: optimization for growth, welfare and sustainability. *Revista Caribeña*, *13*(12). https://doi.org/10.55905/rcssv13n12-007
13. Wu, Y., et al. (2022). Light regimen on health and growth of broilers: an update review. *Poultry Science*, *101*(1), 101545. https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101545
14. Raziq, F., et al. (2021). Effect of light sources on productivity, welfare aspects, and economic evaluation of commercial layers. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, *45*(1), 176–190. https://doi.org/10.3906/vet-2009-23
15. Khonitan, D., et al. (2025). Impact of environmental factors on poultry production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1482*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1482/1/012027
16. Soliman, A. S., et al. (2023). Effect of different lighting sources on the performance of broiler breeder hens. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, *11*(3). https://doi.org/10.31893/jabb.23026
17. Remonato Franco, B. M., et al. (2022). Light wavelength and its impact on broiler health. *Poultry Science*, *101*(12), 102178. https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102178
18. Wang, S. Y., et al. (2024). Light demand characteristics, production performance, and changes in the feeding patterns of broilers. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *17*(2), 68–73. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241702.7411
19. Kepko, O. I., Lisovyi, I. O., & Kovalchuk, Yu. O. (2023). Strukturno-lohochne skhema avtomatychnoi systemy upravlinnia zamknutoiu systemoiu opalennia ta ventyliatsii teplyts [Structural and logical scheme of the automatic control system for the closed heating and ventilation system of greenhouses]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (53), 56–62. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.294-304 [in Ukrainian].

Oleg Kepko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisovyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Uman National University, Uman, Ukraine

Automation of Lighting Modes to Improve the Reliability and Efficiency of Poultry Farming

The article aims to improve the economic efficiency of poultry farming and ensure the proper physiological state of birds by theoretically substantiating and developing an automated lighting control system. The research solves the problem of optimizing the lighting environment considering the daily and technological cycles of broiler growing. Special focus is placed on enhancing the operational reliability of the lighting equipment.

During the research, an objective function of management efficiency was substantiated, based on maximizing productivity while minimizing costs for feed, electricity, and lamps. A daily lighting schedule was developed, maintaining reduced background illumination and raising it to the zootechnical norm exclusively during feedings. To ensure a smooth transition, an energy-saving three-stage model of voltage change in the "sunrise-sunset" modes was proposed: an impulse jump to 60 V, a linear increase from 60 to 200 V, and a final transition to 230 V. This creates an illusion of a smooth dawn for the bird's vision while significantly limiting inrush currents and protecting lamps from degradation. The control algorithm was formulated as a synchronous automaton with memory, adapting parameters to the bird's age. Based on this, a functional block diagram of the automated system was developed.

The application of the developed automated system allows for complex optimization of the broiler rearing process. It is proved that the proposed three-stage simulation of "sunrise" and "sunset" minimizes physiological stress, reduces pecking, and increases the operational reliability of the installation. Maintaining poultry at a reduced illumination between feedings provides a direct reduction in energy consumption, reduces feed consumption, and decreases dust concentration. This algorithm increases the overall production efficiency.
keywords automation, lighting mode, poultry farming, energy efficiency, operational reliability, control algorithm

Одержано (Received) 22.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.43:620.194.3 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).268-280

С.Ф. Посонський, доц., канд. техн. наук, **О.П. Бабак,** доц., канд. техн. наук,
А.А. Вичавка, канд. техн. наук
Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна
e-mail: p.s.f@ukr.net

Вплив відкладень на характеристики розпилення паливних форсунок та ефективність їх ультразвукового очищення на стенді AUTOOL CT160

У статті досліджено вплив експлуатаційних відкладень на характеристики розпилення паливних форсунок бензинових двигунів і оцінено ефективність їхнього відновлення методом ультразвукового очищення. Проаналізовано механізми погіршення сумішоутворення, зокрема укрупнення крапель і нерівномірність подачі пального.

Проведено стендову діагностику форсунок у різних технічних станах: нових, після експлуатації та після очищення. Встановлено, що відкладення знижують продуктивність і стабільність роботи форсунок, тоді як ультразвукове очищення ефективно відновлює їх робочі параметри до значень, близьких до початкових. Отримані результати підтверджують доцільність регулярної діагностики та очищення форсунок.

паливна форсунка, розпилення палива, відкладення, ультразвукове очищення, діагностика, продуктивність інжектора, сумішоутворення

Постановка проблеми. Система безпосереднього вприскування пального вважається однією з найсучасніших серед бензинових паливних систем. Її особливість полягає у тому, що паливо подається прямо в камеру згоряння, минаючи впускний тракт. Основну роль у цьому процесі відіграють форсунки високого тиску, які повинні забезпечити надзвичайно точне і дрібне розпилення пального впродовж дуже короткого часу.

Форсунки мають адаптувати режим розпилення відповідно до способу формування паливно-повітряної суміші: при пошаровому сумішоутворенні впорскування здійснюється поблизу свічки запалювання, а при гомогенному чи збідненому режимі – пальне має рівномірно розподілятись по всій камері згоряння.

Інжекторні двигуни внутрішнього згоряння нового покоління функціонують в умовах значних температурних і тискових навантажень у камері згоряння. Через це на форсунках з часом можуть утворюватися відкладення – як на зовнішній, так і на внутрішній частині сопел. Такі забруднення знижують витрату палива, порушують геометрію факела розпилення й погіршують ефективність подачі пального [1].

Накопичення відкладень на форсунках інжектора призводить до погіршення якості розпилення палива та зменшення об’єму потоку при однаковій тривалості імпульсу впорскування [2]. Це, у свою чергу, негативно впливає на процес формування паливно-повітряної суміші, ефективність згоряння і загальну стабільність роботи двигуна.

© С. Ф. Посонський, О. П. Бабак, А. А. Вичавка, 2026

Результати попередніх досліджень свідчать, що у форсунках із забрудненнями можуть спостерігатися суттєві відмінності у структурі розпилення пального. Це пояснюється тим, що відкладення формуються в різний спосіб навіть за однакових експлуатаційних умов. Отже, питання своєчасної діагностики та очищення інжекторів залишається важливим для підтримання належного функціонування бензинових двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зниження якості розпилення та виникнення ефекту змочування стінок камери згоряння через надмірне збільшення довжини факела розпилення можуть бути чинниками утворення сажі. У зв’язку з цим багато дослідників приділяли увагу впливу відкладень на параметри розпилення з метою запобігання таким негативним явищам. Наприклад, у дослідженні [3] було експериментально проаналізовано, як забруднення форсунок впливають на властивості розпилення.

Формування паливно-повітряної суміші при частоті обертання 1200 об/хв і тиску впорскування 150 бар було досліджено шляхом моделювання на основі емпіричних даних. У ході дослідження з’ясувалося, що наявність відкладень спричиняла зменшення кількості пального, яке впорскується, а також призводила до подовження факела розпилення. Це супроводжувалося збільшенням розміру крапель та їх швидкості, що пояснювалося зменшенням ефективної площі проходу через сопло через забруднення. Крім того, дослідження показало, що через відкладення відбувалося більше потрапляння палива на поверхні поршня та стінки циліндра, що спричиняло деформацію факела розпилення. Як наслідок – сумішоутворення ставало нерівномірним, що проявлялося у нестабільній роботі двигуна.

У дослідженні [4] було проаналізовано роботу забруднених форсунок, які мали ширину імпульсу впорскування на 8 % більшу, ніж у чистих, за умов обертів двигуна 1500 об/хв і повного навантаження. Результати показали, що в таких умовах продуктивність двигуна знижувалася на 1 %, тоді як питома витрата пального на гальмівну потужність зростала на 2 % у порівнянні з роботою двигуна з очищеними форсунками.

У схожому дослідженні [5] вивчалася форсунка, яка зазнала закоксування після 55 годин експлуатації. Експеримент проводився при навантаженні, що відповідало середньому ефективному тиску (BMEP) 3 бар і швидкості 2000 об/хв. Встановлено, що наявність відкладень у форсунці викликала подовження фази згоряння та зростання питомої витрати пального на гальмування. При цьому загальна ефективність процесу згоряння палива зменшилася.

У дослідженні [6] було розглянуто процес розпилення палива поблизу сопла типового забрудненого інжектора системи GDI. З’ясувалося, що наявні в каналах форсунки відкладення можуть суттєво погіршувати якість розпилення та бути однією з основних причин підвищення рівня викидів сажі. Виявлено, що взаємодія між забрудненнями та струменем палива спричиняє низку негативних ефектів: спотворення структури факела розпилення, накопичення залишкового пального в зоні сопел і самих відкладеннях, утворення великих крапель, розбризкування та зв'язування палива.

Через знижену ефективність роботи забрудненої форсунки навіть за підвищеного тиску впорскування зберігалася тенденція до утворення великих крапель та крапельного зв’язку. На основі отриманих результатів дослідники дійшли висновку, що збільшення тиску подачі палива не здатне компенсувати втрати у якості розпилення при забрудненні форсунки. Крім того, частина крапель залишалася у підвішеному стані поблизу наконечника інжектора, а деякі переміщувалися до його поверхні, спричиняючи змочування кінчика форсунки.

У роботі [7] дослідники проаналізували особливості розпилення палива, газових викидів і концентрацію твердих частинок у двигуні з безпосереднім упорскуванням

(GDI) із використанням форсунки, яка зазнала закоксування після 30 годин роботи. Встановлено, що при різних параметрах ширини імпульсу й тиску впорскування масова витрата палива у випадку забрудненої форсунки була меншою на 2…8 % порівняно з чистою. Крім того, довжина проникнення струменя пального зросла на 6…20 %, а середній розмір крапель та рівень викидів вуглеводнів збільшилися приблизно на 36 % і 30 % відповідно.

В іншому дослідженні [8] було проведено чисельне моделювання із застосуванням тривимірної обчислювальної гідродинаміки (CFD) для аналізу впливу відкладень на характер потоку в зоні сопла і розвиток факела розпилення. Згідно з отриманими результатами, наявність відкладень у вигляді розтруба подовжує внутрішню геометрію отвору, що знижує інтенсивність утворення турбулентної кінетичної енергії на виході. Це, своєю чергою, послаблює ефективність розпилення. Дослідники також відзначили, що у закоксованих форсунок збільшується довжина факела та зменшується кут розпилення.

Поверхня наконечника форсунки відіграє важливу роль у процесі утворення відкладень. У дослідженні [9] вивчався вплив температури цієї поверхні на особливості осідання бензинових залишків при контакті з гарячим металом. Було встановлено, що температурний режим поверхні суттєво впливає на процес випаровування бензинових крапель, а також на характер формування відкладень. З’ясувалося, що форма та структура осаду змінюють інтенсивність випаровування пального. Дослідники зафіксували наявність двох пікових значень у зміні кількості відкладень зі зростанням температури. Крім того, аналіз показав, що склад і структура відкладень у цих піках значно відрізнялися, що свідчить про відмінність хімічних реакцій і компонентів, які беруть участь у їх утворенні при різних температурних умовах.

Постановка завдання. Таким чином метою роботи є комплексна оцінка впливу забруднень на характеристики розпилення форсунок Bosch 0280158117 EV14, визначення наслідків експлуатації на 1000 км та ефективності відновлення параметрів після ультразвукового очищення Titan Cleaner на стенді AUTOOL CT160, з метою забезпечення стабільної роботи паливної системи та оптимальної витрати пального.

Виклад основного матеріалу. Огляд і очищення форсунок у бензинових двигунах є ключовими процедурами технічного обслуговування, що забезпечують стабільну роботу паливної системи, оптимальну витрату пального та відповідність екологічним нормам. У таблиці 1 представлено основні види несправностей і відмов, що найчастіше виникають у форсунках.

Розглянемо основні методи діагностики паливних форсунок [10].

1. Вимірювання опору обмотки форсунки. Проводиться мультиметром. Нормальний опір: від 12 до 16 Ом (для більшості інжекторів). Відхилення свідчить про обрив або замикання обмотки.

2. Прослуховування "клацання" форсунок. За допомогою стетоскопа або викрутки перевіряється, чи працює електромагнітний клапан – чути характерне клацання при подачі імпульсу.

3. Сканування через діагностичний роз’єм (OBD-II). Зчитуються коди помилок і параметри (тривалість імпульсу впорскування, корекції паливоподачі). Дозволяє виявити несправності, наприклад P0204.

4. Тестування на стенді. Перевірка продуктивності, якості розпилення, рівномірності подачі пального. Найбільш точний метод, використовується у спеціалізованих СТО.

5. Аналіз роботи двигуна. Ознаки несправних форсунок: нестабільна робота на холостому ходу, падіння потужності, підвищена витрата палива, димність.

Таблиця 1 – Типові несправності та відмови форсунок

Механічні	Електричні	Гідравлічні
Руйнування, або втрата жорсткості пружини	Пошкодження обмотки соленоїда	Зменшення пропускної здатності
Деформація або руйнування клеми чи замка клеми	Пробій на масу або міжвиткове замикання	Втрата герметичності
Наявність тріщини у корпусі або розпилювачі	Окислення контактної групи	Погіршення якості розпилювання

Джерело: розроблено на підставі [10]

Методи очищення форсунок:

1. Хімічне очищення без зняття (промивка через паливну систему). Спеціальна рідина заливається в бак або подається через стенд. Проводиться на працюючому двигуні. Перевага: швидко і зручно. Недолік: не завжди ефективно для сильно забруднених форсунок.

2. Очищення на стенді з імпульсною подачею очищувача. Форсунки демонтуються та підключаються до тестової установки. Через них під тиском пропускається спеціальна рідина з одночасною подачею імпульсів. Дозволяє видалити нагар і смоли навіть з форсунок зі складними забрудненнями.

3. Ультразвукове очищення, вважається найефективнішим методом. Форсунки занурюють у ванну з розчином, який піддається впливу ультразвукових хвиль. Процес кавітації руйнує відкладення на внутрішніх і зовнішніх поверхнях.

Періодична перевірка та очищення форсунок є важливою складовою підтримання ефективної роботи двигуна, сприяє зниженню витрати пального й зменшенню кількості шкідливих викидів в атмосферу. Найрезультативнішими методами очищення вважаються стендовий спосіб і ультразвукова обробка.

Щодо принципу дії ультразвукового очищення, він базується на використанні пружних механічних коливань, частота яких зазвичай становить від 18 до 120 кГц. Для генерації таких хвиль застосовуються ультразвукові перетворювачі – основні елементи систем, що створюють ультразвук. При проходженні через рідке середовище ці коливання спричиняють чергування фаз стиснення й розрідження, що приводить до інтенсивного перемішування рідини та ефективного видалення забруднень із поверхні елементів.

Коли щільність ультразвукового потоку в рідкому середовищі перевищує значення 1…2 Вт/см², виникає ефект кавітації. У цьому процесі утворюються дрібні газові бульбашки, які швидко руйнуються, створюючи мікро вибухи. Ці явища значно підсилюють очищувальну дію ультразвуку. Варто зазначити, що частинки рідини мають більшу здатність до переміщення, ніж у твердих тілах, однак вони взаємодіють між собою сильніше, ніж у газоподібному середовищі, через більш виражені міжмолекулярні сили.

Наприклад, вода здатна випаровуватись при різних температурах, однак її кипіння відбувається лише при 100 °C за умови, що тиск пари дорівнює одній атмосфері. У разі впливу на рідину ультразвуку високої інтенсивності навіть при кімнатній температурі може розпочатися процес утворення газових бульбашок – це є початковим етапом кавітаційного явища.

У процесі проходження ультразвукових хвиль крізь рідке середовище, на стадії розрідження (фаза 1), утворюються мікроскопічні газові порожнини. Ці бульбашки збільшуються в об’ємі до завершення фази зниженого тиску, що є початком кавітаційного процесу. Наступна стадія – фаза стиснення (фаза 2), під час якої тиск різко зростає, чинячи вплив на бульбашки. Це призводить до стрімкого підвищення

температури газу в їхньому об'ємі (фаза 3), аж до моменту, коли бульбашки руйнуються.

Руйнування бульбашок завершується явищем імплозії – внутрішнім вибухом, який супроводжується вивільненням значної кількості енергії (фаза 4). Ця енергія активно діє на поверхню об’єкта, що підлягає очищенню. У результаті проявляється комбінований ефект: з одного боку – механічна дія у вигляді високочастотних мікровібрацій (до 50 тисяч коливань за секунду), а з іншого – посилена хімічна взаємодія мийного середовища з поверхнею деталі. Саме цей комплексний вплив лежить в основі принципу роботи ультразвукової очистки.

Одним із сучасних стендів, що використовується для перевірки та ультразвукового очищення паливних форсунок, є AUTOOL CT160 (рис.1–4). Це професійне багатофункціональне обладнання, яке поєднує ультразвукову технологію очищення з розумною мікрокомп’ютерною системою контролю тиску в паливній магістралі [11]. Пристрій підтримує дев’ять тестових режимів, а також режим очищення, дозволяючи моделювати різні умови роботи двигуна, проводити глибоке очищення та перевіряти працездатність інжекторів.

Модель CT160 сумісна з різними типами інжекторів – зокрема GDI, EFI, FSI – завдяки підтримці трьох варіантів робочої напруги: 12 В, 70 В та 120 В. Це дозволяє застосовувати пристрій для обслуговування інжекторів провідних автомобільних марок, включаючи Mercedes-Benz, BMW, Audi, Porsche і Ford. Крім цього, стенд оснащено функцією автоматичного розпізнавання напруги інжектора. У разі неправильного вибору напруги система миттєво сповістить користувача, запобігаючи можливому пошкодженню обладнання.

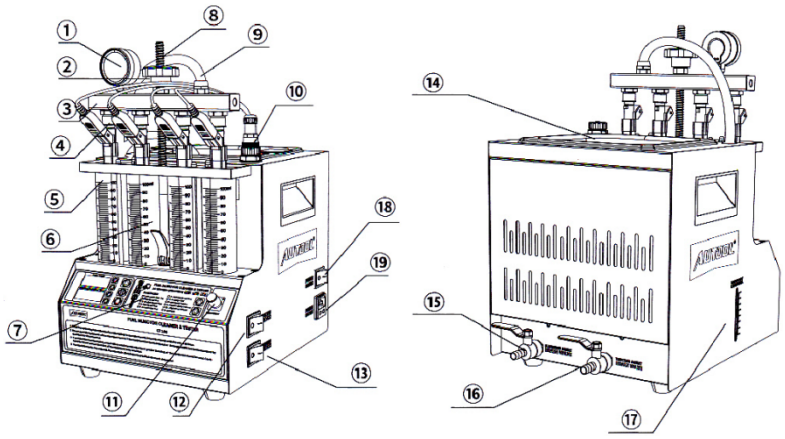


Рисунок 1 – Елементи приладу AUTOOL CT160:
1 – манометр; 2 – контргайка; 3 – масляна рампа; 4 – верхній патрубок впуску мастила; 5 – скляний мірний циліндр; 6 – ручка для зливу мастила; 7 – панель керування; 8 – замок; 9 – мастило відвідний патрубок; 10 – сигнальний провід; 11 – ручка регулювання тиску; 12 – вимикач опалення; 13 – ультразвуковий перемикач; 14 – бак ультразвукового очищення; 15 – вентиль зливу миючого засобу; 16 – кран зливу випробувального засобу; 17 – вимірювач рівня рідини; 18 – вимикач живлення; 19 – розетка.
Джерело: розроблено на підставі [11]

Ще однією корисною особливістю CT160 є наявність функції інтелектуального підігріву: рідина для очищення автоматично нагрівається до температури 50 °C, що підвищує ефективність мийного процесу та сприяє кращому видаленню забруднень.

Ключові характеристики та переваги пристрою:

1) Ультразвукова технологія очищення.

Пристрій AUTOOL CT160 застосовує високоефективну ультразвукову систему очищення, яка створює кавітаційний ефект у рідкому середовищі за допомогою високочастотних коливань. Завдяки цьому можливо делікатно, але глибоко очищати

важкодоступні ділянки інжектора від забруднень, не пошкоджуючи при цьому його поверхню.

2) Автоматичне підтримання постійної температури.

Стенд обладнано функцією інтелектуального підігріву, яка дозволяє автоматично доводити миючий розчин до оптимальної робочої температури 50 °C. Такий підхід підвищує хімічну активність рідини, сприяючи більш ефективному видаленню вкрай стійких відкладень із внутрішніх каналів паливної форсунки.

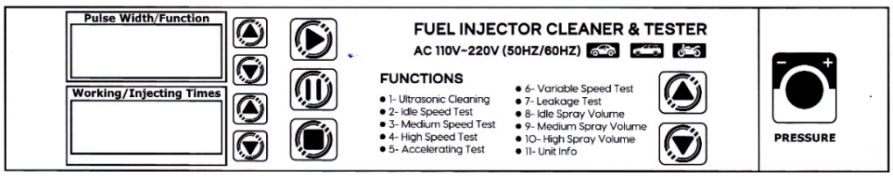


Рисунок 2 – Панель керування приладу AUTOOL CT160.

Джерело: розроблено на підставі [11]

Пристрій AUTOOL CT160 підтримує 9 режимів тестування та один режим очищення, що дозволяє проводити повноцінну діагностику і обслуговування паливних форсунок.

1. Тестування на холостому ходу (0…20 мс) – моделювання роботи двигуна при мінімальних обертах дозволяє оцінити, як форсунка функціонує в режимі холостого ходу.

2. Тест на середніх обертах (0…7,5 мс) – перевірка роботи інжектора в умовах стабільного середнього навантаження.

3. Тестування на високих обертах (0…4 мс) – імітація роботи двигуна на високій швидкості з метою оцінки продуктивності форсунки.

4. Тест прискорення – моделюється перехід від спокійного стану до активного прискорення, щоб перевірити, наскільки швидко й точно працює форсунка в динамічних умовах.

5. Перевірка на герметичність – відтворення умов тиску в паливній системі під час роботи двигуна для виявлення можливих витоків.

6. Оцінка об’єму впорскування при холостому ході – імітація мінімальних обертів двигуна для визначення об’єму пального, яке розпилює інжектор.

7. Оцінка об’єму впорскування на середніх обертах – перевірка ефективності впорскування під час помірного навантаження двигуна.

8. Оцінка об’єму впорскування на високій швидкості — визначення об’єму палива, що подається форсункою при максимальному навантаженні.

9. Імпульсне тестування – перевірка інжектора шляхом моделювання змінного навантаження та частоти холостого ходу для аналізу його реакції на різкі зміни в роботі двигуна.

10. Очищення ультразвуком – очищення здійснюється за допомогою ультразвукових хвиль, які передаються до форсунок через кабель адаптера імпульсів. Завдяки цьому відбувається ефективне усунення нагару та забруднень з внутрішніх поверхонь інжектора.

AUTOOL CT160 оснащено яскравим цифровим дисплеєм з підсвічуванням високої роздільної здатності, а також зручними графічними кнопками, що забезпечують легке та інтуїтивне керування пристроєм. У межах встановлених параметрів користувач має змогу вільно налаштовувати тиск під час тестування, тривалість циклів та ширину імпульсів згідно з потребами.

Додаткові функціональні елементи пристрою наступні.

Клапан зливу очищувальної рідини дозволяє швидко відводити використану рідину з подальшою її утилізацією та очищенням резервуару. Датчик контролю рівня рідини забезпечує постійний моніторинг кількості тестової рідини в системі, сигналізуючи про необхідність її поповнення. Підсвітка скляної вимірювальної трубки дає змогу точно спостерігати за ходом тестування навіть при недостатньому освітленні. Зручна бічна ручка покращує мобільність пристрою, забезпечуючи легке транспортування та комфорт при переміщенні.

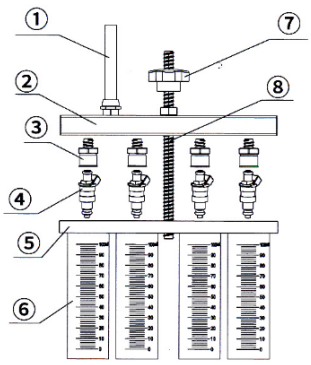


Рисунок 3 – Схема складових елементів стенду: 1 – трубопровід відводу палива; 2 – паливна рейка; 3 – верхній вхідний патрубок; 4 – форсунки; 5 – опора верхньої плити; 6 – скляний мірний циліндр; 7 – контргайка; 8 – гвинтова напрямна.
Джерело: розроблено на підставі [11]



Рисунок 4 – Загальний вигляд стенду з форсунками перед початком діагностики.
Джерело: розроблено автором

Діагностика форсунок. Ця функція призначена для виявлення розпилення, крапання, блокування, стану кута впорскування палива паливних форсунок, а також розміру та балансу впорскування палива кожної паливної форсунки на різних швидкостях. Для діагностики використаємо форсунки Bosch 0280158117 EV14 – це сучасна електромагнітна паливна форсунка бензинових двигунів із сімейства EV14, яка широко використовується як у серійних, так і в тюнінгованих системах упорскування. Вона сумісна з більшістю професійних стендів перевірки форсунок, зокрема типу AUTOOL CT160. Для діагностики використаємо два комплекти форсунок (по 4 штуки). Один новий комплект, а другий – форсунки з двигуна автомобіля, що пройшов 1000 км пробігу.

Порядок виконання діагностики наступний:

1. Переконайтеся, що ручка для зливу мастила відкрита, скористайтеся лійкою та додайте досліджувану рідину в обладнання через скляне віконце та зверніть увагу на контроль швидкості потоку під час додавання, щоб уникнути переливання. Щоразу додавайте 1 пляшку (приблизно 1000 мл) тестового засобу.

2. Встановіть паливну форсунку згідно рисунку 4.

3. Виконайте тест холостого ходу наступним чином:

1) Переконайтеся, що форсунка, яку потрібно перевірити, встановлена належним чином і сигнальний дріт підключено.

2) Виберіть «02 Idle Speed Test» (тест холостого ходу).

3) Натисніть клавіші робочого часу вгору та вниз, щоб встановити час. (Зазвичай встановлено на 2 хвилини).

4) Натисніть кнопку «start» (пуск), щоб почати роботу.

5) Поверніть ручку регулювання тиску, щоб відрегулювати тиск на 0,25…0,3 МПа. (В електронній системі впорскування загальний тиск палива працює на рівні 0,25…0,3 МПа)

6) Натисніть клавіші вгору та вниз, щоб вибрати відповідну величину імпульсу. (Системне значення за замовчуванням становить 3 мс).

7) Робочий час поступово скорочується. Коли таймер покаже «0», система автоматично зупиняється. Результати вимірювань занести в табл. 2.

4. Виконайте тест середньої швидкості наступним чином:

1) Виберіть «03 Medium Speed Test» (Тест середньої швидкості).

2) Натисніть кнопку запуску.

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3.

5. Виконайте тест високої швидкості.

1) Виберіть «04 High Speed Test» (Тест високої швидкості).

2) Натисніть кнопку запуску.

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3.

6. Виконайте тест на прискорення наступним чином:

1) Виберіть «05 Accelerating Test».

2) Натисніть кнопку запуску.

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3. Результати вимірювань занести в табл. 2.

7. Виконайте тест на перевірку швидкості наступним чином:

1) Виберіть «06 Variable Speed Test» (Тест змінної швидкості).

2) Натисніть кнопку запуску. Тиск палива, робочий час і ширина імпульсу встановлюються системою автоматично. Система часу за замовчуванням використовує цикл 10 секунд, і користувачеві не потрібно встановлювати його окремо. Система автоматично і безперервно циклічно виконає три рази, щоб імітувати робочі умови та об’єм уприскування палива паливної форсунки, коли двигун працює на холостому ходу (750 об/хв), на середній швидкості (4500 об/хв) і на високій швидкості (7500 об/хв). Результати вимірювань занести в табл. 3.

8. Виконайте тест на герметичність форсунки наступним чином:

1) Виберіть «07 Leak Test» (Тест на герметичність).

2) Щоб встановити час, натисніть кнопки вгору та вниз. (Зазвичай встановлено на 1 хвилину)

3) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 3 – 7 пункту 3. Величина імпульсу за замовчуванням становить 3 мс, не потрібно встановлювати її знову.

4) Виконати візуальну перевірку підтікання палива з форсунки, та встановити об’єм. Результати вимірювань занести в табл. 2.

9. Виконайте перевірку об’єму розпилення на холостому ходу наступним чином:

1) Виберіть «08 Idle Spray Volume» (Об'єм розпилення на холостому ходу).

2) Натисніть кнопки вгору та вниз, щоб встановити кількість разів. (Зазвичай встановлено 2000 разів)

3) Натисніть на рукоятку зливу палива, щоб спостерігати за об’ємом вприскування палива.

4) Натисніть кнопку запуску, щоб розпочати тест.

5) Після тесту підніміть зливну ручку та помістіть тестовий засіб назад у бак.

10. Виконайте тест розпилення на середній швидкості наступним чином:

1) Виберіть «09 Medium Spray Volume» (Об'єм розпилення на середній швидкості).

2) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 2 – 5 пункту 9.

11. Виконайте високошвидкісний об'ємний тест розпилення наступним чином:
1) Виберіть «10 High Spray Volume» (Об'єм розпилення на високій швидкості).
2) Решта операцій узгоджуються з підпунктами 2 – 5 пункту 9.

Таблиця 2 – Результати вимірювання прямого об’єму впорскування форсунок

Режим тестування	Продуктивність форсунок на режимах роботи, мл.											
	Нові форсунки				Форсунки з пробігом 1000 км				Форсунки після УЗО			
№ Форсунки	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
«02 Тест холостого ходу»	72	73	72	74	68	66	65	67	71	72	71	73
«03 Тест середньої швидкості»	78	79	77	80	73	71	70	72	77	78	76	79
«04 Тест високої швидкості»	86	87	85	88	80	78	77	79	85	86	84	87
«05 Тест на прискорення»	81	82	80	83	75	73	72	74	80	81	79	82
«07 Тест на герметичність»	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	0
«08 Об'єм розпилення на холостому ходу»	18,4	18,7	18,1	18,9	16,2	15,9	15,5	16,0	18,1	18,3	17,8	18,5
«09 Об'єм розпилення на середній швидкості»	23,3	23,7	22,9	23,9	21,1	20,6	20,2	20,8	22,9	23,1	22,4	23,3
«10 Об'єм розпилення на високій швидкості»	28,1	28,6	27,5	28,8	25,2	24,6	24,3	24,9	27,6	27,9	27,1	28,2

Джерело: розроблено автором

Ультразвукове очищення форсунок. Порядок виконання очищення наступний.

1. Підключити кабелі живлення установки і ультразвукової ванни.

2. Додати відповідну кількість миючого засобу в ультразвуковий резервуар і розподілити миючий засіб по дну підставки для чищення так, щоб рівень рідини був на 20 мм вище за голчатий клапан форсунки. Як миючий засіб в даній роботі використовується Titan Cleaner – спеціалізована рідина для ультразвукового очищення паливних форсунок, клапанів, форсунок високого тиску, карбюраторів та інших деталей паливної системи двигунів. Вона ефективно видаляє відкладення нагару, смоли, масло, забруднення та залишки палива навіть у важкодоступних каналах.

Таблиця 3 – Результати перевірки продуктивності розпилювання форсунок при змінній швидкості (06 Тест змінної швидкості)

Стан форсунок	№ форсунки	750 об/хв	4500 об/хв	7500 об/хв	Сумарно за цикл
Нові	1	18,2	23,1	28,0	69,3
	2	18,5	23,4	28,2	70,1
	3	18,0	22,9	27,6	68,5
	4	18,7	23,6	28,4	70,7
З пробігом 1000 км.	1	16,7	21,3	25,6	63,6
	2	16,2	20,9	24,8	61,9
	3	15,9	20,4	24,5	60,8
	4	16,5	21,0	25,1	62,6
Після УЗО	1	17,9	22,6	27,4	67,9
	2	18,2	22,9	27,7	68,8
	3	17,6	22,3	27,0	66,9
	4	18,4	23,0	27,9	69,3

Джерело: розроблено автором

3. Встановити заздалегідь відмиті форсунки на полку з отворами в ультразвуковій ванні.

4. З'єднати кожну форсунку з приладом за допомогою кабелю.

5. Включити живлення ультразвукової ванни.

6. Натисніть клавіші вибору пункту вгору та вниз на панелі керування приладу, рис. 3, щоб вибрати пункт «01 Ultrasonic cleaning» (ультразвукове очищення), а потім натисніть клавіші робочого часу вгору та вниз, щоб встановити час. (Система за замовчуванням становить 10 хвилин, якщо вам потрібно змінити час, ви можете використовувати клавіші вгору та вниз для зміни)

7. Натисніть кнопку запуску та увімкніть перемикач ультразвукового очищення збоку пристрою, щоб почати очищення. Під час роботи ви можете натиснути кнопку паузи, щоб призупинити роботу, або натиснути кнопку зупинки, щоб вийти.

8. Під час процесу очищення можна увімкнути перемикач нагріву збоку обладнання, щоб покращити ефект очищення. Час роботи поступово скорочується. Коли таймер покаже 0, система автоматично зупиняється.

9. Вийміть паливну форсунку з ультразвукового бака, протріть на ній рідину для чищення м’якою тканиною та готуйтеся до очищення наступної форсунки.

10. Виконайте діагностику очищених форсунок. Результати вимірювань занесіть в табл. 2 і 3.

Виконуючи аналіз отриманих даних, згідно таблиць 2 і 3, отримаємо наступні результати діагностики форсунок «Bosch 0280158117 EV14».

За результатами тесту холостого ходу (Idle Speed Test) нові форсунки показали стабільну і рівномірну подачу палива. Після 1000 км експлуатації зафіксовано зниження об’єму впорскування приблизно на 14 %, що свідчить про часткове звуження прохідних каналів. Після ультразвукового очищення продуктивність майже повністю відновилась (98 % від нових). Найбільша чутливість до забруднення спостерігається саме у режимі малої тривалості імпульсу. Встановлено, що холостий режим найбільш інформативний для виявлення початкового забруднення форсунки.

Тест середньої швидкості (Medium Speed Test) показав, що у нових форсунок подача стабільна, різниця між форсунками мінімальна. Після експлуатації зменшення об’єму становить близько 12 %, що вказує на зниження ефективної площі розпилення.

Після очищення відновлення становить близько 97 %, що підтверджує ефективність ультразвукової обробки. Балансування форсунок після очищення знаходиться в межах норми. Встановлено, що забруднення помітно впливає на продуктивність у середніх режимах, але компенсується очищенням.

Тест високої швидкості (High Speed Test) показав, що у нових форсунок забезпечується максимальна і рівномірна подача палива. Після 1000 км експлуатації зафіксовано зниження подачі приблизно на 12…13 %. Високошвидкісний режим менш чутливий до дрібних відкладень, але добре показує загальне зниження пропускної здатності. Після очищення продуктивність відновлюється до 98 %. Встановлено, що у високошвидкісному режимі головним індикатором несправності є загальна втрата пропускної здатності.

Тест прискорення (Accelerating Test) показав, що нові форсунки швидко реагують на зміну імпульсу без затримок подачі. Після експлуатації спостерігається незначне запізнення відкриття і зменшення миттєвої подачі. Після очищення динаміка впорскування відновлюється практично повністю. Встановлено, що забруднення впливає на швидкодію електромагнітного клапана та інерційність відкриття.

Тест змінної швидкості (Variable Speed Test: 750 / 4500 / 7500 об/хв) показав, що нові форсунки демонструють стабільну зміну продуктивності пропорційно режиму роботи. Після експлуатації зниження подачі фіксується на всіх швидкостях, найбільше – на низьких обертах. Після очищення характеристики подачі по всьому діапазону швидкостей відновлюються. Встановлено, що забруднення викликає нерівномірність подачі у широкому діапазоні навантажень двигуна.

Тест герметичності (Leak Test) показав, що нові форсунки повністю герметичні. Після експлуатації можливі мікропідтікання через частинки відкладень. Після очищення герметичність відновлюється. Встановлено, що забруднення може порушувати герметичність навіть без механічного зносу.

Тест на об’єм розпилення (Idle / Medium / High Spray Volume) показав, що нові форсунки демонструють стабільну подачу у всіх режимах. Після експлуатації зафіксовано системне зниження об’єму впорскування: холостий хід 14 %, середня швидкість 12 %, висока швидкість 12…13 %. Після ультразвукового очищення відновлення продуктивності становить 97…98 %.Встановлено, що основний ефект забруднення – зменшення ефективної площі проходу через сопло.

Висновки. За результатами діагностики встановлено, що навіть відносно невеликий пробіг (1000 км) призводить до зниження продуктивності форсунок внаслідок забруднення. Забруднення перш за все впливає на малу подачу палива, динаміку відкриття форсунки та рівномірність розпилення. Найбільш чутливими до забруднення є режими холостого ходу та змінного навантаження.

Ультразвукове очищення забезпечує практично повне відновлення гідравлічних характеристик форсунок. Комбінований ефект механічної дії кавітаційних мікровибухів та хімічної взаємодії мийного середовища забезпечує повне видалення відкладень із внутрішніх та зовнішніх поверхонь форсунок. Відновлюються динаміка відкриття, герметичність та рівномірність розпилення Різниця між очищеними і новими форсунками не перевищує 2…3 %, що відповідає нормі стендових випробувань.

Стендова діагностика з прямим вимірюванням об’єму є об’єктивним методом оцінки технічного стану форсунок. Регулярне очищення форсунок дозволяє: стабілізувати сумішоутворення, знизити витрату палива, покращити екологічні показники двигуна та запобігти нерівномірній роботі циліндрів.

Отримані результати можуть бути використані для вивчення ефекту різних марок пального та присадок на утворення відкладень і швидкість зносу форсунок.

Список літератури

1. Z. Zhang, et al. (2020). Effects of GDI injector deposits on spray and combustion characteristics under different injection conditions. *Fuel*, 278(5): 118094, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118094
2. H. Song et al. (2016). The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector. *Fuel*, 180(15), pp. 506-513, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.067
3. B. Wang, et al. (2017). Investigation of deposit effect on multi-hole injector spray characteristics and air/fuel mixing process. *Fuel*, 191, pp. 10-24, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.055
4. Joedicke, A., Krueger-Venus, J., Bohr, P., Cracknell, R. et al. (2012) Understanding the Effect of DISI Injector Deposits on Vehicle Performance. *SAE Technical Paper*, 2012-01-0391, https://doi.org/10.4271/2012-01-0391.
5. Ding, H., Zhang, W., Ma, X., Shuai, S. et al. (2017). The Impact of GDI Injector Deposits on Engine Combustion and Emission. *SAE Technical Paper*, 2017-01-2248, URL:https://doi.org/10.4271/2017-01-2248.
6. J. Zhou, et al. (2018). Characteristics of near-nozzle spray development from a fouled GDI injector Fuel, 219, pp. 17-29, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.070
7. C. Jiang et al. *(*2017). Effect of fuel injector deposit on spray characteristics, gaseous emissions and particulate matter in a gasoline direct injection engine. *Applied Energy*, 203, pp. 390-402, URL:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.020
8. C. Wang et al. *(*2014). Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine. *Applied Energy*, 132, pp. 178-191, URL:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.012
9. H. Song, et al. (2018). The effects of surface temperature on the deposit behaviors of gasoline on a hot surface. *Fuel*, 215 , pp. 111-122, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.017
10. Практичні основи діагностування автомобільних двигунів : навч. посіб. / Мигаль В. Д., Корогодський В. А., Воронков О. І., Нікітченко І. М. Харків : ХНАДУ, 2021. 412 с
11. AUTOOL CT160. URL: https://www.autooltech.com/ (дата звернення: 26.01.2026).

References

1. Z. Zhang, et al. (2020). Effects of GDI injector deposits on spray and combustion characteristics under different injection conditions. *Fuel*, 278(5): 118094, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118094
2. H. Song et al. (2016). The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector. *Fuel*, 180(15), pp. 506-513, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.067
3. B. Wang, et al. (2017). Investigation of deposit effect on multi-hole injector spray characteristics and air/fuel mixing process. *Fuel*, 191, pp. 10-24, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.055
4. Joedicke, A., Krueger-Venus, J., Bohr, P., Cracknell, R. et al. (2012) Understanding the Effect of DISI Injector Deposits on Vehicle Performance. *SAE Technical Paper*, 2012-01-0391, https://doi.org/10.4271/2012-01-0391.
5. Ding, H., Zhang, W., Ma, X., Shuai, S. et al. (2017). The Impact of GDI Injector Deposits on Engine Combustion and Emission. *SAE Technical Paper*, 2017-01-2248, URL:https://doi.org/10.4271/2017-01-2248.
6. J. Zhou, et al. (2018). Characteristics of near-nozzle spray development from a fouled GDI injector Fuel, 219, pp. 17-29, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.070
7. C. Jiang et al. *(*2017). Effect of fuel injector deposit on spray characteristics, gaseous emissions and particulate matter in a gasoline direct injection engine. *Applied Energy*, 203, pp. 390-402, URL:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.020
8. C. Wang et al. *(*2014). Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine. *Applied Energy*, 132, pp. 178-191, URL:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.012
9. H. Song, et al. (2018). The effects of surface temperature on the deposit behaviors of gasoline on a hot surface. *Fuel*, 215 , pp. 111-122, URL:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.017
10. Myhal, V. D., Korohodskyi, V. A., Voronkov, O. I., & Nikitchenko, I. M. (2021). Praktychni osnovy diahnostuvannia avtomobilnykh dvyhuniv : navch. posib. Kharkiv : KhNADU [in Ukrainian].
11. AUTOOL CT160. URL: https://www.autooltech.com/ .

Sergiy Posonskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Babak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatolij Vychavka,** PhD tech. sci.
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

The Influence of Deposits on the Fuel Injectors' Atomization Characteristics and the Efficiency of Their Ultrasonic Cleaning on the AUTOOL CT160 Stand

The article investigates the effect of operational deposits on the spray characteristics of gasoline engine fuel injectors and evaluates the effectiveness of their restoration by means of ultrasonic cleaning. The physical mechanisms of the mixture formation process deterioration are analyzed, in particular, an increase in the length of the spray torch, droplet enlargement, uneven fuel supply and combustion chamber surfaces' wetting. The results of modern studies, confirming the negative impact of contaminants on fuel consumption, combustion stability and the level of harmful emissions, are summarized.

The experimental part of the workpaper is devoted to bench diagnostics of injectors in various technical conditions: new, after operation and after ultrasonic cleaning. A set of tests, which included checking the tightness, uniformity of fuel supply, spray characteristics and injection volume in different operating modes, was carried out. It was found out that operational deposits lead to a decrease in injector performance, disruption of the spray torch structure and operation stability deterioration.

Ultrasonic cleaning proved to be an effective way of removing contaminants and restoring the main operating parameters of injectors to values close to their original ones. The results confirm the feasibility of injectors' regular diagnostics and cleaning injectors to maintain efficient engine operation and reduce harmful emissions.

fuel injector, fuel atomization, deposits, ultrasonic cleaning, diagnostics, injector performance, mixture formation

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 629.79; 621.793.7 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).280-292

О. М. Маковкін, доц., канд. техн. наук, **І. К. Вальчук**
Хмельницький національний університет, м.Хмельницький, Україна
e-mail: makovkinol@khmnu.edu.ua

Метрологічне та технологічне забезпечення якості при електроіскровому легуванні поверхонь деталей автомобільних двигунів

Виконано обґрунтування технологічної схеми формування зміцненого поверхневого шару деталей машин методом електроіскрового легування з урахуванням особливостей фізичних механізмів масопереносу матеріалу електрода, термічних процесів у зоні імпульсного розряду та стохастичного характеру формування мікрорельєфу поверхні. Встановлено закономірності впливу енергетичних параметрів процесу на формування мікрогеометрії поверхні, мікротвердості, товщини зміцненого шару та інтенсивності зношування. Визначено аналітичні зв'язки між режимами електроіскрового легування, структурно-фазовим станом поверхневого шару та експлуатаційними характеристиками деталей.

електроіскрове легування, поверхневий шар, мікротвердість, шорсткість, зносостійкість, енергетичні режими, технологія, обладнання

Постановка задачі. Якість робочих поверхонь деталей машин і різальних інструментів визначає їхні експлуатаційні характеристики, зокрема зносостійкість, довговічність і надійність роботи в умовах інтенсивних навантажень і підвищених температур. Вирішальну роль відіграє стан поверхневого шару — мікрогеометрія, структура, фазовий склад, рівень залишкових напружень і мікротвердість [1].

Сучасні методи поверхневого зміцнення дозволяють цілеспрямовано формувати властивості поверхневого шару. Одним із перспективних методів локального зміцнення

© О. М. Маковкін, І. К. Вальчук, 2026

є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке забезпечує формування твердих, зносостійких і адгезійно міцних поверхневих шарів [3]. Однак ефективність процесу визначається не лише технологічними параметрами, а й достовірністю вимірювання показників якості, що зумовлює необхідність метрологічного забезпечення [2, 4].

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених електроіскровому легуванню, питання комплексної оцінки взаємозв'язку параметрів мікрогеометрії поверхні, фізико-механічних характеристик зміцненого шару та інтенсивності зношування залишаються недостатньо вивченими. Особливої уваги потребує аналіз відтворюваності результатів, впливу похибок вимірювань і стабільності технологічних режимів на формування показників якості поверхневого шару. Розв'язання цих задач дозволяє підвищити керованість процесу електроіскрового легування та забезпечити прогнозованість експлуатаційних властивостей зміцнених поверхонь.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу енергетичних режимів електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару та розроблення метрологічно обґрунтованого підходу до їх оцінювання.

Методика дослідження. Для проведення експериментального дослідження впливу режимів електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару було виготовлено зразкову пластину спеціальної геометрії. Конструкцію зразка та контрольовані геометричні параметри наведено на рис. 1. На всіх етапах технологічного процесу виготовлення здійснювали контроль лінійних розмірів, що забезпечувало відтворюваність умов експерименту та стабільність геометрії зразків.

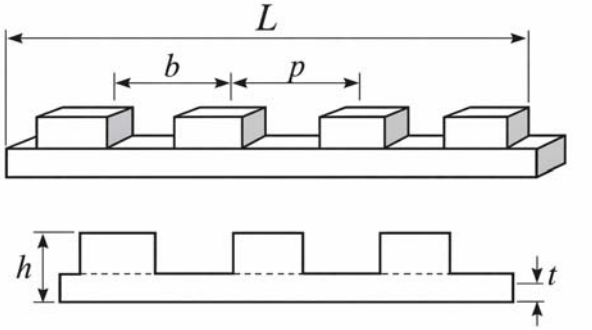


Рисунок 1 – Конструкція дослідної пластини та контрольовані геометричні параметри
Джерело: розроблено автором

На рисунку 1 наведено конструкцію експериментальної пластини, що використовувалася для дослідження впливу режимів електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару. Показано основні геометричні розміри зразка, які підлягали контролю на всіх етапах технологічного процесу виготовлення. До контрольованих параметрів належали габаритна довжина пластини, висота (товщина), крок між формоутворювальними елементами, ширина виступів, а також геометрія робочої поверхні.

Контроль зазначених параметрів забезпечував стабільність геометрії зразків, відтворюваність умов проведення експерименту та коректність подальшого аналізу результатів вимірювання шорсткості, мікротвердості та товщини зміцненого шару. Дотримання заданих допусків дозволило мінімізувати вплив геометричних відхилень на формування поверхневого шару та підвищити достовірність експериментальних результатів.

Перед нанесенням покриття поверхню зразків піддавали механічній обробці та підготовці з метою забезпечення необхідного стану поверхневого шару. Послідовність технологічних операцій підготовки зразків до електроіскрового легування наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Послідовність підготовки зразка до електроіскрового легування
Джерело: розроблено автором

Електроіскрове легування виконували на установці імпульсного типу при варіюванні енергетичних параметрів процесу. Схему формування поверхневого шару в зоні електроіскрового розряду наведено на рис. 3. Відомо, що ЕІЛ (а також близький за фізичною природою процес електроіскрового наплавлення/осадження) належить до імпульсних методів поверхневого модифікування, де короткочасні розряди забезпечують локальне плавлення, масоперенесення матеріалу електрода та надшвидке охолодження, унаслідок чого формується зміцнений шар з підвищеною мікротвердістю та зносостійкістю. У сучасних оглядових роботах підкреслюється, що ключовими керувальними факторами є енергія імпульсу, частота розрядів, тривалість обробки (або продуктивність/час впливу) та склад електродного матеріалу, які визначають інтенсивність масопереносу, мікрогеометрію поверхні та структурно-фазовий стан модифікованого шару [5–7].

Зі збільшенням енергії імпульсу, як правило, зростає товщина і суцільність сформованого шару та підвищується мікротвердість за рахунок інтенсифікації термічного впливу і легування, однак паралельно може зростати шорсткість через формування більш розвинутого мікрорельєфу (мікролунки, напливи, бризки розплаву). Для багатьох матеріалів і режимів встановлено, що структура шару після ЕІЛ є багатошаровою та включає поверхневий швидкозагартований (“білий”) шар, дифузійну (перехідну) зону та метал основи, а співвідношення цих зон змінюється залежно від енергії розряду й параметрів процесу [6, 7].

З урахуванням наведеного, у даному дослідженні варіювання енергетичних параметрів розряду розглядалося як інструмент керування комплексом показників якості поверхневого шару (Ra–HV–h) і, відповідно, прогнозування зносостійкості. Обґрунтування вибору діапазону режимів виконували з позицій забезпечення компромісу між зміцнювальним ефектом (зростанням HV і h) та обмеженням небажаного зростання шорсткості, що узгоджується з сучасними підходами до оптимізації ЕІЛ/ESD технологій [5, 8].

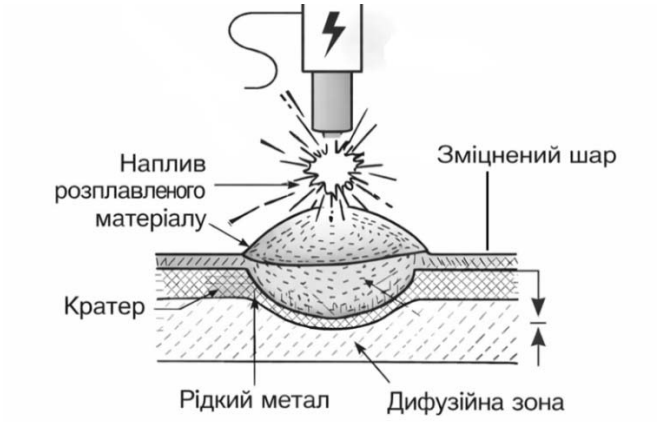


Рисунок 3 – Схема формування зміцненого шару при електроіскровому легуванні
Джерело: розроблено автором

Контроль параметрів якості поверхні здійснювали із застосуванням повірених засобів вимірювальної техніки, що забезпечувало метрологічну простежуваність та достовірність отриманих результатів. Вимірювання проводили в стабілізованих умовах температури та вологості, з дотриманням рекомендацій стандартів щодо підготовки поверхні та калібрування приладів.

Шорсткість поверхні визначали профілографом-профілометром Mitutoyo (рис. 4), який забезпечує високу точність і відтворюваність результатів. Вимірювання виконували вздовж напрямку обробки при довжині бази згідно з вимогами стандарту ISO 21920. Для кожного зразка проводили не менше трьох вимірювань, після чого визначали середнє значення параметрів Ra, Rz та Rt. Перед вимірюванням поверхню очищували від продуктів обробки та забруднень, що дозволяло мінімізувати вплив випадкових факторів на результати.

Мікротвердість зміцненого шару вимірювали за методом Віккерса при навантаженні HV (рис. 5) відповідно до стандарту ISO 6507. Відбитки наносили у поверхневому шарі з урахуванням вимог щодо відстані між ними та від краю зразка. Для підвищення достовірності результатів виконували серію вимірювань з подальшим статистичним опрацюванням даних. Оцінювали середнє значення мікротвердості та стандартне відхилення, що дозволяло оцінити однорідність зміцненого шару.

Товщину зміцненого шару визначали металографічним методом за мікрошліфами (рис. 6). Зразки піддавали шліфуванню, поліруванню та травленню для виявлення структури поверхневого шару. Вимірювання товщини проводили за допомогою оптичного мікроскопа з каліброваною шкалою. Значення визначали як середнє за декількома ділянками, що дозволяло врахувати нерівномірність формування шару та підвищити точність оцінювання.

Виконання вимірювань у серії повторень та статистичне опрацювання результатів дозволили оцінити випадкову складову похибки, тоді як систематичну похибку мінімізували шляхом калібрування засобів вимірювання та стабілізації умов експерименту. Такий підхід забезпечив високу відтворюваність результатів і достовірність встановлених закономірностей формування параметрів якості поверхневого шару при електроіскровому легуванні.

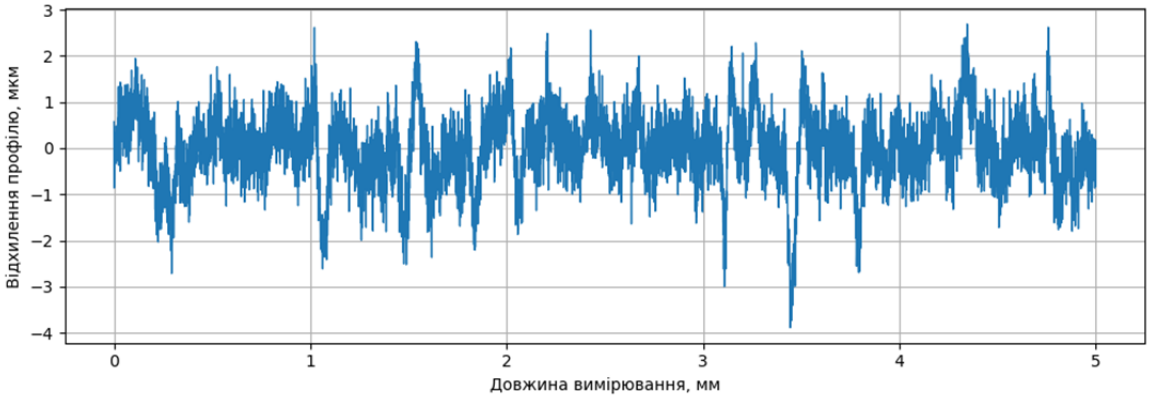


Рисунок 4 – Профілограма шорсткості поверхні досліджуваного зразка
Джерело: розроблено автором

На рисунку 4 наведено характерний профіль мікрогеометрії поверхні, отриманий у процесі вимірювання параметрів шорсткості профілографом-профілометром. По осі абсцис відкладено довжину бази вимірювання, по осі ординат — відхилення профілю поверхні від середньої лінії. Представлений профіль має стохастичний характер без періодичної повторюваності, що відповідає фізичній природі формування поверхневого шару після електроіскрового легування.

Наявність випадкових піків і западин обумовлена імпульсним характером електричних розрядів, локальним плавленням і швидким охолодженням матеріалу, а також нерівномірністю масопереносу при формуванні зміцненого шару. За отриманою профілограмою визначали основні параметри шорсткості поверхні — середнє арифметичне відхилення профілю Ra, висоту нерівностей Rz та повну висоту профілю Rt відповідно до вимог стандарту ISO 4287.

Характер профілограми підтверджує стохастичну природу формування мікрорельєфу поверхні при електроіскровому легуванні та узгоджується з отриманими значеннями параметрів шорсткості, що використовувалися для подальшого аналізу якості зміцненого поверхневого шару.

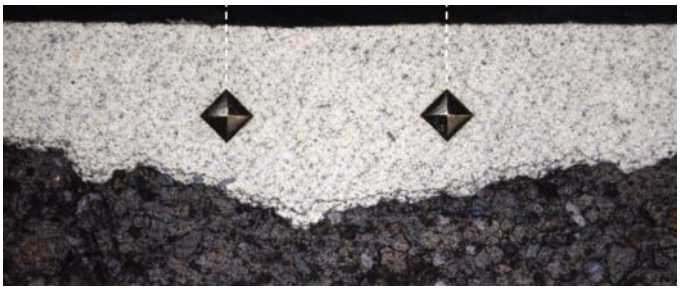


Рисунок 5 – Визначення мікротвердості зміцненого шару

Джерело: розроблено автором

На рисунку 5 наведено схему вимірювання мікротвердості зміцненого поверхневого шару методом Віккерса. Визначення мікротвердості здійснювали за допомогою алмазного індентора пірамідальної форми при навантаженні HV з подальшим вимірюванням діагоналей відбитка. Відбитки наносили у межах зміцненого шару з урахуванням вимог щодо мінімальної відстані між ними та від краю зразка, що забезпечувало коректність і відтворюваність результатів.

Отримані значення мікротвердості характеризують опір поверхневого шару пластичній деформації та є одним із основних показників ефективності процесу електроіскрового легування. Підвищення мікротвердості після обробки пов’язане з формуванням дрібнодисперсної структури, наявністю швидкозагартованого (“білого”) шару та дифузійним легуванням поверхні матеріалом електрода.

Серія повторних вимірювань дозволила визначити середнє значення мікротвердості та оцінити однорідність зміцненого шару, що є важливим критерієм стабільності технологічного процесу та якості сформованого поверхневого покриття.

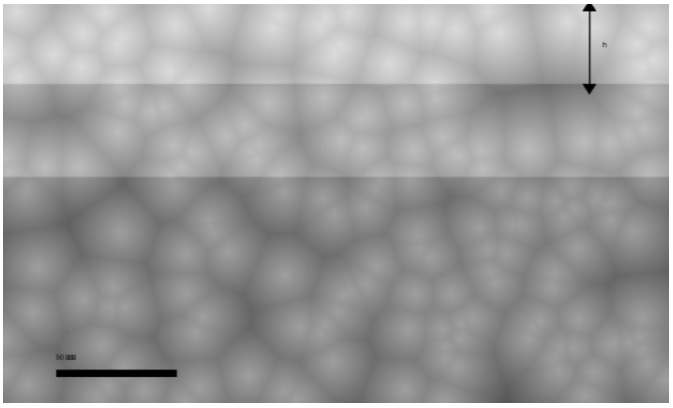


Рисунок 6 – Визначення товщини зміцненого шару металографічним методом

Джерело: розроблено автором

На рисунку наведено мікроструктуру поперечного шліфа зразка після електроіскрового легування, за якою визначали товщину сформованого зміцненого шару. У верхній частині зображення спостерігається модифікований поверхневий шар, що характеризується більш однорідною та дрібнодисперсною структурою, тоді як нижче розташована зона основного матеріалу. Межа між зміцненим шаром і основою визначається за зміною морфології та контрасту структури.

Металографічні шліфи виготовляли шляхом послідовного шліфування, полірування та травлення зразків для виявлення мікроструктури поверхневого шару. Вимірювання товщини зміцненого шару виконували за допомогою оптичного мікроскопа з каліброваною шкалою у кількох характерних точках, після чого визначали середнє значення. Такий підхід дозволяє врахувати нерівномірність формування шару та підвищує точність оцінювання.

Згідно з даними літератури, товщина зміцненого шару, сформованого методом електроіскрового легування, зазвичай становить 10–50 мкм залежно від енергії імпульсу, тривалості обробки, матеріалу електрода та умов тепловідводу [3, 5, 7]. У більшості випадків структура шару є багатозонною і включає поверхневий швидкозагартований (“білий”) шар товщиною 3–15 мкм, дифузійну (перехідну) зону та основний матеріал [5, 7]. Зі збільшенням енергії імпульсу та тривалості обробки товщина зміцненого шару зростає, що сприяє підвищенню зносостійкості, однак може супроводжуватися збільшенням шорсткості та внутрішніх напружень.

Отримані експериментальні результати узгоджуються з відомими літературними даними та підтверджують, що керування енергетичними параметрами електроіскрового легування дозволяє регулювати товщину зміцненого шару та забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики поверхні.

Кожне вимірювання виконували у трьох–п’яти повтореннях. Результат визначали як середнє значення, а відтворюваність оцінювали за стандартним відхиленням. Сумарна відносна похибка вимірювань становила: для шорсткості — до 5 %, мікротвердості — до 4 %, товщини зміцненого шару — до 6 %. Отримані значення похибок підтверджують достатній рівень метрологічної надійності результатів та відтворюваність технологічного процесу електроіскрового легування.

Результати дослідження. Встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу зростають товщина зміцненого шару та мікротвердість поверхні, що пояснюється інтенсифікацією теплових і дифузійних процесів у зоні розряду. Збільшення енергії імпульсу призводить до підвищення температури в мікрооб’ємі контакту, інтенсифікації масопереносу матеріалу електрода та більш глибокого термічного впливу на основу, що сприяє формуванню більш товстого та структурно модифікованого поверхневого шару. У результаті швидкісного нагрівання та надшвидкого охолодження формується дрібнодисперсна структура з підвищеною твердістю, а також так званий швидкозагартований (“білий”) шар, що характеризується високою зносостійкістю.

Водночас підвищення енергії імпульсу супроводжується зростанням параметрів шорсткості поверхні, що пов’язано з формуванням більш розвинутого мікрорельєфу — збільшенням розмірів мікролунок, напливів і бризок розплавленого металу. Нерівномірність локального плавлення та масопереносу при імпульсному характері розрядів зумовлює стохастичний характер формування поверхні, що підтверджується профілограмами (рис. 3–5).

Аналіз результатів показав, що мінімальний знос спостерігається при середньому режимі електроіскрового легування, який забезпечує оптимальне поєднання параметрів мікротвердості, товщини зміцненого шару та мікрогеометрії поверхні. За низьких енергетичних режимів формується тонкий і недостатньо

зміцнений шар, що знижує опір зношуванню, тоді як надмірне підвищення енергії імпульсу призводить до зростання шорсткості та внутрішніх напружень, що може спричиняти локальне руйнування покриття і підвищення інтенсивності зносу.

Отримані результати свідчать про наявність оптимального енергетичного режиму електроіскрового легування, при якому досягається компроміс між зміцненням поверхні та формуванням сприятливого мікрорельєфу. Встановлена закономірність узгоджується з даними сучасних досліджень, згідно з якими зносостійкість поверхні визначається комплексною взаємодією параметрів шорсткості, мікротвердості та товщини зміцненого шару, а не окремим показником.

Результати експериментальних досліджень, наведені в табл. 1, свідчать про суттєвий вплив енергетичних параметрів електроіскрового легування на формування показників якості поверхневого шару. Встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу відбувається закономірне зростання мікротвердості та товщини зміцненого шару, що пов’язано з інтенсифікацією теплових і дифузійних процесів у зоні розряду. Підвищення температури та тривалості термічного впливу сприяє більш глибокому легуванню поверхні, формуванню дрібнодисперсної структури та швидкозагартованого поверхневого шару, що забезпечує підвищення твердості та зносостійкості.

Таблиця 1 – Вплив енергетичного режиму електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару

Режим ЕІЛ	Енергія імпульсу, Дж	Ra, мкм	HV	Товщина шару h, мкм	Інтенсивність зносу, мг/м
М’який	0.18	0.55	680	12	0.84
Середній	0.32	0.82	840	22	0.42
Грубий	0.55	1.45	910	38	0.69

Джерело: розроблено автором

Разом із тим встановлено, що збільшення енергії імпульсу супроводжується зростанням параметрів шорсткості поверхні. Це зумовлено формуванням більш розвинутого мікрорельєфу, збільшенням розмірів мікролунок і напливів, а також стохастичним характером масопереносу матеріалу в умовах імпульсного розряду. Надмірне підвищення шорсткості може призводити до збільшення контактних напружень і погіршення трибологічних характеристик поверхні.

Аналіз отриманих результатів показав, що найменша інтенсивність зношування спостерігається при середньому енергетичному режимі електроіскрового легування. У цьому випадку досягається оптимальне поєднання підвищеної мікротвердості, достатньої товщини зміцненого шару та помірної шорсткості поверхні. За низьких режимів формується тонкий і недостатньо зміцнений шар, тоді як за високих режимів надмірна шорсткість і внутрішні напруження можуть спричиняти локальне руйнування поверхневого шару та підвищення зносу.

Отримані результати підтверджують наявність оптимального енергетичного режиму електроіскрового легування, при якому забезпечується мінімальний знос за рахунок збалансованого співвідношення параметрів Ra, HV та товщини зміцненого шару. Таким чином, зносостійкість поверхні визначається комплексною взаємодією параметрів мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневого шару, що узгоджується з сучасними уявленнями про механізми формування зміцнених поверхонь при імпульсних методах обробки.

Залежність, наведена на рис. 7, демонструє зростання параметра шорсткості поверхні Ra зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування. Встановлено, що при енергії імпульсу 0,18 Дж значення Ra становить приблизно 0,55 мкм, при 0,32 Дж — 0,82 мкм, тоді як при підвищенні енергії до 0,55 Дж шорсткість зростає до 1,45

мкм. Таким чином, у дослідженому діапазоні спостерігається майже 2,6-разове збільшення шорсткості поверхні.

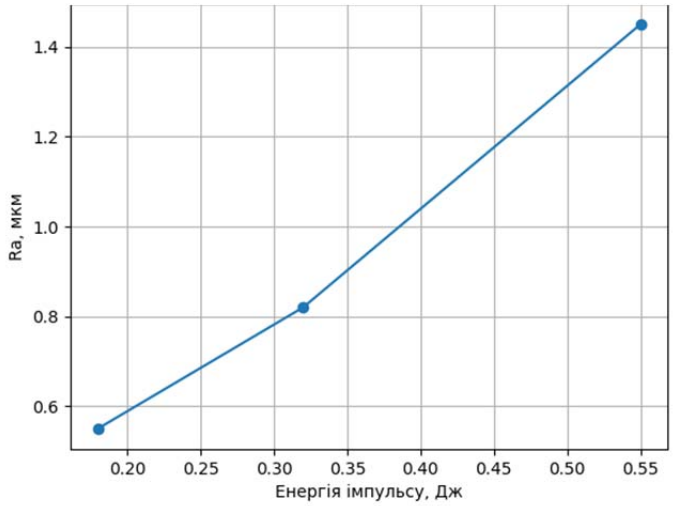


Рисунок 7 – Вплив енергії імпульсу на шорсткість Ra

Джерело: розроблено автором

Зростання Ra пояснюється збільшенням теплового впливу імпульсного розряду та інтенсифікацією процесів локального плавлення і масопереносу матеріалу. При підвищенні енергії імпульсу збільшується розмір мікролунок, висота напливів і об'єм розплавленого металу, що формує розвиненіший мікрорельєф поверхні. Стохастичний характер формування мікронерівностей при імпульсному розряді призводить до збільшення амплітуди профілограми та, відповідно, значення параметра Ra.

Отримані результати узгоджуються з відомими закономірностями формування поверхні при електроіскровому легуванні, згідно з якими підвищення енергії імпульсу, з одного боку, сприяє зміцненню поверхневого шару, а з іншого — призводить до погіршення параметрів мікрогеометрії. Встановлена тенденція підтверджує необхідність вибору оптимального енергетичного режиму, що забезпечує компроміс між підвищенням твердості та допустимим рівнем шорсткості поверхні.

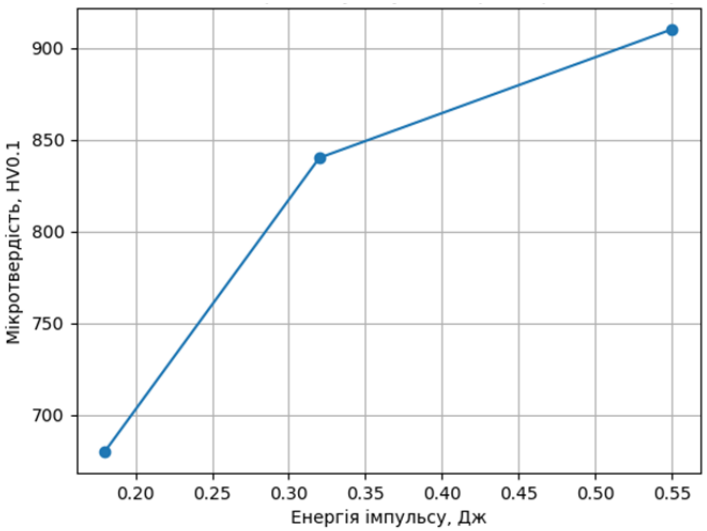


Рисунок 8 – Вплив енергії імпульсу на мікротвердість

Джерело: розроблено автором

Залежність, наведена на рис. 8, демонструє зростання мікротвердості поверхневого шару зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування. Встановлено, що при енергії імпульсу 0,18 Дж мікротвердість становить близько 680 HV, при 0,32 Дж — 840 HV, а при підвищенні енергії до 0,55 Дж досягає 910 HV. Таким чином, у дослідженому діапазоні спостерігається підвищення мікротвердості приблизно на 34 %.

Зростання мікротвердості пояснюється інтенсифікацією термічних і дифузійних процесів у зоні електроіскрового розряду. Зі збільшенням енергії імпульсу підвищується температура в мікрооб'ємі контакту, що сприяє глибшому проникненню легувальних елементів і формуванню дрібнодисперсної швидкозагартованої структури поверхневого шару. У результаті формується так званий «білий шар», який характеризується підвищеною твердістю та зносостійкістю.

Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про механізми поверхневого зміцнення при електроіскровому легуванні, згідно з якими підвищення енергії імпульсу сприяє збільшенню мікротвердості та товщини зміцненого шару. Водночас надмірне зростання енергії може супроводжуватися підвищенням шорсткості та внутрішніх напружень, що необхідно враховувати при виборі оптимального режиму обробки.

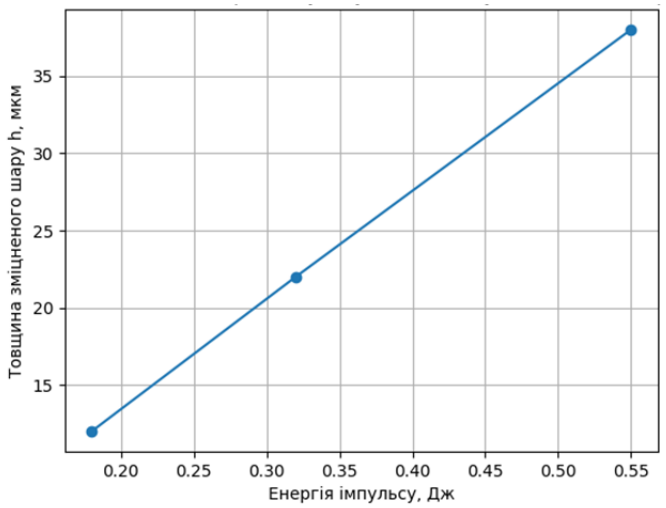


Рисунок 9 – Вплив енергії імпульсу на товщину шару

Джерело: розроблено автором

Залежність, наведена на рис. 9, демонструє зростання товщини зміцненого шару зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування. Встановлено, що при енергії імпульсу 0,18 Дж товщина зміцненого шару становить близько 12 мкм, при 0,32 Дж — 22 мкм, а при підвищенні енергії до 0,55 Дж зростає до 38 мкм. Таким чином, у дослідженому діапазоні товщина зміцненого шару збільшується більш ніж у 3 рази.

Зростання товщини зміцненого шару пояснюється підвищенням енергетичного впливу імпульсного розряду, що супроводжується збільшенням глибини термічного проникнення та інтенсифікацією процесів масопереносу матеріалу електрода. При підвищенні енергії імпульсу збільшується об'єм розплавленого металу, глибина дифузійного легування та тривалість локального термічного впливу, що сприяє формуванню товстішого зміцненого шару.

Сформований поверхневий шар має багатозонну будову і включає швидкозагартований («білий») шар, перехідну дифузійну зону та основний матеріал. Зі

збільшенням енергії імпульсу спостерігається зростання товщини як поверхневого загартованого шару, так і дифузійної зони, що позитивно впливає на зносостійкість. Водночас надмірне збільшення товщини зміцненого шару може супроводжуватися зростанням внутрішніх напружень і погіршенням параметрів мікрогеометрії поверхні, що необхідно враховувати при виборі оптимального режиму електроіскрового легування.

Отримані результати узгоджуються з літературними даними та підтверджують, що товщина зміцненого шару є одним із ключових параметрів, які визначають експлуатаційні властивості поверхні, зокрема її зносостійкість, довговічність і стабільність роботи в умовах тертя.

Обговорення результатів. Згідно з результатами проведених експериментальних досліджень встановлено, що підвищення енергії імпульсу електроіскрового легування з 0,18 до 0,55 Дж призводить до істотного зростання товщини та мікротвердості зміцненого шару. Під час проведення експерименту встановлено, що товщина зміцненого шару збільшується з 12 мкм до 38 мкм, тоді як мікротвердість зростає з 680 HV0.1 до 910 HV0.1, що свідчить про інтенсифікацію теплових і дифузійних процесів у зоні імпульсного розряду та формування більш глибокого термічно модифікованого шару.

Одночасно встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу зростає параметр шорсткості поверхні. За результатами вимірювань шорсткість Ra збільшується з 0,55 мкм при 0,18 Дж до 1,45 мкм при 0,55 Дж, що пов’язано з формуванням більш розвинутого мікрорельєфу, збільшенням розмірів мікролунок і напливів, а також стохастичним характером масопереносу розплавленого металу. Під час отримання покриттів при високих енергетичних режимах спостерігалося підвищення амплітуди профілограми та зростання нерівномірності поверхні.

Згідно з нашими дослідженнями встановлено, що найменша інтенсивність зношування (0,42 мг/м) досягається при середньому режимі електроіскрового легування (енергія імпульсу 0,32 Дж), коли формується зміцнений шар товщиною близько 22 мкм з мікротвердістю 840 HV0.1 і помірною шорсткістю поверхні (Ra ≈ 0,82 мкм). При низькому режимі знос становив 0,84 мг/м, що пояснюється недостатньою товщиною і твердістю зміцненого шару, тоді як при високому режимі знос зростав до 0,69 мг/м через підвищення шорсткості та рівня залишкових напружень.

Таким чином, у ході проведених досліджень встановлено комплексний взаємозв’язок між параметрами шорсткості Ra, мікротвердості HV, товщиною зміцненого шару h та інтенсивністю зношування. Мінімальний знос спостерігається при поєднанні достатньої товщини зміцненого шару (≈20–25 мкм), підвищеної мікротвердості (800–850 HV) та помірної шорсткості поверхні (Ra ≈ 0,7–0,9 мкм). Отримані результати свідчать, що зносостійкість поверхні визначається не окремим параметром, а їхньою комплексною взаємодією, що підтверджує існування оптимального енергетичного режиму електроіскрового легування.

Метрологічне забезпечення. Використання повірених і каліброваних засобів вимірювальної техніки, багаторазова повторюваність експериментів і статистична обробка результатів забезпечили метрологічну достовірність отриманих залежностей. Усі вимірювання виконувалися за однакових умов із застосуванням атестованих методик, що забезпечувало простежуваність результатів до еталонів і мінімізацію систематичних похибок. Повірка засобів вимірювання, стабільність умов експерименту та контроль режимів електроіскрового легування дозволили отримати узгоджені результати з високим рівнем відтворюваності.

Згідно з результатами статистичної обробки експериментальних даних

встановлено, що стандартне відхилення виміряних параметрів становило: для шорсткості поверхні σ(Ra) = 0,03–0,07 мкм, для мікротвердості σ(HV) = 18–32 HV, для товщини зміцненого шару σ(h) = 1,1–2,4 мкм. Отримані значення не перевищують 3–5 % від середнього значення параметрів, що свідчить про стабільність процесу електроіскрового легування та високу повторюваність формування зміцненого шару.

Додатково було оцінено сумарну відносну похибку вимірювань, яка становила: для параметра шорсткості — до 5 %, для мікротвердості — до 4 %, для товщини зміцненого шару — до 6 %. Отримані значення відповідають вимогам до точності вимірювань при дослідженні параметрів якості поверхневого шару та забезпечують достовірність встановлених закономірностей.

Таким чином, застосування метрологічно обґрунтованого підходу, використання повірених засобів вимірювання, статистична обробка результатів і контроль похибок дозволили підтвердити стабільність процесу електроіскрового легування, відтворюваність параметрів якості поверхні та надійність отриманих експериментальних залежностей.

Наукова новизна. У роботі вперше:

Встановлено кількісний комплексний взаємозв’язок між параметрами шорсткості поверхні Ra, мікротвердості HV, товщини зміцненого шару h та інтенсивності зношування I. Показано, що зменшення інтенсивності зносу відбувається при досягненні поєднання параметрів: Ra = 0,7–0,9 мкм, HV = 800–850, h = 20–25 мкм, при яких інтенсивність зношування знижується до 0,42 мг/м, що у 2 рази менше, ніж при низькоенергетичному режимі.

Експериментально визначено оптимальний енергетичний режим електроіскрового легування, який відповідає енергії імпульсу ≈0,32 Дж. Встановлено, що при цьому режимі формується зміцнений шар товщиною ≈22 мкм з мікротвердістю ≈840 HV і помірною шорсткістю (Ra ≈ 0,82 мкм), що забезпечує мінімальну інтенсивність зношування та стабільність трибологічних характеристик поверхні.

Розроблено та апробовано метрологічно обґрунтований підхід до оцінювання якості поверхневого зміцнення, який включає використання повірених засобів вимірювання, статистичну обробку результатів, оцінювання стандартного відхилення та сумарної похибки вимірювань. Показано, що стандартне відхилення параметрів становить: σ(Ra) = 0,03–0,07 мкм, σ(HV) = 18–32 HV, σ(h) = 1,1–2,4 мкм, що не перевищує 3–5 % від середнього значення і підтверджує відтворюваність результатів.

Експериментально доведено, що зносостійкість зміцненого поверхневого шару визначається комплексною взаємодією параметрів Ra, HV і h, а не окремими характеристиками. Встановлено, що підвищення мікротвердості з 680 до 910 HV і товщини шару з 12 до 38 мкм супроводжується зменшенням зносу лише до певного рівня, після чого негативний вплив підвищеної шорсткості (Ra до 1,45 мкм) і залишкових напружень призводить до зростання інтенсивності зношування. Це підтверджує існування оптимального співвідношення параметрів зміцненого шару.

Отримано експериментальні залежності Ra(E), HV(E), h(E) та I(E), які дозволяють прогнозувати параметри якості поверхні та інтенсивність зношування залежно від енергетичних режимів електроіскрового легування, що створює основу для керованого формування експлуатаційних властивостей поверхневого шару.

Висновки. Встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування з 0,18 до 0,55 Дж товщина зміцненого шару зростає з 12 до 38 мкм, а мікротвердість поверхні — з 680 до 910 HV, що пояснюється інтенсифікацією теплових і дифузійних процесів у зоні імпульсного розряду та формуванням більш глибокого термічно модифікованого шару.

Підвищення енергії імпульсу супроводжується збільшенням параметрів шорсткості поверхні: значення Ra зростає з 0,55 до 1,45 мкм, що пов'язано з формуванням розвиненішого мікрорельєфу, збільшенням розмірів мікролунок і напливів, а також стохастичним характером переносу розплавленого металу.

Експериментально встановлено, що найменша інтенсивність зношування (0,42 мг/м) досягається при середньому режимі електроіскрового легування (енергія імпульсу ≈0,32 Дж), коли формується зміцнений шар товщиною ≈22 мкм з мікротвердістю ≈840 HV0.1 і помірною шорсткістю (Ra ≈ 0,82 мкм), що забезпечує оптимальні умови контактної взаємодії.

Доведено, що зносостійкість поверхні визначається комплексною взаємодією параметрів шорсткості Ra, мікротвердості HV та товщини зміцненого шару h. Показано, що підвищення мікротвердості та товщини шару сприяє зменшенню інтенсивності зношування лише до певного рівня, після чого негативний вплив підвищеної шорсткості та залишкових напружень може призводити до погіршення трибологічних характеристик.

Застосування метрологічно обґрунтованого підходу, використання повірених засобів вимірювальної техніки та статистична обробка результатів забезпечили достовірність і відтворюваність експериментальних даних. Стандартне відхилення параметрів не перевищувало 3–5 %, що підтверджує стабільність процесу електроіскрового легування та надійність встановлених закономірностей.

Список літератури

1. Polischuk Ye. S., Dorozhovets M. M., Yatsuk V. O. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Бескид Біт, 2003. 544 с.
2. ДСТУ-Н РМГ 63:2013. Метрологія. Забезпечення ефективності вимірювань під час керування технологічними процесами. Метрологічна експертиза технічної документації (RMG 63-2003, IDT). Київ, 2013.
3. Лазаренко Б. Р. Електроіскрове легування металевих поверхонь. Київ: Наукова думка, 1986. 276 с.
4. Dorozhovets M., Stadnyk B., Motalo V., Vasyliuk V., Kovalchyk A., Borek R. Основи метрології та вимірювальної техніки. Т. 1. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. 532 с.
5. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research progress in electrospark deposition coatings on titanium alloy surfaces: a short review. *Coatings*. 2023. Vol. 13, № 8. P. 1473.
6. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: a short review. Coatings. 2022. Vol. 12, № 10. P. 1536.
7. Yang S., Gao S., Xue W., Wu B., Duan D. Investigations on microstructure, oxidation and tribological behavior of NiCoCrAlYTa/Y_2O_3 blade tip protective coating produced by electro spark deposition. *Tribology International.* 2023. Vol. 180. P. 108274.
8. ISO 4287:1997. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization, 1997.
9. ISO 6507-1:2018. Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method. International Organization for Standardization, 2018.
10. Mitutoyo Corporation. Surftest SJ-201P Portable Surface Roughness Tester. Bulletin No. 1795. Technical brochure.

References

1. Polischuk, Ye. S., Dorozhovets, M. M., Yatsuk, V. O., et al. (2003). *Metrology and measuring technology.* Lviv: Beskyd Bit [in Ukrainian].
2. DSTU-N RMG 63:2013. (2013). *Metrology. Ensuring measurement effectiveness during technological process control.* Kyiv [in Ukrainian].
3. Lazarenko, B. R. (1986). *Electrospark alloying of metal surfaces.* Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Dorozhovets, M., Stadnyk, B., Motalo, V., Vasyliuk, V., Kovalchyk, A., & Borek, R. (2005). *Fundamentals of metrology and measuring technology.* Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
5. Wang, J., Zhang, M., Dai, S., & Zhu, L. (2023). Research progress in electrospark deposition coatings on

titanium alloy surfaces: A short review. *Coatings*, 13(8), 1473.
6. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Renna, G. (2022). Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review. *Coatings*, 12(10), 1536.
7. Yang, S., Gao, S., Xue, W., Wu, B., & Duan, D. (2023). Investigations on microstructure, oxidation and tribological behavior of NiCoCrAlYTa/Y_2O_3 blade tip protective coating produced by electro spark deposition. *Tribology International*, 180, 108274.
8. ISO 4287:1997. (1997). *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters.* ISO.
9. ISO 6507-1:2018. (2018). *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method.* ISO.
10. Mitutoyo Corporation. (n.d.). *Surftest SJ-201P Portable Surface Roughness Tester.* Technical brochure.

Oleg Makovkin, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Valchuk**
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

Metrological and Technological Quality Assurance in Electrospark Alloying of Automotive Engine Parts Surfaces

The article is devoted to the study of the influence of electrospark alloying energy parameters on the formation of surface layer quality indicators of machine parts. The technological scheme of forming a strengthened surface layer by electrospark alloying is substantiated taking into account the physical mechanisms of electrode material transfer, thermal processes in the discharge zone, and the stochastic nature of surface microrelief formation.

It is established that the energy parameters of the process significantly influence the formation of surface microgeometry, microhardness, thickness of the strengthened layer, and wear intensity. With increasing discharge energy, the thickness of the strengthened layer and surface microhardness increase due to intensification of thermal and diffusion processes, while surface roughness also grows as a result of a more developed microrelief formation.

The analysis of experimental results showed that the minimum wear rate is achieved at a medium electrospark alloying режим, which provides an optimal combination of microhardness, strengthened layer thickness, and surface microgeometry. It is proved that wear resistance is determined by the complex interaction of surface roughness, microhardness, and strengthened layer thickness rather than by a single parameter.

A metrologically substantiated approach to quality evaluation is proposed, which includes the use of calibrated measuring instruments, statistical processing of results, and estimation of measurement uncertainty. The obtained analytical relationships make it possible to predict surface quality parameters and wear intensity depending on the energy режим of electrospark alloying and to ensure controlled formation of эксплуатационных свойств strengthened surfaces.

electrospark alloying, surface layer, microhardness, roughness, wear resistance, energy режимs, technology, equipment

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 656.13:006.83 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).293-299

А. А. Сергійчук, Є. М. Козаченко
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kirovogradsto@gmail.com

Правове регулювання безпеки транспорту та роль випробувальних лабораторій у системі технічного регулювання

У статті досліджено правові механізми забезпечення безпеки транспорту в Україні в контексті розвитку системи технічного регулювання та впровадження міжнародних стандартів управління якістю. З'ясовано роль випробувальних лабораторій у процедурі оцінки відповідності транспортних засобів встановленим технічним вимогам. Особливу увагу приділено ролі стандарту ISO/IEC 17025 як інструменту забезпечення компетентності лабораторій та достовірності результатів випробувань. Проаналізовано нормативно-правові вимоги до діяльності випробувальних лабораторій у сфері технічного контролю транспортних засобів, визначені законодавством України. Виявлено взаємозв'язок між функціонуванням акредитованих лабораторій, системою технічного регулювання транспорту та реалізацією концепції Vision Zero.

транспортний засіб, транспортна безпека, технічне регулювання, випробувальна лабораторія, стандарт ISO/IEC 17025, акредитація, оцінка відповідності до вимог

Постановка проблеми. Забезпечення безпеки транспорту є одним із ключових напрямів державної політики у сфері транспортної діяльності [1; 2]. Розвиток транспортної інфраструктури, зростання інтенсивності дорожнього руху, а також постійне ускладнення конструкції сучасних транспортних засобів (ТЗ) обумовлюють необхідність удосконалення правових механізмів державного регулювання цієї сфери.

Важливим інструментом забезпечення транспортної безпеки є система технічного регулювання ТЗ, яка передбачає встановлення обов'язкових технічних вимог до їх конструкції, технічного стану, експлуатаційних характеристик, а також процедур перевірки відповідності ТЗ встановленим вимогам [3].

Суттєву роль у функціонуванні системи технічного регулювання на транспорті відіграють органи з оцінки відповідності, які призначаються Мінінфраструктури. До таких органів належать випробувальні лабораторії, діяльність яких спрямована на проведення технічних випробувань ТЗ. Чинним законодавством України визначено, що випробувальна лабораторія є акредитованим органом з оцінки відповідності, який проводить випробування. Дані положення закріплені у Порядку затвердження конструкції транспортних засобів, затвердженому наказом Міністерства інфраструктури України № 521 [5].

Крім того, постановою Кабінету Міністрів України №137 встановлено, що суб'єкти проведення обов'язкового технічного контролю ТЗ повинні мати атестат про акредитацію власної випробувальної лабораторії або органу з інспектування. Це підтверджує їхню компетентність проводити відповідні випробування у межах визначеної сфери акредитації [6].

Водночас сучасний розвиток системи технічного регулювання транспорту потребує погодження, так і впровадження міжнародних стандартів управління якістю лабораторної діяльності. У цьому контексті особливого значення набуває стандарт ISO/IEC 17025 [7], який визначає вимоги до компетентності випробувальних лабораторій та забезпечує достовірність результатів випробувань.

© А. А. Сергійчук, Є. М. Козаченко, 2026

Аналіз правових аспектів регулювання безпеки транспорту та ролі випробувальних лабораторій свідчить про необхідність досліджень у цьому напрямі та з'ясування ролі системи управління якістю відповідно до стандарту ISO/IEC 17025.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми технічного регулювання у сфері ТЗ та забезпечення їх безпечної експлуатації є предметом дослідження як українських, так і зарубіжних науковців. Водночас слід зазначити, що комплексний аналіз ролі випробувальних лабораторій у системі технічного регулювання транспорту залишається недостатньо дослідженим.

Значний внесок у дослідження розвитку системи технічного регулювання ТЗ зроблено у праці К. С. Жарова [11], де розглянуто етапи формування національної системи технічного регулювання ТЗ в Україні та визначено необхідність гармонізації українського законодавства з вимогами міжнародних нормативно-правових актів.

Окремі аспекти функціонування системи технічного контролю ТЗ наведені у роботі Ф. М. Брегіди та В. В. Мержиєвського [12], де проаналізовано механізми перевірки придатності ТЗ до експлуатації та особливості впровадження європейських підходів у цій сфері.

Важливі результати щодо використання сучасних інформаційних технологій у транспортній сфері представлені у роботах Р. В. Симоненка, В. П. Матейчика, І. В. Грицука та М. П. Цюмана [13], в яких розглядається використання телематичних систем у процесах експлуатації ТЗ та управління транспортною інфраструктурою.

Разом із тим питання ролі випробувальних лабораторій у системі технічного регулювання транспорту, а також особливості впровадження стандарту ISO/IEC 17025 у діяльність таких лабораторій потребують подальшого наукового дослідження.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження правового регулювання забезпечення безпеки транспорту в Україні та визначення ролі випробувальних лабораторій у системі технічного регулювання ТЗ, з урахуванням впровадження системи управління якістю відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO/IEC 17025.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

- проаналізувати систему правового регулювання технічного контролю ТЗ в Україні;
- визначити роль органів з оцінки відповідності ТЗ, зокрема випробувальних лабораторій, у системі технічного регулювання транспорту;
- виявити призначення акредитації випробувальних лабораторій для забезпечення достовірності результатів технічних випробувань ТЗ;
- з'ясувати необхідність впровадження стандарту ISO/IEC 17025 у формуванні системи управління якістю випробувальних лабораторій ТЗ.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що система забезпечення безпеки транспорту в Україні базується на поєднанні правових, організаційних та технічних механізмів державного регулювання. Одним із ключових елементів цієї системи є технічне регулювання ТЗ, яке передбачає встановлення обов'язкових вимог до їх конструкції, технічного стану та процедур перевірки відповідності таким вимогам.

У сучасних умовах розвиток транспортної системи супроводжується постійним ускладненням конструкції ТЗ з елементами мехатроніки та комп'ютерного забезпечення функціонування їхніх систем, агрегатів та вузлів з метою підвищенням вимог до рівня безпеки. У зв'язку з цим важливого значення набуває ефективне функціонування системи технічного контролю ТЗ, яка забезпечує перевірку їх відповідності встановленим державою технічним вимогам.

Важливу роль у функціонуванні системи технічного регулювання відіграють **органи з оцінки відповідності,** до яких належать органи сертифікації, органи

інспектування та випробувальні лабораторії. Саме результати діяльності цих органів є підставою для прийняття рішень щодо допуску ТЗ до експлуатації.

Особливе значення у цій системі мають **випробувальні лабораторії**, які здійснюють технічні випробування ТЗ та визначають їх відповідність встановленим вимогам безпеки. Відповідні положення закріплені у Порядку затвердження конструкції транспортних засобів, затвердженому наказом Міністерства інфраструктури України № 521[5].

Крім того, важливі вимоги до діяльності суб'єктів технічного контролю ТЗ встановлені постановою Кабінету Міністрів України № 137 [6], яка регулює порядок проведення обов'язкового технічного контролю транспортних засобів. Зокрема, зазначено, що суб'єкти проведення обов'язкового технічного контролю повинні мати **атестат про акредитацію власної випробувальної лабораторії або органу з інспектування**, який підтверджує їх компетентність здійснювати відповідні випробування у межах сфери акредитації. Зазначені положення законодавства свідчать про те, що акредитація лабораторій є важливим елементом системи технічного регулювання транспорту та гарантією достовірності результатів випробувань.

Враховуючи вимоги законодавства, важливу роль відіграє впровадження міжнародного стандарту управління якістю лабораторної діяльності: **ISO/IEC 17025**, який визначає вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій:

- до компетентності персоналу лабораторій;
- до метрологічної простежуваності вимірювань;
- до використання валідованих методик випробувань;
- до забезпечення якості результатів випробувань;
- до управління ризиками, конфіденційністю, неупередженістю.

Графічні відображення цих вимог наведено на рис. 1



Рисунок 1 – Сукупність та взаємозв'язок вимог компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій

Джерело: розроблено авторами

Впровадження системи управління (менеджменту) відповідно до стандарту ISO/IEC 17025 дозволяє забезпечити високий рівень достовірності результатів випробувань та підвищити рівень довіри до діяльності органів з оцінки відповідності ТЗ.

Акредитація випробувальних лабораторій в Україні здійснюється **Національним агентством з акредитації України (НААУ)**, яке виконує функції національного органу з акредитації відповідно до Закону України «Про акредитацію органів з оцінки відповідності» [4]. Основним завданням НААУ є підтвердження компетентності органів з оцінки відповідності, що здійснюють випробування, інспектування та сертифікацію продукції.

Процедура акредитації передбачає комплексну оцінку діяльності лабораторії, яка включає аналіз документів системи управління оцінку компетентності персоналу, перевірку відповідності технічного оснащення лабораторії та аналіз застосовуваних методів випробувань. Наявність атестата про акредитацію підтверджує здатність лабораторії проводити випробування відповідно до міжнародних стандартів та забезпечувати достовірність результатів вимірювань.

У контексті євроінтеграційних процесів важливого значення набуває гармонізація національного законодавства з правом Європейського Союзу. В сфері технічного регулювання ТЗ ключову роль відіграє Регламент (EU) 2018/858 [8], який встановлює єдині правила затвердження типу ТЗ, їх систем, компонентів та окремих технічних вузлів.

Регламент також визначає механізми ринкового нагляду за ТЗ та встановлює вимоги до технічних служб, які здійснюють випробування. Зокрема, технічні служби повинні відповідати вимогам міжнародних стандартів, що підтверджує важливість впровадження стандарту ISO/IEC 17025 у діяльність випробувальних лабораторій.

Важливим напрямом розвитку сучасної транспортної політики є реалізація концепції **Vision Zero** [9], яка передбачає досягнення нульового рівня смертності на дорогах шляхом комплексного підходу до забезпечення безпеки дорожнього руху. Концепція Vision Zero ґрунтується на принципі недопустимості смертності та тяжкого травматизму на дорогах і передбачає проєктування транспортної системи з урахуванням людських помилок. Вона базується на розподілі відповідальності між усіма учасниками системи, управлінні швидкістю, науковому підході та пріоритеті захисту вразливих учасників дорожнього руху. Основні принципи покладені в основі концепції **Vision Zero** відображені на рис.2.



Рисунок 2 – Основні принципи Концепція Vision Zero.

Джерело: розроблено авторами на основі роботи

У рамках цієї концепції особлива увага приділяється технічному стану ТЗ, оскільки несправності ТЗ є одним із факторів, що підвищують ризик дорожньо-транспортних пригод. Відповідно діяльність акредитованих випробувальних лабораторій відіграє важливу роль у забезпеченні належного технічного стану ТЗ та підвищенні рівня безпеки транспорту.

Взаємозв'язок між основними елементами системи технічного регулювання транспорту представлено на рис. 3.



Рисунок 3. - Система технічного регулювання транспорту в Україні

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження підтверджують, що у зазначеному ланцюгу технічного регулювання та забезпечення безпеки кожен елемент має суттєве значення та виконує важливу функцію.

Висновки:

1. Встановлено, що забезпечення безпеки транспорту є складним багаторівневим процесом, який передбачає ефективне функціонування системи технічного регулювання транспортних засобів.

2. Визначено, що правове регулювання цієї сфери в Україні ґрунтується на комплексі нормативно-правових актів, які визначають вимоги до транспортних засобів, порядок проведення їхнього технічного контролю та процедури оцінки відповідності встановленим технічним вимогам.

3. З'ясовано, що важливу роль у системі технічного регулювання транспорту відіграють випробувальні лабораторії, діяльність яких спрямована на проведення технічних випробувань транспортних засобів та визначення їх відповідності встановленим вимогам безпеки.

4. Аналіз правового регулювання на транспорті показав, що законодавство України пов'язує діяльність випробувальних лабораторій із необхідністю їх акредитації.

5. Доведено, що впровадження системи управління якістю відповідно до стандарту ISO/IEC 17025 сприяє підвищенню достовірності результатів випробувань, забезпечує міжнародне визнання діяльності лабораторій та підвищує ефективність функціонування системи технічного регулювання транспорту.

6. Виявлено, що подальший розвиток системи технічного регулювання транспорту в Україні має бути спрямований на гармонізацію національного законодавства з вимогами права Європейського Союзу, зокрема з положеннями Регламенту (EU) 2018/858, а також на впровадження сучасних механізмів забезпечення транспортної безпеки відповідно до принципів концепції Vision Zero.

Список літератури

1. Конституція України : Закон України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР.
2. Про транспорт : Закон України від 10.11.1994 № 232/94-ВР.
3. Про дорожній рух : Закон України від 30.06.1993 № 3353-XII.
4. Про акредитацію органів з оцінки відповідності : Закон України від 17.05.2001 № 2407-III.
5. Порядок затвердження конструкції транспортних засобів, їх частин та обладнання : наказ Міністерства інфраструктури України від 17.08.2012 № 521.

6. Про затвердження Порядку проведення обов'язкового технічного контролю транспортних засобів : Постанова Кабінету Міністрів України від 30.01.2012 № 137.
7. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva : International Organization for Standardization, 2017.
8. Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles.
9. Tingvall C., Haworth N. Vision Zero – An Ethical Approach to Safety and Mobility. Stockholm : Swedish Road Administration.
10. Національне агентство з акредитації України : офіційний сайт.
11. Жаров К. С. Технічне регулювання у сфері транспортних засобів . *Наукове забезпечення розвитку автомобільного транспорту та його інтеграції до європейської транспортної системи* : збірка матеріалів науково-практичної конференції (онлайн). Київ : ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2020. С. 29–31.
12. Брегіда Ф. М., Мержиєвський В. В. Вибрані питання обов'язкової перевірки придатності колісних транспортних засобів до експлуатації . *Наукове забезпечення розвитку автомобільного транспорту та його інтеграції до європейської транспортної системи* : збірка матеріалів науково-практичної конференції (онлайн). Київ : ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2020. С. 32–37.
13. Симоненко Р. В., Матейчик В. П., Грицук І. В., Цюман М. П. Телематичне забезпечення системи «Колісні транспортні засоби – інфраструктура» . *Наукове забезпечення розвитку автомобільного транспорту та його інтеграції до європейської транспортної системи* : збірка матеріалів науково-практичної конференції (онлайн). Київ : ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2020. С. 38–40.

References

1. Constitution of Ukraine: Law of Ukraine of 28 June 1996 No. 254k/96-VR [in Ukrainian].
2. On Transport: Law of Ukraine of 10 November 1994 No. 232/94-VR [in Ukrainian].
3. On Road Traffic: Law of Ukraine of 30 June 1993 No. 3353-XII [in Ukrainian].
4. On Accreditation of Conformity Assessment Bodies: Law of Ukraine of 17 May 2001 No. 2407-III [in Ukrainian].
5. Procedure for Approval of the Design of Vehicles, Their Parts and Equipment: Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine of 17 August 2012 No. 521 [in Ukrainian].
6. On Approval of the Procedure for Mandatory Technical Inspection of Vehicles: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 30 January 2012, No. 137 [in Ukrainian].
7. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
8. Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles.
9. Tingvall, C., & Haworth, N. Vision Zero – An Ethical Approach to Safety and Mobility. Stockholm: Swedish National Road Administration.
10. National Accreditation Agency of Ukraine. Official website. [in Ukrainian].
11. Zharov, K. S. (2020). Technical regulation in the field of vehicles. In: *Scientific Support for the Development of Road Transport and Its Integration into the European Transport System*: Proceedings of the Scientific and Practical Conference (online) (pp.29–31). Kyiv: State Enterprise "DerzhavtotransNDIproject" [in Ukrainian].
12. Brehida, F. M., & Merzhyievskyi, V. V. (2020). Selected issues of mandatory inspection of the roadworthiness of wheeled vehicles. In: *Scientific Support for the Development of Road Transport and Its Integration into the European Transport System*: Proceedings of the Scientific and Practical Conference (online). (pp. 32–37). Kyiv: State Enterprise "DerzhavtotransNDIproject" [in Ukrainian].
13. Symonenko, R. V., Mateichyk, V. P., Hrytsuk, I. V., & Tsiuman, M. P. (2020). Telematic support of the system "Wheeled Vehicles – Infrastructure". In: *Scientific Support for the Development of Road Transport and Its Integration into the European Transport System*: Proceedings of the Scientific and Practical Conference (online) (pp. 38–40). Kyiv: State Enterprise "DerzhavtotransNDIproject" [in Ukrainian].

Andrii Serhiichuk, Yevhen Kozachenko
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Legal Regulation of Transport Safety and the Role of Testing Laboratories in the System of Technical Regulation

The article examines the legal regulation of transport safety in Ukraine in the context of the development of the technical regulation system and the implementation of international standards for laboratory competence. Particular attention is paid to the role of testing laboratories in conformity assessment procedures for vehicles and their compliance with established safety requirements. The study analyzes the national regulatory framework governing the activities of testing laboratories in the field of technical inspection of vehicles, including the laws of Ukraine on transport, road traffic and accreditation of conformity assessment bodies. The importance of the ISO/IEC 17025 standard as a key instrument for ensuring the competence of testing laboratories and the reliability of testing results is substantiated. The article also highlights the role of accreditation procedures carried out by the National Accreditation Agency of Ukraine in confirming the technical competence of conformity assessment bodies. The relationship between the functioning of accredited testing laboratories, the national system of technical regulation and the implementation of international transport safety approaches is revealed. Particular attention is paid to the European experience of transport regulation based on Regulation (EU) 2018/858 and the concept of Vision Zero aimed at reducing road traffic fatalities. It is concluded that the development of the national system of technical regulation should be aimed at harmonizing Ukrainian legislation with European requirements and strengthening the role of accredited testing laboratories in ensuring vehicle safety.

transport safety, vehicle, technical regulation, testing laboratory, ISO/IEC 17025, accreditation, conformity assessment

Одержано (Received) 23.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 656.07:504.064 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).299-304

Л. А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук, **І. П. Тарандушка**
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: tarandushkal@ukr.net; tarandushka@ukr.net

Вплив трансформації транспортної інфраструктури на екологічну безпеку міського середовища в умовах сталого розвитку

В результаті дослідження було визначено, що висока токсичність викидів в українських містах, порівняно з європейськими, обумовлена застарілим технічним станом транспортних засобів, практикою демонтажу систем нейтралізації та використанням палива з підвищеним вмістом сірки. Тому актуальне питання поліпшення екологічної ситуації в містах України вирішується заміною автопарку міських перевезень. З огляду на це було розроблено математичну модель розрахунку кількості прогнозованих шкідливих викидів в результаті вдосконалення структури міського пасажирського автопарку в м. Черкаси. Дана модель базується на визначенні річних викидів основних шкідливих речовин. Це дає змогу адекватно оцінювати результати можливих вдосконалень екології міст.

відпрацьовані гази, шкідливі речовини, заміна автопарку, математична модель

Постановка проблеми. Автомобільний потік є критично інтенсивним у великих містах та обласних центрах, де внаслідок шкідливого впливу транспорту повітря забруднюється відпрацьованими газами. Це створює суттєве навантаження на екосистему та вкрай негативно позначається на здоров'ї населення.

© Л. А. Тарандушка, І. П. Тарандушка, 2026

У Черкаській області автомобільний транспорт є одним із ключових джерел забруднення навколишнього середовища. Згідно з моніторинговими даними екологічних служб регіону, частка викидів від пересувних джерел автотранспорту у загальному обсязі забруднюючих речовин залишається стабільно високою. Для міста Черкаси, яке є великим промисловим центром, цей показник є особливо критичним через поєднання транспортних викидів із промисловими емісіями, що створює накопичувальний ефект.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна наукова парадигма розглядає екологічну безпеку експлуатації автотранспорту як багатофакторну загрозу сталому розвитку міських територій. Фундаментальні дослідження Штаюри О., Польового Р. [1] підтверджують, що в умовах великих міст України частка транспортного сектору в загальному обсязі антропогенного навантаження становить 70–80%. Це дозволяє ідентифікувати дану галузь як домінантний чинник деградації довкілля, що супроводжується не лише газоподібними викидами, а й накопиченням твердих відходів (зношені шини, АКБ), вібраційним впливом та забрудненням гідросфери нафтопродуктами. Ключовим аспектом хімічного забруднення залишається склад відпрацьованих газів (ВГ). У працях В. Каніла [2] акцентується увага на синергетичному ефекті усіх компонентів ВГ. Найбільшу небезпеку для громадського здоров'я становлять бензапірен та дрібнодисперсні частинки (PM). Згідно з даними S. Holgate [3], фракції PM мають здатність до транслокації безпосередньо у системний кровообіг, провокуючи хронічні патології кардіореспіраторної системи. Новітній вектор досліджень, представлений у роботах V. Timmers та P. Achten [4], розширює межі проблеми, вказуючи на існування «невихлопних» викидів (non-exhaust emissions). Автори доводять, що навіть повна електрифікація транспорту не нівелює надходження у довкілля важких металів (Cu, Zn, Cd) та мікропластику, що утворюються внаслідок абразивного зносу гальмівних систем та шин. Додатковим негативним фактором у приземному шарі атмосфери є турбулентне підняття осілого пилу під час руху великогабаритного транспорту. Окрім хімічної деструкції середовища, суттєве значення має акустичне навантаження. Дослідження М. Гнатова [5,6] фіксують перевищення допустимих норм шуму на 15–20 дБ у зонах інтенсивного трафіку, що стає причиною зростання психоемоційного стресу та зниження когнітивної працездатності населення. Аналіз специфіки міста Черкаси дозволяє виявити кумулятивний ефект: поєднання транспортної емісії з викидами підприємств хімічної промисловості сприяє формуванню смогу. Фахівці виокремлюють три детерміновані причини критичного стану повітря в Україні: присутність сірки та ароматичних вуглеводнів у паливі попри законодавче впровадження стандарту Euro-5; домінування автомобілів екологічних класів Euro-2/3 та масова практика демонтажу систем нейтралізації (каталізаторів та сажових фільтрів); низька пропускна здатність доріг, що детермінує роботу двигунів у перехідних режимах (stop-and-go), за яких викиди CO та C_xH_y сягають максимуму. Фундаментальними передумовами забезпечення сталого розвитку та оздоровлення повітряного басейну міст є декарбонізація енергетичного сектору, мінімізація антропогенної емісії, а також поступове заміщення викопних вуглеводнів альтернативними та відновлюваними джерелами енергії [7-10].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка математичної моделі, що прогнозує зниження шкідливих викидів в результаті вдосконалення структури міського пасажирського автопарку в м. Черкаси.

Виклад основного матеріалу. Однією з пріоритетних стратегій детермінації екологічного навантаження на атмосферне повітря м. Черкаси є структурно-технологічна модернізація міського пасажирського автопарку. Враховуючи обмеженість

інструментів прямого адміністративного впливу на динаміку зростання приватного сектору автомобілізації, управлінський акцент має бути зосереджений на регулюванні муніципального та комерційного сегментів пасажироперевезень. Чинним механізмом трансформації структури рухомого складу є імплементація жорстких екологічних критеріїв у межах тендерних процедур на право обслуговування маршрутів. Це дозволяє стимулювати поетапну демісію застарілих одиниць малої місткості (зокрема моделей «Богдан» та «Ataman») на користь сучасних багатомісних автобусів та розширення мережі електротранспорту.

Оцінка потенціалу зниження антропогенної емісії внаслідок оптимізації кількісного складу парку базується на результатах моделювання переходу до експлуатації автобусів великої місткості.

Для проведення розрахунків використано детерміновані середньостатистичні показники основних магістральних напрямків м. Черкаси (зокрема тих, що формують транзитний потік через бульвар Шевченка).

У моделі прийнято такі вихідні параметри: середня протяжність маршруту в один бік становить 12,5–14,0 км при тривалості рейсу 35–45 хвилин; інтенсивність експлуатації одиниці транспортного засобу за зміну складає 8–10 рейсів. Алгоритм розрахунку екологічного ефекту від впровадження запропонованих заходів передбачає первинне визначення річного валового викиду забруднювальних речовин однією умовною одиницею середньостатистичного автобуса, що функціонує в існуючому операційному режимі.

$$j_i = \sum_{k=1}^{n} (L_k \cdot g_{ik} \cdot 10^{-6}) \cdot D_p \quad (1)$$

де j_i — річний викид i-ї шкідливої речовини одним автобусом, т/рік; L_k — добовий пробіг автобуса на маршруті, км/добу; g_{ik} — питомий викид i-ї речовини для даного класу автобуса (залежить від типу палива: дизель, газ чи електро), г/км; D_p — кількість робочих днів автобуса на рік (зазвичай 300–320 днів); 10^{-6} — коефіцієнт перерахунку в тонни.

Об’єктом порівняльного аналізу в межах даного моделювання обрано базову одиницю сучасного рухомого складу м. Черкаси — автобус середньої місткості Ataman A092H6 (екологічного класу Euro-5). Альтернативним сценарієм передбачається впровадження низькопідлогових автобусів великої місткості Solaris (класу Euro-6), технічні характеристики яких дозволяють реалізувати принцип пасажирозаміщення у співвідношенні 1:2. Такий підхід базується на порівнянні питомої пасажиромісткості транспортних одиниць, де один автобус великого класу за обсягом перевезень еквівалентний двом одиницям середнього класу. Оцінка екологічної ефективності в даному контексті ґрунтується не лише на переході до більш жорстких нормативів токсичності Euro-6, а й на кумулятивному ефекті від скорочення загальної кількості рухомого складу на магістральних маршрутах міста.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця питомих викидів шкідливих речовин (г/км) для автобусів

Показник	Ataman A092H6 (Euro-5)	Solaris (Euro-6)
Пасажиромісткість	52 особи	105 осіб
Оксид вуглецю (CO)	1,50 г/км	1,50 г/км
Вуглеводні (C_xH_y)	0,46 г/км	0,13 г/км
Оксиди азоту (NO_x)	2,00 г/км	0,40 г/км
Тверді частки (PM)	0,02 г/км	0,01 г/км

Джерело:розроблено авторами

В межах дослідження розглянуто модельну ситуацію на одному з ключових магістральних маршрутів м. Черкаси (зокрема, за траєкторією бульвару Шевченка). Базовий сценарій передбачає експлуатацію 20 одиниць рухомого складу середньої місткості марки Ataman A092H6. Альтернативний сценарій (проєктний) базується на заміщенні зазначеного парку 10 одиницями автобусів великої місткості, що забезпечують аналогічну провізну здатність маршруту.

Для проведення порівняльної оцінки екологічного ефекту прийнято наступні уніфіковані вихідні дані, що відповідають специфіці транспортної мережі міста:

Середньодобовий пробіг одиниці рухомого складу L_k=180 км;

Річний фонд робочого часу D_p=300 днів/рік.

У 1 випадку (існуючий стан), при функціонуванні на маршруті N_a=20 автобусів Ataman A092H6, сумарний річний пробіг всього парку L_{total} визначається за формулою:

$$L_{total} = N_a \cdot L_k \cdot D_p \quad (2)$$

$$L_{total} = 20 \cdot 180 \cdot 300 = 1080000\ км$$

Продовжуючи розробку математичної моделі екологічного ефекту, розглянемо альтернативний сценарій для 2 випадку (проєктний стан), що передбачає реструктуризацію парку шляхом впровадження техніки великої місткості, N_a =10 автобусів.

$$L_{total} = 10 \cdot 180 \cdot 300 = 540000\ км$$

Розрахунок викидів NO_x (найбільш токсичний компонент дизеля).

Для випадку 1:

$$G_{NOx} = 1080000 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6} = 2{,}16 \text{ тон / рік}$$

Для випадку 2:

$$G_{NOx} = 540000 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-6} = 0{,}216 \text{ тон / рік}$$

Завдяки переходу на стандарт Euro-6 та зменшенню кількості одиниць рухомого складу, валовий викид оксидів азоту NO_x скорочується на 90% — з 2,16 т/рік до 0,216 т/рік. Таке зниження є критично важливим для зони щільної забудови (бульвар Шевченка), де концентрація азотистих сполук часто корелює із захворюваністю органів дихання.

Двократне зменшення кількості автобусів на маршруті безпосередньо знижує коефіцієнт завантаженості вулично-дорожньої мережі. Це мінімізує ймовірність виникнення заторів на найбільш напружених транспортних вузлах міста (перехрестя вул. Смілянської та вул. Чорновола), що, своєю чергою, запобігає роботі двигунів у режимах холостого ходу та інтенсивного розгону, коли викиди CO та C_xH_y є максимальними.

Порівняльний аналіз паливної економічності демонструє зниження сумарної витрати палива приблизно на 30%. Питома витрата пального одного автобуса великої місткості (близько 32 л/100 км) є значно нижчою за сумарне споживання двох одиниць середнього класу (2 20 = 40 л/100 км). Це не лише зменшує емісію вуглекислого газу CO_2, а й покращує рентабельність муніципальних перевезень.

Результати розрахунків по основним показникам питомих викидів шкідливих речовин за рік занесено в табл.2.

Таблиця 2 – Порівняння питомих викидів шкідливих речовин у випадку заміни 20 Ataman A092H6 на 10 Solaris

Показник	Поточний стан (20 Ataman Euro-5)	Проектне рішення (10 Solaris Euro-6)	Абсолютне зниження Δ(т/рік)
Загальний річний пробіг, км	1080000	540000	540000
Оксид вуглецю CO, т/рік	1,620	0,810	0,810
Вуглеводні C_xH_y т/рік	0,497	0,070	0,427
Оксиди азоту NO_x, т/рік	2,160	0,216	1,944
Тверді частки (PM), т/рік	0,022	0,005	0,017

Джерело:розроблено авторами

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що проблема екологічної безпеки автомобільного транспорту в м. Черкаси має комплексний характер і потребує системного підходу, що поєднує технологічні, логістичні та адміністративні рішення. На основі аналізу наукових джерел та результатів математичного моделювання встановлено, що висока токсичність викидів в українських містах, порівняно з європейськими, обумовлена застарілим технічним станом транспортних засобів, практикою демонтажу систем нейтралізації та використанням палива з підвищеним вмістом сірки. Це призводить до інтенсивного утворення нагару та підвищення димності вихлопу навіть за наявності законодавчих стандартів Euro-5. Запропоноване рішення заміни 20 автобусів середньої місткості (Ataman A092H6, Euro-5) на 10 одиниць великої місткості (Solaris, Euro-6) на магістральному маршруті дозволяє знизити валовий викид оксидів азоту NO_x на 90% (з 2,16 до 0,216 т/рік). Оптимізація структури парку забезпечує двократне зниження завантаженості ключових дорожніх вузлів, що мінімізує роботу двигунів у найбільш токсичних перехідних режимах. Крім того, перехід на автобуси великої місткості дозволяє скоротити сумарне споживання палива на 30%, що відповідає глобальним цілям декарбонізації та сталого розвитку.

Список літератури

1. Штаюра О. Польовий Р., Телюк В., Дубан В., Мацкула А. Вплив автомобільного транспорту на екологію довкілля. *Матеріали І науково-практичної онлайн-конференції, м. Львів, 28 квітня 2016*., С. 3-7.
2. Каніло П. М. Екоенергетика автомобільного транспорту: проблеми та перспективи // Енерготехнології та ресурсозбереження. 2019. № 2. С. 34–41.
3. Holgate S. T. Health effects of air pollution with a focus on anthropogenic sources of nitrogen oxides. European Respiratory Review. 2021. Vol. 26. P. 170–184.
4. Molina J, Solanes J. E., Arnal L. and Tornero J. On the detection of defects on specular car body surfaces *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 2017. 263–78. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584517300194.
5. Гнатов М. П. Технічна експлуатація транспортних засобів та екологічна безпека : монографія. Харків: ХНАДУ, 2022. 210 с.
6. Гнатов А., Аргун Щ., Гнатова Г, Сохін П. Техніко-економічний розрахунок сонячної зарядної станції для електромобілів. Автомобільний транспорт, Вип. 49, 2021, С. 71-78. DOI: https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2021.49.0.05.
7. Аргун Щ.В. Екологічний та енергоефективний атомобільний транспорті його інфраструктура / Щ. В. Аргун, А. В. Гнатов, О.А. Ульянец // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2016. – № 2 (77). – С. 18–27.
8. Timmers, V. R. J. H., & Achten, P. A. J. (2016). Non-exhaust emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 134, 10–17.
9. L.-W. Antony Chen, Xiaoliang Wang, Brenda Lopez, Guoyuan Wu, Steven Sai Hang Ho, Judith C. Chow, John G. Watson, Qi Yao, Seungju Yoon, Heejung Jung Contributions of non-tailpipe emissions to near-road PM2.5 and PM10: A chemical mass balance study. *Environmental Pollution*. 2023. 8(2): 39-42. URL: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122283.
10. B. Baensch-Baltruschat et al. Tyre and road wear particles (TRWP)-A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment *Sci. Total Environ*. (2020) https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823

References

1. Shtaiura, O. Polovyi, R., Teliuk, V., Duban, V. & Matskula, A. (2016). Vplyv avtomobilnoho transportu na ekolohiiu dovkillia. *Materialy I naukovo-praktychnoi onlain-konferentsii, m. Lviv, 28 kvitnia*, 3-7 [in Ukranian].
2. Kanilo, P. M. (2019). Ekoenerhetyka avtomobilnoho transportu: problemy ta perspektyvy. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia*. № 2, 34–41 [in Ukranian].
3. Holgate, S. T. (2021). Health effects of air pollution with a focus on anthropogenic sources of nitrogen oxides. *European Respiratory Review*. Vol. 26, 170–184 [in English].
4. Molina, J, Solanes, J. E., Arnal, L. & Tornero, J. (2017). On the detection of defects on specular car body surfaces *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 263–78. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584517300194 [in English].
5. Hnatov, M. P. (2022) Tekhnichna ekspluatatsiia transportnykh zasobiv ta ekolohichna bezpeka : monohrafiia. *Kharkiv: KhNADU*, 210 [in Ukranian].
6. Hnatov, A., Arhun, Shch., Hnatova, H & Sokhin, P. (2021). Tekhniko-ekonomichnyi rozrakhunok soniachnoi zariadnoi stantsii dlia elektromobiliv. *Avtomobilnyi transport*, *Vyp. 49,* 71-78. DOI: https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2021.49.0.05 [in Ukranian].
7. Arhun, Shch.V., Hnatov, A. V. & Ulianets, O.A. (2016). Ekolohichnyi ta enerhoefektyvnyi atomobilnyi transporti yoho infrastruktura. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu.* № 2 (77), 18–27 [in Ukranian].
8. Timmers, V. R. J. H., & Achten, P. A. J. (2016). Non-exhaust emissions from electric vehicles. Atmospheric Environment, 134, 10–17 [in English].
9. L.-W. Antony Chen, Xiaoliang Wang, Brenda Lopez, Guoyuan Wu, Steven Sai Hang Ho, Judith C. Chow, John G. Watson, Qi Yao, Seungju Yoon, Heejung Jung (2023). Contributions of non-tailpipe emissions to near-road PM2.5 and PM10: A chemical mass balance study. *Environmental Pollution*. 8(2): 39-42. URL: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122283 [in English].
10. B. Baensch-Baltruschat et al. (2020). Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment *Sci. Total Environ*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137823 [in English].

Liudmyla Tarandushka, Prof., DSc., **Ivan Tarandushka**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Impact of Transport Infrastructure Transformation on the Environmental Safety of the Urban Environment in the Conditions of Sustainable Development

The article provides a comprehensive analysis of the factors determining the critical environmental state of the air basins in modern Ukrainian cities. It is established that the abnormally high toxicity of transport emissions in Ukraine, compared to European Union countries, is caused by the cumulative effect of the rolling stock's technical degradation (predominantly Euro-2 and Euro-3 classes), the widespread practice of unauthorized removal of exhaust aftertreatment systems (catalytic converters and particulate filters), as well as low fuel quality with excessive sulfur and aromatic hydrocarbon content.

In view of the strategic goals of sustainable development, the study substantiates that a radical improvement of the environmental situation in urbanized areas is possible only through a fundamental restructuring of the urban passenger transport fleet. The object of the study is the transport network of Cherkasy, for which a mathematical model for predicting harmful substance emissions was developed. The model is based on calculating the total annual emissions of major toxicants (NO_x, CO, PM), taking into account the specifics of main transit routes, average daily mileage, and differentiated emission factors for various engine environmental classes.

The scientific novelty of the research lies in the verification of a scenario for replacing medium-capacity buses with large-capacity units (Euro-6 standard) at a 2:1 ratio. The simulation results for Cherkasy confirmed the possibility of reducing nitrogen oxide emissions by 90% and cutting energy consumption by 30%. The proposed approach allows administrative authorities to adequately assess the environmental efficiency of investment projects in the transport sector and to formulate justified requirements for carriers within tender procedures. The practical significance of the model lies in its potential extrapolation to other industrial and logistical centers in Ukraine to predict the outcomes of urban infrastructure modernization.

exhaust gases, harmful substances, fleet renewal, mathematical model

Одержано (Received) 23.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 62-235 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).305-313

О.П. Захарчук, доц., канд. техн. наук
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна
e-mail: olenaskyba8500@gmail.com

Теоретичне дослідження експлуатаційних характеристик пасажирського автобуса з оптимізацією передаточних відношень коробки передач

У статті досліджується вплив різних методик розрахунку перевальних чисел на тягово-швидкісні властивості та паливну економічність транспортного засобу через проведення порівняльної характеристики ефективності класичних підходів до оптимізації трансмісії. Предметом досліджується пасажирський автобус Van Hool 915 Acron, обладнаний механічною коробкою перемикання передач (КПП). Побудовано графічні залежності швидкості руху, тягового зусилля на ведучих колесах та питомої витрати палива на четвертій передачі, що дозволило наочно оцінити вплив структури передаточного ряду на експлуатаційні показники транспортного засобу. Встановлено, що різні методи розрахунку передаточного ряду по-різному впливають на експлуатаційні характеристики транспортного засобу. Визначено, що найкращі показники паливної економічності отримано при використанні методу Чудакова, тоді як метод Токарєва забезпечує підвищені тягові можливості. Метод Лейдермана дозволяє досягти компромісу між динамічними та економічними характеристиками. Доведено, що оптимізація передаточного ряду є ефективним інструментом підвищення енергоефективності транспортних засобів і може бути використана при проєктуванні та модернізації трансмісій автобусів.
трансмісія, передавальне число, тягові характеристики, динамічні характеристики, витрата палива, оптимізація

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвиток автомобільного транспорту спостерігається зростанням вимог до паливної економічності, екологічної безпеки та ефективності експлуатації транспортних засобів. Передусім це стосується пасажирських автобусів, що виконують міжміські та міжнародні перевезення й експлуатуються в умовах тривалого руху з відносно стабільною швидкістю. У таких умовах навіть незначні відхилення режиму роботи двигуна від оптимальної зони можуть спричинити суттєве збільшення витрат палива та сприяти зниженню загальної ефективності перевезень.

Структура трансмісії, а саме передавальні числа коробки перемикання передач є одним із ключових факторів, що визначають ефективність використання потужності двигуна. Якщо передавальний ряд не відповідає умовам експлуатації, це призводить до роботи двигуна в неекономічних режимах, зниження тягових властивостей на окремих ділянках руху, а також спричиняє швидке зношування агрегатів. Зазвичай стандартні механічні коробки передач старого зразка не враховують специфіку реальних умов експлуатації автобусів, що обмежує можливості досягнення оптимальних показників. Разом з тим класичні методики підбору передавальних чисел (геометрична, арифметична прогресії, методи Лейдермана, Чудакова, Токарєва тощо) дають різні результати та не забезпечують універсального рішення, яке б могла одночасно забезпечити високі динамічні, економічні та експлуатаційні характеристики. Це зумовлює необхідність проведення комплексного аналізу та порівняння різних підходів до формування передавального ряду з урахуванням конкретних умов роботи транспортного засобу.

© О. П. Захарчук, 2026

Таким чином, вибір та обґрунтування раціональних передавальних чисел коробки передач пасажирського автобуса є актуальною науково-практичною задачею, вирішення якої забезпечує підвищення паливної економічності, покращення тягово-швидкісних характеристик без суттєвих конструктивних змін базового транспортного засобу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх десяти років дослідження в галузі оптимізації передаточних чисел трансмісій транспортних засобів спрямовані на підвищення паливної економічності, покращення динамічних характеристик та зниження шкідливих викидів. Особлива увага зосереджується на комплексному підходу, що передбачає одночасну оптимізацію передаточних чисел і стратегій перемикання передач. Так, у роботі К. Дж. Оглієва, М. Мохаммадпура, Х. Рахнеджаат (C. J. Oglieve, M. Mohammadpour, H. Rahnejat) [1] встановлено, що узгоджена оптимізація передаточного ряду та алгоритму перемикання дозволяє покращити паливні характеристики без погіршення розгінних характеристик автомобіля.

У роботі Ньюмана К. та Декракера П. (Newman K. та Dekraker P.) [2] проведено комплексне моделювання впливу кількості передач, закону розподілу передавальних чисел, а також передаточного числа головної передачі на паливну економічність та параметри розгону транспортного засобу. Автори встановили,, яким чином вибір структури передавального ряду впливає на витрати палива, та визначили, що раціональний варіант обирається як компроміс між динамічними показниками та паливною економічністю. Таким чином, підтверджено необхідність порівняння різних схем формування ряду передач на етапі проєктування.

У роботі Бера П. (Bera P.) [3], де запропоновано алгоритмічний підхід до визначення передавальних чисел механічної коробки передач, який на відміну від класичних методів, враховує одночасно динамічні характеристики автомобіля, витрати палива, умови експлуатації та ергономічні вимоги. Автором розроблено універсальну процедуру розрахунку, яка дає можливість виконувати порівняння різних варіантів передавального ряду та за сукупністю критеріїв обирати оптимальний. У роботі Ахсана М.Р. (Ahssan M.R.) та ін. [4] розглянуто оптимізацію передавальних чисел і алгоритму перемикання передач для двоступеневої трансмісії електромобіля. Встановлено, що врахування швидкості руху, прискорення та дорожніх умов дає можливість підвищити енергоефективність на 4-7,5 %. Це підтверджує ефективність адаптивного підбору передавальних чисел.

Окремо можна виділити дослідження, орієнтовані на розроблення математичних моделей для оптимального підбору передаточних чисел. У роботі [5] запропоновано методику оптимізації передавального числа безступінчастої трансмісії, враховуючи динамічні характеристики та паливну економічність транспортного засобу. Продемонстровано залежність оптимального закону зміни передавального числа від режиму руху транспортного засобу та характеристик двигуна. У працях Чжан К. (Zhang Q.) [6], досліджується зв’язок між передавальними числами та ККД трансмісії, що дозволяє підвищити загальну ефективність силового агрегату до 95 % шляхом узгодження параметрів передавальних чисел.

У працях вітчизняних вчених, зокрема Криворота А.І. [7] та ін. розглянуто вплив різних методик підбору передаточних чисел коробки передач на паливну економічність і тягово-швидкісні властивості вантажного транспортного засобу. Автори здійснили порівняльний аналіз рядів передаточних чисел, сформованих за законами геометричної, арифметичної та гармонічної прогресій, а також за методиками мінімізації витрат палива, часу розгону та методом Токарєва. З’ясовано, що жодна з розглянутих методик не забезпечує найкращих результатів одночасно за всіма критеріями, а ефективність кожного підходу залежить від умов експлуатації та режимів руху автомобіля. Визначено, що розрахунок оптимальних передаточних чисел повинен

виконуватися на основі всебічного аналізу показників паливної економічності та динамічних характеристик транспортного засобу.

У результаті проведеного дослідження [8, 9] обґрунтовано доцільність удосконалення трансмісії пасажирських автобусів типу Van Hool Acron 915 та Neoplan N316/3 UL шляхом заміни трьох пар шестерень КПП. Зміна передавальних чисел трансмісії суттєво впливає на тягово-швидкісні характеристики транспортного засобу та показники паливної економічності. Встановлено, що впровадження таких рішень у практику експлуатації пасажирських автобусів дозволить підвищити їхню конкурентоспроможність і зменшити витрати палива при виконанні перевезень. Вибір раціональних передавальних чисел трансмісії дозволяє адаптувати транспортний засіб до спеціальних умов експлуатації, тому метою дослідження є проведення порівняльного аналізу показників паливної економічності пасажирського автобуса зі стандартною коробкою передач та з коробкою передач, передаточні відношення якої визначені шляхом оптимізації різними методами підбору.

Постановка завдання. Метою дослідження є розрахунок та порівняння ряду передавальних чисел пасажирського автобуса, комплектованого механічною 8-ступеневою КПП, використовуючи класичні методи підбору. Розрахувати швидкісні, потужнісні та паливно-економічні характеристики досліджуваного транспортного засобу Здійснити порівняльний аналіз методик підбору на основі експлуатаційних характеристик автобуса.

Виклад основного матеріалу. Пасажирський автобус Van Hool 915 Acron належить до туристичних автобусів великого класу і призначений для виконання міжміських та міжнародних перевезень пасажирів. Це модель старого зразка, обладнана механічною ступінчатою коробкою перемикання швидкостей ZF 8S180. Передаточні числа коробки передач змінюються в діапазоні від 8,73 на першій передачі до 1,00 на вищій передачі, що свідчить, що даний транспортний засіб володіє хорошими тяговими характеристиками, так як дозволяє забезпечити ефективне використання потужності двигуна, створити значний крутний момент на ведучих колесах під час рушання та руху на підйомах.

Таблиця 1 –- Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Повна маса автобуса	m_a	19000 кг
Максимальний крутний момент двигуна	M_{max}	1850 Н·м
Номінальна частота обертання	n_N	1900 хв$^{-1}$
Максимальна швидкість	V_{max}	110 км/год
Динамічний радіус колеса	r_d	0,50 м
ККД трансмісії	η_{mp}	0,92
Кількість передач	z	8
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C_x	0,58
Коефіцієнт опору кочення	ψ	0.015
площа лобового опору	F	8,3 м²
максимальний підйом	i_{max}	25%
Головна передача	u_0	4,07
Підвищувальна 8-ма передача	u_{k8}	0,80
Довжина	$Д$	12,0
Ширина	$Ш$	2,55 м
Висота	$В$	3,65 м
Колісна база		5,91 м
колісна формула		4×2

Джерело: розроблено автором

Як силовий агрегат використовується дизельний двигун MAN D2866 LOH29 із робочим об'ємом 11,967 л. Двигун розвиває максимальну потужність до 301 кВт при номінальній частоті обертання 1900 хв$^{-1}$, а максимальний крутний момент становить 1850 Н·м і досягається в діапазоні 900-1300 хв$^{-1}$. Така характеристика двигуна забезпечує високі тягові можливості на низьких обертах, що є важливим для автобусів, які працюють у змінних дорожніх умовах і при значних навантаженнях.

Виконаємо розрахунки передавальних чисел 8-ступінчастої КПП для цього автобуса, використовуючи класичні методи підбору та зберігаючи попередню умову, що 8-ма передача є підвищувальною (рис. 1).

Базовим інструментом при проектуванні КПП є метод Лейдермана, при якому відношення між сусідніми передачами є сталим. Це дає можливість забезпечити однакову відносну зміну частоти обертання двигуна при перемиканні передач, що забезпечує більш плавну роботу трансмісії та ефективне використання потужності двигуна. Математично ряд передавальних чисел визначимо із залежності:

$$u_{ki} = u_{k1} \cdot q^{i-1}, \tag{1}$$

де i – номер передачі; u_{ki} – передавальне число і-ї передачі; q –знаменник геометричної прогресії.

З урахуванням крайніх значень передавальних чисел визичили знаменник прогресії:

$$q = \sqrt[z-1]{\frac{u_{k1}}{u_{kz}}}, \tag{2}$$

де z – кількість передач; u_{k1} – передавальне число вищої передачі.

Метод підбору передавальних чисел за діапазоном ефективних обертів двигуна (методика Чудакова) базується на забезпеченні оптимального тягового зусилля на першій передачі та досягнення максимальної швидкості на вищій передачі з рівномірним (близьким до геометричного) розподілом передавальних чисел. За цією методикою з умови подолання максимального підйому (3) визначили передавальне число першої передачі (4). Проміжні передачі розрахували за законом геометричної прогресії між крайніми значеннями.

$$P_\Sigma = m_a g(\psi + i_{max}), \tag{3}$$

$$u_1 = \frac{P_\Sigma \cdot r_d}{M_{max} \cdot u_0 \cdot \eta_{\text{тр}}}. \tag{4}$$

Методика Токарєва є інженерним підходом визначення передатних чисел КПП, який забезпечує широкий тяговий діапазон транспортного засобу. Приймемо $u_{k\delta}$=0,8. Для 8-ступеневих КПП число ступенів D_k знаходиться в межах 8..10 [10, ст. 25]. Приймемо D_k =10, для автобуса такої ваги, тоді $u_{k1}=D_k$ $u_{k\delta}$= 8,0. Подальші розрахунки виконані за геометричною прогресією.

Для порівняння скористаємося методом арифметичної прогресії як найпростішим способом формування передавального ряду коробки передач. За цим методом передавальні числа змінюються з постійною різницею між сусідніми передачами та утворюють арифметичну прогресію.

$$u_{ki} = u_{k1} - d \cdot (i - 1), \tag{5}$$

де d – різниця прогресії.

$$d = \frac{u_{k1} - u_{kz}}{z-1}. \tag{6}$$

При застосуванні методу арифметичної прогресії передавальні числа коробки передач змінюються з постійним кроком d=0,914.

Таблиця 2 – Порівняння рядів передаточних чисел 8-ступінчастої коробки передач, визначених різними методами

Методика підбору	Передача							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Метод Лейдермана	3,57	2,88	2,33	1,88	1,52	1,23	0,99	0,80
Метод Чудакова	6,05	4,53	3,39	2,54	1,9	1,43	1,07	0,80
Метод Токарєва	8,00	5,80	4,20	3,04	2,20	1,59	1,15	0,80
Арифметична прогресія	6,40	5,60	4,80	4,00	3,20	2,40	1,60	0,80
Стандартна КПП	8,73	6,37	4,62	3,67	2,375	1,737	1,26	1

Джерело: розроблено автором

Розрахунок експлуатаційних характеристик транспортного засобу здійснювався із використанням відомих аналітичних залежностей [10]. Зокрема, для кожного варіанта сформованого передавального ряду коробки передач було послідовно визначено швидкісні (V, км/год), тягові (P_k, Н) та паливно-економічні показники (Q, л/100 км) на четвертій передачі (табл. 3-5).

Таблиця 3 – Швидкісні характеристики автобуса на 4-й передачі, (V, км/год)

Методика підбору	Зміна частоти обертання колінчастого валу об/хв					
	900	1100	1300	1500	1700	1900
Метод Лейдермана	29,771	36,387	43,002	49,618	56,234	62,849
Метод Чудакова	22,035	26,932	31,829	36,725	41,622	46,519
Метод Токарєва	18,411	22,502	26,593	30,684	34,775	38,867
Арифметична прогресія	13,992	17,101	20,211	23,32	26,429	29,539
Стандартна КПП	15,25	18,639	22,028	25,417	28,806	32,195

Джерело: розроблено автором

Таблиця 4 – Тягові характеристики автобуса на 4-й передачі, (P_k, Н)

Методика підбору	Зміна частоти обертання колінчастого валу об/хв					
	900	1100	1300	1500	1700	1900
Метод Лейдермана	32350	33720	34330	34170	33260	31580
Метод Чудакова	43700	45560	46380	46170	44930	42660
Метод Токарєва	52310	54520	55510	55260	53780	51060
Арифметична прогресія	68820	71740	73040	72710	70760	67190
Стандартна КПП	63140	65820	67010	66710	64920	61640

Джерело: розроблено автором

Таблиця 5 – Паливні характеристики автобуса на 4-й передачі, (Q, л/100 км)

Методика підбору	Зміна частоти обертання колінчастого валу об/хв					
	900	1100	1300	1500	1700	1900
Метод Лейдермана	30,161	30,644	31,354	32,206	33,143	33,966
Метод Чудакова	23,04	23,16	23,5	24	24,62	25,26
Метод Токарєва	33,995	34,023	34,364	34,96	35,784	36,693
Арифметична прогресія	35,642	35,472	35,642	36,125	36,863	37,744
Стандартна КПП	35,159	35,046	35,273	35,784	36,551	37,431

Джерело: розроблено автором

Для кожного ряду передавальних чисел побудуємо графічні залежності швидкості та тягової характеристики транспортного засобу в діапазоні змін частот обертання колінчастого валу двигуна (рис. 2, 3), та паливно економічну характеристику на четвертій передачі (рис.4).

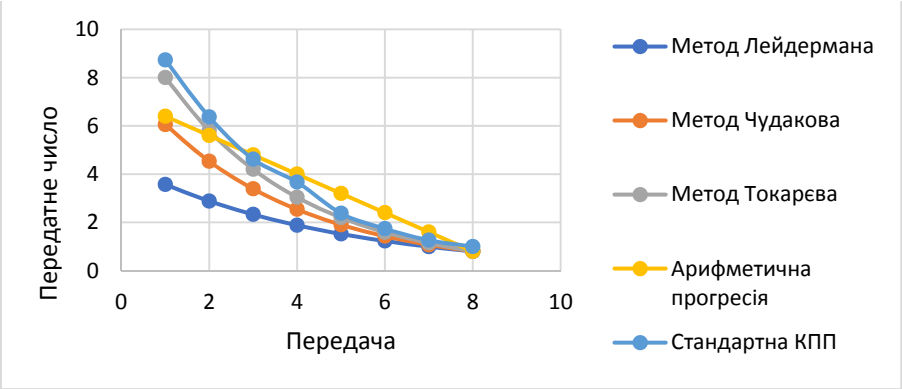


Рисунок 1 - Порівняння передавальних чисел коробки передач, отриманих за різними методиками
Джерело: розроблено автором

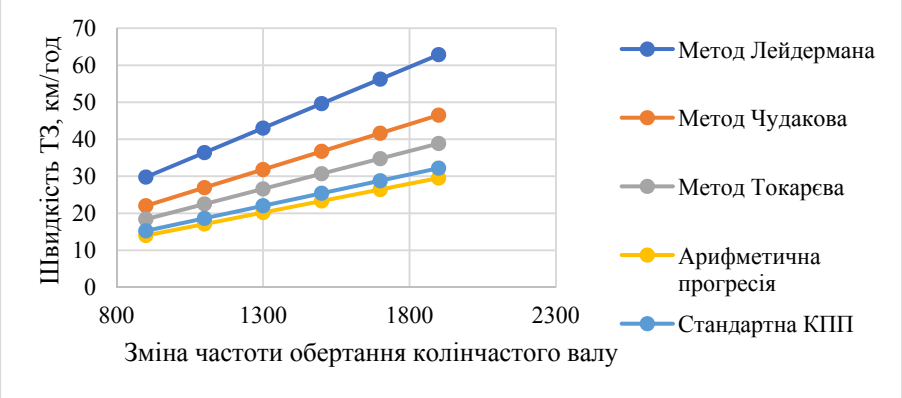


Рисунок 2 – Швидкісні характеристики автобуса на четвертій передачі при використанні різних методик формування передавального ряду коробки передач
Джерело: розроблено автором

З рис. 2 бачимо, що найвищі швидкості забезпечує метод Лейдермана, що пояснюється меншими передавальними числами на середніх передачах, а також Метод Чудакова.

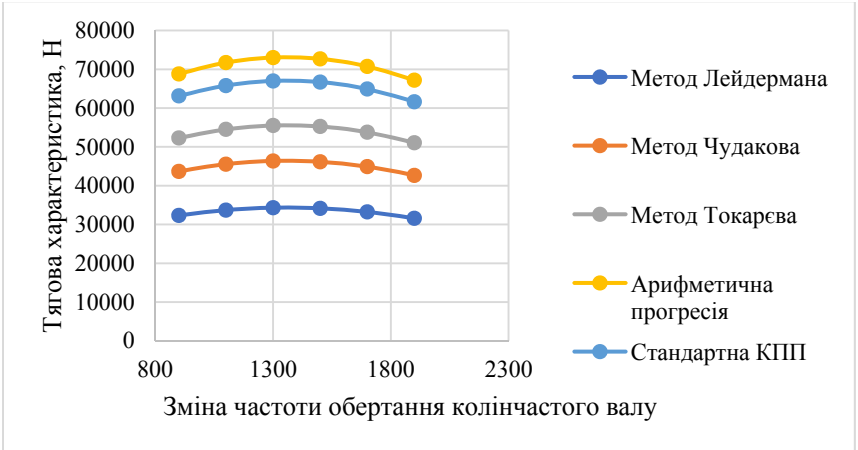


Рисунок 3 – Тягові характеристики автобуса на четвертій передачі при використанні різних методик формування передавального ряду коробки передач
Джерело: розроблено автором

Аналіз рисунка 3 показує, що максимальне тягове зусилля досягається при використанні арифметичної прогресії та методу Токарєва. Метод Чудакова забезпечує високі, але помірні значення тягового зусилля, тоді як метод Лейдермана має найнижчі значення тяги. Це пояснюється меншими передавальними числами, які забезпечують більшу швидкість, але менше тягове зусилля.

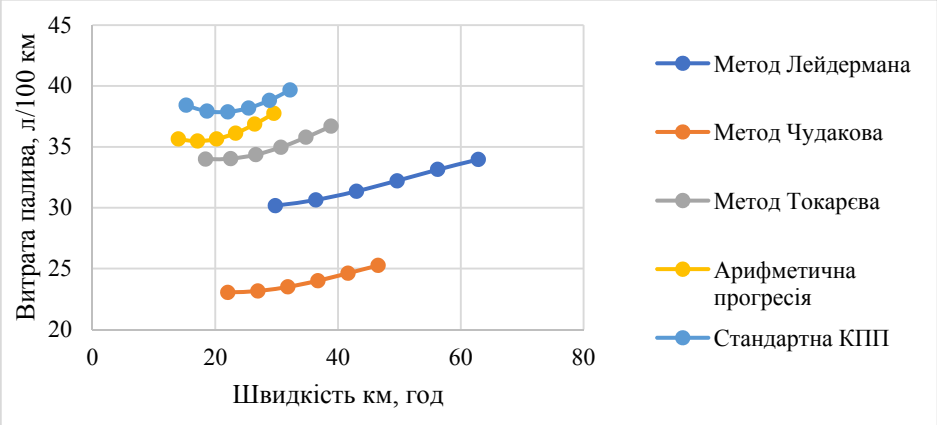


Рисунок 4 – Паливно-економічні характеристики автобуса на четвертій передачі при використанні різних методик формування передавального ряду коробки передач

Джерело: розроблено автором

З рисунка 4 видно, що найменші значення витрати палива характерні для методу Чудакова, що пояснюється кращим узгодженням передавальних чисел із діапазоном ефективної роботи двигуна. Метод Лейдермана демонструє середні значення витрати палива, тоді як метод Токарєва, арифметична прогресія та стандартна КПП мають найбільші витрати.

Висновки. У результаті проведеного теоретичного дослідження можна зробити висновок, що різні методики підбору передавальних чисел забезпечують різний баланс між динамічними властивостями та економічністю. Зокрема, метод Лейдермана характеризується рівномірним розподілом передаточних чисел та плавністю зміни режимів роботи двигуна, що позитивно впливає на стабільність руху та керованість автобуса. Метод Чудакова сприяє підвищенню показників паливної економічності, що підтверджується найнижчими значеннями витрати палива у досліджуваному діапазоні режимів роботи двигуна. Методи Токарєва та арифметичної прогресії сприяють покращенню тягових характеристик, однак супроводжуються зростанням витрат палива, що обмежує їхню ефективність у міжміських перевезеннях. Порівняльний аналіз зі стандартною коробкою передач показав, що оптимізація передаточних відношень дозволяє покращити окремі експлуатаційні показники автобуса без конструктивного ускладнення трансмісії. Найбільш доцільним з позиції комплексної ефективності є застосування методики Чудакова. Таким чином, оптимізація передаточних чисел коробки передач є ефективним напрямом покращення експлуатаційних характеристик пасажирських автобусів. Це дає можливість знизити витрати палива, покращити тягові властивості та оптимізувати передавальні відношення КПП до спеціальних умов експлуатації транспортного засобу. Так як досліджуваний транспортний засіб експлуатується в міжміських і міжнародних перевезеннях, можемо зробити висновок, що найбільш раціональним методом підбору передавальних чисел КПП є застосування методу Чудакова, оскільки він забезпечує зниження витрати палива на **20–35% порівняно зі стандартною трансмісією**, при збереженні достатніх тягових і швидкісних характеристик автобуса.

Список літератури

1. Oglieve C. J., Mohammadpour M., Rahnejat H. Optimisation of gear ratios and gear shifting strategy for vehicle fuel economy and emissions . *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *Part D: Journal of Automobile Engineering.* 2017. Vol. 231, No. 7. P. 883–894. DOI: 10.1177/0954407017702985.
2. Newman K., Dekraker P. Modeling the effects of transmission gear count, ratio progression, and final drive ratio on fuel economy and performance . *SAE Technical Paper.* 2016. DOI: 10.4271/2016-01-1143.
3. Bera P. A design method of selecting gear ratios in manual transmissions . *Mechanism and Machine Theory.* 2019. Vol. 133. P. 397–414. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.022.
4. Ahssan M. R., Ektesabi M., Gorji S. Gear ratio optimization for a two-speed transmission in electric vehicles . *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 19. Article 5073. DOI: 10.3390/en13195073.
5. Li X., Chen B., Evangelou S. A. Optimized design of multi-speed transmissions for parallel hybrid electric vehicles . *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol. 53, No. 2. P. 14147–14153. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1024.
6. Zhang Q. Coupled modeling of transmission ratio and efficiency for vehicle systems . *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Article number: 37023. DOI: 10.1038/s41598-026-37023-x.
7. Криворот А. І., Шаповал М. В., Скорик М. О., Шпилька М. М. Теоретичне дослідження паливних характеристик зерновоза КрАЗ 5401с2 з оптимізацією передаточних відношень коробки передач. *Інноваційні аспекти систем безпеки праці, захисту інтелектуальної власності*: матеріали VI Всеукр. наук.- практ. Інтернет-конференції (Полтава, 25-26 березня 2021 р.). Полтава: ПДАУ, 2021. С. 253-257. https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/1239/zbirnyk-konfer-bzhd-2021-1.pdf?utm_source=chatgpt.com
8. Захарчук О. П., Розум Р. І., Буряк М. В., Фалович Н. М. Обґрунтування доцільності удосконалення трансмісії пасажирських автобусів типу Van Hool Acron 915 та Neoplan N316/3 UL . *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті.* 2022. № 1(18). С. 81–87. DOI: 10.36910/automash.v1i18.762.
9. Захарчук О. П. Оцінка економічної ефективності оптимізації трансмісії автобуса шляхом зміни передаточного числа головної передачі . *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч. II. С. 118–125.
10. Автомобілі. Курсове проєктування : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Смирнов Є. В., Огневий В. О., Борисюк Д. В. Вінниця : ВНТУ, 2023. 154 с

References

1. Oglieve, C. J., Mohammadpour, M., & Rahnejat, H. (2017). Optimisation of gear ratios and gear shifting strategy for vehicle fuel economy and emissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 231(7), 883–894. https://doi.org/10.1177/0954407017702985
2. Newman, K., & Dekraker, P. (2016). Modeling the effects of transmission gear count, ratio progression, and final drive ratio on fuel economy and performance. *SAE Technical Paper*. URL: https://doi.org/10.4271/2016-01-1143
3. Bera, P. (2019). A design method of selecting gear ratios in manual transmissions. *Mechanism and Machine Theory*, 133, 397–414. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.022
4. Ahssan, M. R., Ektesabi, M., & Gorji, S. (2020). Gear ratio optimization for a two-speed transmission in electric vehicles. *Energies*, 13(19), Article 5073. https://doi.org/10.3390/en13195073
5. Li, X., Chen, B., & Evangelou, S. A. (2020). Optimized design of multi-speed transmissions for parallel hybrid electric vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 14147–14153. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1024
6. Zhang, Q. (2026). Coupled modeling of transmission ratio and efficiency for vehicle systems. *Scientific Reports,* 16, Article 37023. https://doi.org/10.1038/s41598-026-37023-x.
7. Kryvorot, A. I., Shapoval, M. V., Skoryk, M. O., & Shpilka, M. M. (2021). Theoretical study of fuel characteristics of the KrAZ 5401s2 grain truck with optimization of gearbox ratios. *Innovatsiyni aspekty system bezpeky pratsi, zakhystu intelektual'noyi vlasnosti*: materialy VI Vseukr. nauk.- prakt. Internet-konferentsiyi (pp.253-257). Poltava: PDAU [in Ukrainian].
8. Zakharchuk, O.P., Rozum, R.I., Buryak, M.V., & Falovich, N.M. (2022). Justification of the feasibility of improving the transmission of passenger buses of the Van Hool Acron 915 and Neoplan N316/3 UL type . *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 1(18), С. 81–87. DOI:

10.36910/automash.v1i18.762. [in Ukrainian].
9. Zakharchuk, O. P., Kysil, V. O., Shevchuk, O. S., Falovich, N. M., & Zakharchuk, V. B (2024). Assessment of the economic efficiency of optimizing the transmission of passenger buses of the Setra S 417 type. *Tsentral'noukrayins'kyy naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky, 9(40), CH. II, 112–118*. https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/9%2840%29_II/14.pdf [in Ukrainian].
10. Smyrnov, YE. V., Ohnevyy, V. O., & Borysyuk, D. V. (2023). Avtomobili. Kursove proyektuvannya: elektronnyy navchal′nyy posibnyk kombinovanoho (lokal′noho ta merezhnoho) vykorystannya [Elektronnyy resurs] . Vinnytsya : VNTU. [in Ukrainian].

Olena Zakharcuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Theoretical Study of the Operational Characteristics of a Passenger Bus with Optimization of Gearbox Ratios

The aim of the article is to conduct a theoretical study of the influence of gearbox ratios on the operational characteristics of a passenger bus and to determine a rational method for forming a gear range. Particular attention is paid to assessing the influence of different methods for calculating gear ratios on the traction and speed properties and fuel economy of the vehicle. In addition, the task is set to compare the effectiveness of existing approaches to optimizing the transmission.

The paper has conducted a theoretical study of a Van Hool 915 Acron passenger bus with a manual gearbox. The gear ratios of an 8-speed gearbox have been calculated using the Leiderman, Chudakov, Tokarev and arithmetic progression methods. Gear ranges have been formed for each option and their comparative analysis has been performed. Based on the data obtained, a comprehensive calculation of the speed, traction and fuel economy characteristics of the bus at different engine operating modes, including nominal, partial and limit load modes. Graphical dependences of driving speed, traction force on the drive wheels and specific fuel consumption on the engine crankshaft rotation frequency were constructed, which made it possible to clearly assess the influence of the gear train structure on the operational performance of the vehicle. It was established that different methods of forming the gear train have different effects on the efficiency of using engine power. In particular, methods with higher gear ratios provide better traction properties, while methods with a more uniform distribution contribute to reducing fuel consumption. The results obtained were compared with the characteristics of a standard gearbox.

As a result of the study, it was found that the choice of the gear ratio selection method significantly affects the operational performance of the bus. The best fuel efficiency indicators were obtained when using the Chudakov method, while the Tokarev method provides increased traction capabilities. The Leiderman method allows you to achieve a compromise between dynamic and economic characteristics. It has been proven that gear range optimization is an effective tool for increasing the energy efficiency of vehicles and can be used in the design and modernization of bus transmissions.

transmission, gear ratio, traction characteristics, dynamic characteristics, fuel consumption, optimization.

Одержано (Received) 04.04.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 06.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 08.04.2026

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 330.332:629.331 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).314-321

Т. В. Гайкова, доц., канд. техн. наук
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна
e-mail: tanyahaikova@ukr.net

Інноваційна складова управління ланцюгами постачання автомобільного транспорту на основі інтеграції маркетингових та логістичних технологій

У статті досліджено інноваційне управління ланцюгами постачання в умовах цифровізації ретейлу. Обґрунтовано перехід до гнучких стратегій «витягування» на основі інтеграції маркетингу й логістики. Визначено роль ERP, SCM та PRM-систем у подоланні інформаційної розрізненості. Розглянуто застосування стандартів EDIFACT, SCOR-моделі та систем моніторингу. Доведено, що предиктивна аналітика й синхронізація дій учасників мережі підвищують якість сервісу та оптимізують витрати ритейлу.

управління ланцюгами постачання, інформаційні ресурси, логістична інтеграція, маркетингові дані, інновація, цифрова трансформація, клієнтоорієнтованість

Постановка проблеми. Масове впровадження інтегрованих систем управління на вітчизняному ринку залишається складним і суперечливим питанням. Головними труднощами є узгодженість інформаційних систем і розрізненість інформаційних потоків, ізольована автоматизація кожного підрозділу, невелика кількість єдиних інформаційних платформ і стандартів обміну даними між логістичними партнерами. Виникає повторення даних, утворення надлишку матеріальних і товарних запасів, значні витрати часу та інші непродуктивні витрати, що зменшують результативність моделей бізнесу.

Тому доцільно визначити ключовий показник ефективності функціонування ланцюгів постачання, засади та переваги використання логістичної інформаційної системи, оглянути міжнародні норми синхронізації для учасників логістичного процесу. Опрацювати нові технології, які заохочують інтегрований розвиток осередка, завдяки автоматизації роботи з документами, супутниковому спостереженню та використання програмного забезпечення щодо роботи ланцюгів постачання з використанням інструментів управління потоками товарів і послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішення задач оптимізації мережевого ритейлу неможливе без відповідного інформаційного супроводу бізес-процесів. Логістична та маркетингова інформація є найважливішим стратегічним ресурсом. Впровадження цифрових інструментів дозволяє не лише радикально знизити витрати, а й досягти «ювелірної» точності в управлінні потоками, забезпечуючи безпрецедентну швидкість та злагодженість усіх процесів. Звертаючись до спадщини класиків інтегрованої логістики, варто виділити тезу Д. Бауерсокса, Д. Клоса, М. Купера про те, що: «фірми з передовими логістичними системами вважають, що дешевше за допомогою інформації шукати оптимальні рішення, ніж здійснювати неоптимальні переміщення запасів» [1].

© Т. В. Гайкова, 2026

Постановка завдання. Метою статті є дослідження теоретичних засад та практичного інструментарію інтеграції маркетингових і логістичних технологій як ключового фактора оптимізації сучасних ланцюгів постачання.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Розглянути трансформацію механізмів управління від «виштовхування» до реактивного реагування «витягування».

2. Виокремити сильні сторони втілення єдиної логістичної інформаційної системи (ЛІС).

3. Визначити вплив інноваційних технологій з метою забезпечення ефективної взаємодії системи ланцюга постачання.

4. Проаналізувати специфіку впровадження інтегрованих маркетингово-логістичних рішень у діяльність підприємств автомобільного транспорту.

5. Обґрунтувати роль інноваційної складової у підвищенні конкурентоспроможності автотранспортних ланок у глобальних ланцюгах постачання.

Виклад основного матеріалу. Використання сучасних логістичних та маркетингових технологій дає можливість відійти від традиційної моделі «виштовхування» товарів на користь гнучкого механізму «витягування», що базується на реальному споживчому попиті. Інформаційні ресурси показуємо як своєрідне «дерево», що складається з 12 базових елементів (рис. 1). Інформаційний обмін дозволяє узгодити різницю між попитом, що пред'являється покупцями, та наявними ресурсами. Ключовий вектор логістики спрямований на превентивне виявлення потреб через механізми прогнозування. Кожна функціональна область логістики диктує унікальні параметри щодо розмірів замовлень, доступності запасів, та швидкості логістичного циклу. Системні помилки в координації призводять до виникнення непродуктивних витрат та формування надлишкових складських залишків. Представлена у вигляді 12-елементного «дерева» система інформаційних ресурсів є фундаментом для гармонізації ринкового попиту та ресурсного наповнення.

Вирішенням цієї проблеми є впровадження єдиної логістичної інформаційної системи (ЛІС), що дозволяє автоматизувати облік та управління товарами, грошима та документами в торгових операціях компанії, формування замовлень та відстеження їх виконання, ведення аналізу статистичних даних. Ця система протистоїть ізольованим системам кожного підрозділу, коли інформація через відсутність інтеграції заноситься до баз даних кілька разів. Це призводить до непродуктивних витрат робочого часу, роздробленості внутрішнього інформаційного потоку, помилок та спотворень даних, тобто до зниження ефективності інформаційних систем.



Рисунок 1 – Інформаційний базис інтегрованої логістичної системи

Джерело: розроблено автором

Глобальна цифровізація та розквіт електронного бізнесу стирають традиційні географічні й організаційні бар'єри, зміщуючи фокус компаній з внутрішньої оптимізації на побудову глибокої інтеграції із зовнішнім середовищем. Завдяки електронній комерції світ стає «прозорим», а корпоративні кордони – умовними. Сьогодні успіх залежить не стільки від того, як налаштовані внутрішні справи компанії, скільки від якості її зв'язків із партнерами та споживачами. Це спонукає бізнес до постійної еволюції процесів (рис. 2). Головна революція інформаційного часу – у зміні вектору: замість традиційного нав'язування серійного продукту ринку «виштовхування», сучасний бізнес перейшов до реактивного реагування на запит «витягування». Тепер саме клієнт своєю вимогою і запитом формує ланцюг постачання, замовляючи унікальні та дрібносерійні товари та послуги.

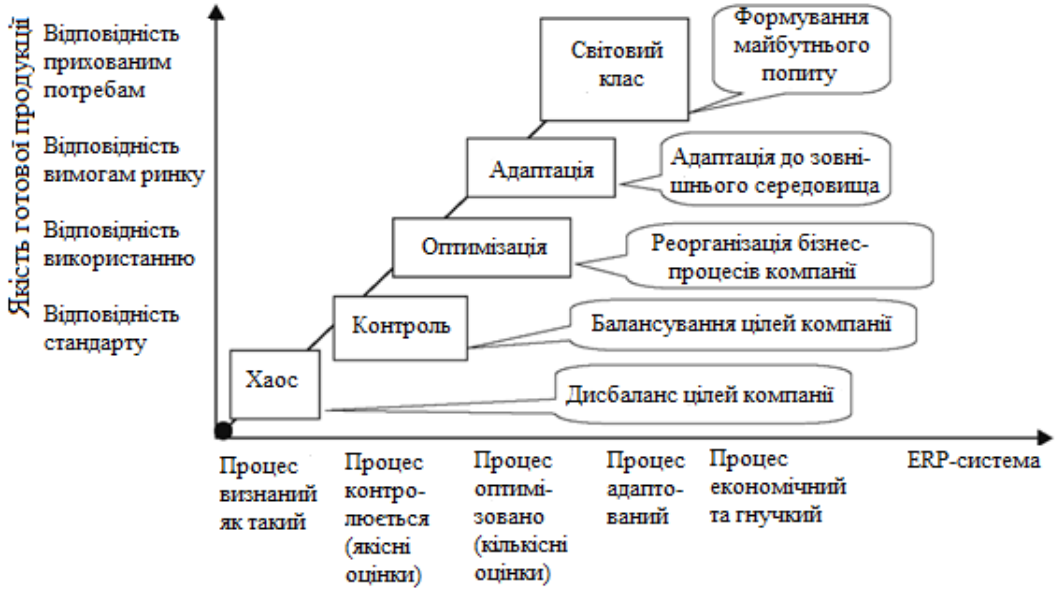


Рисунок 2 – Оцінка процесу на повноту та точність

Джерело: розроблено автором

Логічним наслідком ринкових змін є виникнення високоефективних технологій партнерської взаємодії. Одним із найдієвіших інструментів у світі визнано Supply Chain Management (SCM). Аналіз доробок таких авторитетів, як Дж. Сток, Д. Ламберт [2] а також вітчизняних дослідників, зокрема М. А. Окландера [3], С. В. Смерічевської [4], Є. В. Крикавського [5] підтверджує, що сучасна логістика трансформується у високотехнологічну систему управління потоками даних у реальному часі, що дозволяє трактувати УЛП як комплексну парадигму. Вона базується на систематичній синхронізації бізнес-функцій усіх учасників ланцюга. Мета такого підходу – перетворити розрізнені фірми на єдиний злагоджений організм, де стратегічна координація працює на підвищення результативності кожного елемента системи.

Фундаментальна архітектура управління ланцюгами постачання базується на таких концептуальних засадах:

1. Цілісність та системність щодо сприйняття ланцюга постачання як єдиного цілого. Це дозволяє здійснювати наскрізне адміністрування товарно-матеріальних потоків і складських резервів на кожному етапі – від первинного джерела сировини до фінального клієнта.

2. Стратегічна синергія направляє вектор на об'єднання та синхронізацію виробничих потужностей і стратегічних компетенцій усіх партнерів. Такий підхід

трансформує розрізнені внутрішньофірмові ресурси в єдиний конкурентоспроможний актив [6].

3. Клієнтоцентрована ціннісна орієнтація з фокусуванням на проєктуванні унікальної споживчої цінності. Головною метою є не просто реалізація товару, а розробка індивідуалізованих рішень, що максимально повно задовольняють запити конкретного покупця [7].

Реалізація зазначених принципів зумовлює формування ключових векторів діяльності в межах ланцюгів постачання. До них належать:

– Інтегрована модель поведінки та синергійна взаємодія учасників;

– Прозорість інформаційного обміну, що передбачає спільний розподіл ризиків та отриманих результатів;

– Стратегічне партнерство, спрямоване на довгострокову співпрацю та єдність цілей у сфері клієнтського сервісу;

– Глибока інтеграція бізнес-процесів усіх контрагентів.

Концептуально УЛП (SCM) фокусується на наскрізному управлінні функціональними сферами логістики та координації взаємодії з партнерами. Фактично, ця концепція є фундаментом корпоративної стратегії, що реалізується через інформаційно-технологічний інструментарій ERP-систем. Саме тому модулі УЛП є невід'ємною складовою сучасних корпоративних інформаційних систем (КІС) класу ERP/SCM. Це дає втілення політики «точно у термін» (just-in-time) з можливістю руху матеріальних потоків та надання сервісних послуг з найменшими витратами на логістику [8-9].

В управлінні ланцюгами постачання завдяки КІС розвиваються інноваційні рішення для обміну даними завдяки застосуванню:

1. Протоколів бездротового зв'язку (WAP);

2. Технологій пакетної передачі даних (GPRS);

3. Супутникових навігаційних систем.

Завдяки цьому втілюється постійний нагляд та внесення виправлень до операцій логістики на різних етапах ланцюга постачань.

Проведені дослідження показують, що успіх залежить від таких чинників, як довіра, надійність та впевненість партнерів, що не буде програвших. Досягнути цього їм допомагають корпоративні додатки порівняно нового класу під назвою PRM (Partner Relationship Management) – системи управління відносинами з партнерами.

Хоча функціонал PRM має спільні риси із системами CRM (Customer Relationship Management) – управління відносинами з клієнтами та концепцією ECR (Effective Customer Response) – ефективний відгук на запити клієнтів, їхня архітектура сфокусована на оптимізації взаємодії саме з дистриб'юторами та контрагентами. Системи PRM пропонують низку стратегічних переваг для ланцюгів постачання:

– Миттєва синхронізація з оперативного інформування партнерів про нові маркетингові ініціативи та стратегічні зміни;

– Цифрове навчання з інтеграцією освітніх платформ у режимі online для підвищення кваліфікації персоналу всіх учасників мережі;

– Предиктивна аналітика надає можливість для виробника чітко ідентифікувати найбільш рентабельних та ефективних партнерів.

Вирішальний успіх щодо ефективного втілення управління ланцюгом постачання є активна взаємодія всіх учасників процесу. Це вимагає уніфікації бізнес-процесів через впровадження стандартизованих моделей. Найбільш визнаним світовим стандартом у цій сфері є SCOR-модель (Supply Chain Operations Reference). Вона дозволяє не лише описати архітектуру ланцюга постачання в уніфікованому форматі, а

й налагодити безперешкодний обмін даними між підприємствами, створюючи прозору та керовану систему.

Для оптимізації сучасних ланцюгів постачання у світовій практиці використовуються такі технології.

1. Впровадження технології електронного документообігу (EDI), що базується на принципах безпаперової обробки даних [10-11]. Застосування цього інструменту дозволяє не лише радикально прискорити передачу інформації та мінімізувати операційні витрати на адміністрування, а й забезпечити високу якість супроводу вантажів у режимі реального часу. Надійність та уніфікація процесів кодування даних у цій системі гарантується використанням міжнародного стандарту UN/EDIFACT, розробленого під егідою ООН, що робить інформаційні потоки прозорими та сумісними для всіх глобальних учасників логістичного процесу.

2. Технології складування та вантажопереробки. Цей комплекс рішень забезпечує безперебійне виконання широкого спектра операцій, починаючи від фізичного розподілу продукції на складських площах і завершуючи автоматизацією вантажно-розвантажувальних процесів. Завдяки цим технологіям здійснюється ефективна консолідація, розукрупнення, сортування та пакування товарів, а також точне комплектування замовлень і координація місцевих перевезень. Крім того, вони відіграють критичну роль у синхронізації попиту та пропозиції в межах ланцюга постачання шляхом стратегічного формування складських, страхових і сезонних запасів, що гарантує стійкість логістичної системи до ринкових коливань.

3. Технології штрихового кодування та сканування. Цей інструментарій забезпечує наскрізну ідентифікацію вантажних одиниць – від окремих пакунків до великих контейнерів – на кожному етапі ланцюга постачання. Завдяки використанню скануючих пристроїв досягається миттєве введення достовірних даних у корпоративні мережі, що дозволяє отримувати вичерпну інформацію про продукт, виробника та всіх логістичних посередників у режимі реального часу. Впровадження цієї технології автоматизує облік товарного руху, спрощує обробку супровідної документації та забезпечує безперервний моніторинг просування кожної одиниці товару. У підсумку це призводить до суттєвого прискорення виконання замовлень, мінімізації помилок «людського фактору» та загального зниження логістичних витрат на обробку інформаційних і вантажних потоків.

4. RFID-мітка (Radio Frequency IDentification) – це компактний пристрій для зберігання та передачі даних, що базується на технології радіочастотної ідентифікації. Пристрій зберігання даних на основі радіотехнології має невеликі розміри, значний обсяг пам’яті та дозволяє багаторазовий перезапис інформації. На основі радіочастотної мітки була офіційно зареєстрована нова глобальна технологія Radio Frequency IDentification (RFID). Радіочастотна ідентифікація, що дозволяє здійснювати безконтактне введення та зчитування даних з радіоміток на відстані і без прямої видимості мітки, використовуючи як стаціонарні, так і мобільні зчитувачі. Використання даної технології на основі діджиталізації є економічно ефективно. Переваги, які отримують рітейлери є очевидні і виражаються в тотальному контролі за рухом товарів у структурі торгівельної організації без участі людини у онлайн-режимі, автоматизація ланцюга постачання щодо оптимального управління запасами [12-13].

5. Супутниковий моніторинг вантажопотоків та транспортних засобів. Використання систем супутникової навігації забезпечує безперервний контроль дислокації транспортних одиниць у режимі реального часу, що є критично важливим для прозорості всього ланцюга постачання. Ця технологія дозволяє підтримувати постійний двосторонній зв’язок із водієм для оперативного коригування маршрутів у

разі зміни пріоритетів або виникнення непередбачених обставин [14-15]. Завдяки прецизійному визначенню місцезнаходження та прогнозуванню точного часу прибуття компанії отримують можливість максимально ефективно планувати логістичні операції, мінімізувати простої та надавати водіям необхідну консультативну підтримку під час взаємодії з іншими учасниками ланцюга.

Ключовим показником ефективності функціонування ланцюгів постачання виступає коефіцієнт корисної дії часового ресурсу, що визначається як відношення чистого операційного часу до загального циклу підготовки та реалізації договірних зобов'язань, а також рівень генерованої доданої вартості та якість логістичного сервісу. Узгодження та координація усіх дійових осіб, визначення скоординованих напрямків роботи в умовах інформаційної та технологічної сумісності на різних етапах товароруху визначають відчутний ефект синергії. Це дозволяє досягти суттєвої мінімізації сукупних витрат у системі розподілу, оптимізувати асортиментну політику відповідно до реальних запитів споживачів, вибудувати раціональну структуру посередницьких ланок та радикально підвищити стандарти обслуговування як кінцевих покупців, так і корпоративних партнерів.

Висновки. 1. У результаті дослідження визначено, що цифрова трансформація надала можливість реалізувати ERP, SCM та PRM-системи з перебудовою траєкторії «виштовхування» до «витягування», де логістичний ланцюг автомобільного транспорту формується безпосереднім запитом споживача.

2. Встановлено, що втілення ЛІС на основі міжнародних норм (моделі SCOR, вимог UN/EDIFACT) разом із механізмами радіочастотної ідентифікації та супутникового моніторингу гарантує зрозумілий потік інформації, скорочення витрат на операційну діяльність та суттєве покращення обслуговування клієнтів.

3. Доведено, що застосування предиктивної аналітики та інноваційне узгодження роботи партнерів забезпечує ефективну взаємодію системи ланцюга постачання, що призводить до стратегічного зменшення витрат ритейлу та підвищення загальної гнучкості системи.

4. Визначено провідний чинник удосконалення управління – синергія маркетингових і логістичних технологій, яка дозволяє підприємствам автомобільного транспорту адаптувати транспортні потужності до ринкових потреб у режимі реального часу.

5. Обґрунтовано, що інноваційна складова управління ланцюгами постачання на основі інтеграції маркетингових та логістичних технологій є базовим чинником зміцнення конкурентних позицій автомобільного транспорту на ринку. Встановлено, що саме здатність системи до швидкої цифрової адаптації визначає ефективність автотранспортних ланок у глобальних мережах. Подальші дослідження мають спрямування на втілення механізмів штучного інтелекту щодо предиктивного моделювання поведінки споживача в сучасних умовах.

Список літератури

1. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B., Bowersox J. C. Supply Chain Logistics Management. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2020. 496 p.
2. Stock J. R., Lambert D. M. Strategic Logistics Management. 4th ed. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2001. 872 p.
3. Окландер М. А. Логістика: підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2021. 345 с.
4. Смерічевська С. В., Проданова Л. В., Якушев О. В. Цифровізація логістики та управління ланцюгами постачання. *Інтелектуалізація логістики та управління ланцюгами постачання.* 2024. № 26. С. 113–123.

5. Крикавський Є. В., Похильченко О. А., Фертч М. Логістика та управління ланцюгами поставок: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 848 с.
6. Аулін В. В. Тектологічний підхід формування логістичних систем на транспортних і виробничих підприємствах. *Центральноукраїнський науковий вісник.* Технічні науки. 2022. Вип. 5(36) ч. II. С.313-324. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.313-324
7. Олефіренко О. М. Комерціалізація інновацій як об'єктивний чинник ефективного функціонування промислового підприємства. Східна Європа: економіка, бізнес та управління. 2016. Вип. 5 (05). С. 184–189.
8. Аулін В.В., Великодний Д.О. Моделювання ланцюга постачання в транспортно-логістичній системі. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання:* зб. мат доповідей учасників 3-ої Всеукр. наук.теор. конф. Дрогобич.: Посвіт, 2019. С. 68–69.
9. Аулін В.В., Великодний Д.О., Голуб Д.В., Дьченко В.О. Підвищення ефективності управління логістичним ланцюгом постачання в транспортній системі. *Крамаровські читання:* зб. мат доповідей учасників VI Міжнародної науково-технічної конференції. Київ: НУБіП, 2019. С. 195–198.
10. Sevidova I., Salnikov S., Kalinichenko O. Application of digital technologies in the delivery of cargo in international traffic. *Municipal Economy of Cities*. 2023. № 3(177). P. 200–205.
11. Цимбалістова О. А., Харченко М. В., Юденко Є. В. Інформаційні технології в системі логістичного обслуговування бізнес-процесів. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського*. 2020. Т. 31 (70). № 6. С. 148–154. DOI: https://doi.org/10.32838/2523-4803/70-6-25
12. Клюєв С. О., Цимбал С. В., Сігонін А. Є. Розвиток інтелектуальних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2023. № 2. С. 80–86.
13. Перерва П. Г., Маслак М. В., Кобєлєва А. В. Методологічні засади маркетингового забезпечення комерціалізації інтелектуальної власності. *Маркетинг і цифрові технології.* 2022. Т. 6. № 2. С. 38 –48.
14. Гайкова Т. В., Загорянський В. Г., Леонтович А. О. Впровадження цифрових технологій в управління ланцюгами постачань. *Центральноукраїнський науковий вісник.* Технічні науки. 2023. Вип. № 7 (38), ч. І. С. 222–228. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.222-228.
15. Гайкова Т. В., Мороз М. М., Загорянський В. Г., Бурєнніков Ю. Ю. Проєктний аналіз цифрових технологій в управлінні ланцюгом постачань. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. № 1 (17). С. 17–22. DOI https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-17-22

References

1. Bowersox, D. J., Closs, D. J., Cooper, M. B., & Bowersox, J. C. (2020). *Supply Chain Logistics Management*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education.
2. Stock, J. R., & Lambert, D. M. (2001). *Strategic Logistics Management*. 4th ed. New York: McGraw-Hill/Irwin.
3. Oklander, M. A. (2021). *Logistics: textbook*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].
4. Smerichevska, S. V., Prodanova, L. V., & Yakushev, O. V. (2024). *Digitalization of logistics and supply chain management*. Intelektualizatsiia lohistyky ta upravlinnia lantsiuhamy postachannia, 26, 113–123 [in Ukrainian].
5. Krykavskyi, Ye. V., Pokhylchenko, O. A., & Fertsch, M. (2020). *Logistics and supply chain management*: textbook. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky [in Ukrainian].
6. Aulin, V. V. (2022). *Tektolohichnyi pidkhid formuvannia lohistychnykh system na transportnykh i vyrobnychykh pidpryiemstvakh.* Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 5(36), 2, 313–324. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.313-324 [in Ukrainian].
7. Olefirenko, O.M. (2016). *Komertsializatsiia innovatsii yak obiektyvnyi chynnyk efektyvnoho funktsionuvannia promyslovoho pidpryiemstva*. Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia Vol. 5 (05), pp. 184-189 [in Ukrainian].
8. Aulin, V. V., & Velykodnyi, D. O. (2019). *Modeliuvannia lantsiuha postachannia v transportno-lohistychnii systemi*. Problemy z transportnymy potokamy i napriamy yikh rozviazannia: zb. mat dopovidei uchasnykiv 3-oi Vseukr. nauk.teor. konf., 68–69 [in Ukrainian].
9. Aulin, V. V., Velykodnyi, D. O., Holub, D. V., & Diachenko, V. O. (2019). *Pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia lohistychnym lantsiuhom postachannia v transportnii systemi.* Kramarovski chytannia: zb. mat dopovidei uchasnykiv VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 195–198 [in Ukrainian].
10. Sevidova, I., Salnikov, S., & Kalinichenko, O. (2023). *Application of digital technologies in the delivery of cargo in international traffic*. Municipal Economy of Cities, 3(177), 200–205.

11. Tsymbalistova, O. A., Kharchenko, M. V., & Yudenko, Ye. V. (2020). *Information technologies in the system of logistic service of business processes*. Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho, 31(70), 6, 148–154 [in Ukrainian].
12. Kliuiev, S. O., Tsymbal, S. V., & Sihonin, A. Ye. (2023). *Rozvytok intelektualnykh transportnykh system*. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, 2, 80–86 [in Ukrainian].
13. Pererva, P. H., Maslak, M. V., & Kobielieva, A. V. (2022). *Metodolohichni zasady marketynhoho zabezpechennia komertsializatsii intelektualnoi vlasnosti.* Marketynh i tsyfrovi tekhnolohii, 6(2), 38–48 [in Ukrainian].
14. Haikova, T. V., Zahorianskyi, V. H., & Leontovych, A. O. (2023). *Implementation of digital technologies in supply chain management*. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 7(38), 1, 222–228 [in Ukrainian].
15. Haikova, T. V., Moroz, M. M., Zahorianskyi, V. H., & Burennikov, Yu. Yu. (2023). *Project analysis of digital technologies in supply chain management*. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, 1(17), 17–22 [in Ukrainian].

Tetiana Haikova, Assoc. Prof., PhD tech. sci
Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

An Innovative Component of Road Transport Supply Chain Management Based on the Integration of Marketing and Logistics Technologies

The aim of the article is to study the theoretical foundations and practical tools of integrating marketing and logistics technologies as a key factor in optimizing modern supply chains. The study aims to analyze the transition from traditional management methods to predictive "pull" models, to substantiate the advantages of implementing unified logistics information systems (LIS), and to identify the role of new technologies – such as EDI, PRM systems, bar coding, and satellite monitoring – in ensuring transparency and efficiency of inter-corporate interaction in real time.

The presented work investigates theoretical and applied aspects of innovative supply chain management in the context of digital transformation of network retail. The critical need for a transition from outdated "push" models to flexible "pull" strategies based on the integration of marketing data and logistics tools is substantiated. The article analyzes in detail the role of integrated ERP, SCM and PRM systems in overcoming information fragmentation and increasing the efficiency of inter-corporate interaction. Particular attention is paid to the implementation of international data exchange standards (UN/EDIFACT, SCOR model) and modern technologies of automatic identification (barcoding, RFID) and satellite monitoring.

It is proven that the systematic synchronization of actions of all participants in the chain and the use of predictive analytics allow transforming information into a strategic asset. The results of the study confirm that the implementation of the proposed innovations provides a radical improvement in the quality of customer service, optimization of logistics costs, and the formation of unique consumer value in real time.

The study proved that in the context of digitalization, the foundation of retail competitiveness is integrated supply chain management. The implementation of ERP, SCM and PRM systems ensures the transition from the "push" model to flexible "pull" strategies driven by real demand. The use of SCOR, UN/EDIFACT standards and automatic identification technologies (RFID, satellite monitoring) guarantees transparency of flows and minimization of costs. Technological transformation turns information into a strategic asset, which radically improves the quality of service and ensures the sustainable development of network participants in real time.

supply chain management, information resources, logistics integration, marketing data, innovation, digital transformation, customer orientation

Одержано (Received) 01.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.03.2026

УДК 656.072 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).322-331

А. А. Кочина, доц., канд. техн. наук, **І. С. Наглюк,** проф., д-р техн. наук,
Л. С. Абрамова, проф., д-р техн. наук, **С. А. Сахно**
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
e-mail: kochina.tsl@gmail.com

Оцінювання результатів розрахунку моделі транспортного попиту на пересування пасажирів

У статті розглянуто питання оцінювання результатів моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів у різних сполученнях. Побудовано модель транспортної мережі, сформовано матриці пасажирських кореспонденцій та здійснено розподіл поїздок за відстанню. Проведено порівняння розрахункових і фактичних пасажиропотоків, визначено середні та максимальні відхилення. Отримані результати підтверджують достовірність і практичну придатність розробленої методики.
матриця кореспонденцій, приміський транспорт, регіональна транспортна система, транспортний попит

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку транспортних систем характеризується зміним характером мобільності населення, ускладненням просторової структури поїздок та підвищенням вимог до якості транспортного обслуговування. У цих умовах моделі транспортного попиту на пересування пасажирів стають ключовим інструментом обґрунтування управлінських рішень у сфері планування маршрутної мережі, розвитку інфраструктури та оптимізації роботи громадського транспорту (ГТ). Водночас практичне застосування таких моделей неможливе без об’єктивного оцінювання результатів їх розрахунку, оскільки саме на цьому етапі визначається ступінь відповідності модельних показників реальним умовам функціонування транспортної системи та фактичній поведінці пасажирів. Проблематика оцінювання результатів моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ полягає в обмеженості та неоднорідності вихідних даних, наявності альтернативних видів транспорту, впливі соціально-демографічних і просторових факторів, а також у необхідності врахування стохастичного характеру пасажирських пересувань. Невизначеність цих чинників ускладнює інтерпретацію отриманих матриць пасажирських кореспонденцій і потребує застосування спеціальних підходів до перевірки точності та надійності результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі проблематика оцінювання результатів розрахунку моделей транспортного попиту на пересування пасажирів розкривається з кількох ключових позицій, що дозволяє бачити сучасний стан досліджень у цій сфері. Так, у фундаментальних оглядах [1-5] сучасних методів формування моделей попиту на перевезення пасажирів ГТ, а також дисертаційних дослідженнях за обраною тематикою [6-9], підкреслюється важливість створення та аналізу матриць пасажирських кореспонденцій як основи для подальшого оцінювання прогнозів розвитку транспортних систем, де сучасні підходи удосконалюють традиційні практики побудови моделей і спрямовані на підвищення точності та надійності оцінювання результатів моделювання.

У прикладних дослідженнях також порівнюються різні техніки прогнозування транспортного попиту, наприклад, порівняння чотирьохетапних моделей зі статистичними регресійними підходами для оцінки кількості поїздок у майбутньому,

© А. А. Кочина, І. С. Наглюк, Л. С. Абрамова, С. А. Сахно, 2026

що свідчить про різний вплив вибору методології на якість прогнозів та відповідність фактичним даним [10]. Сучасні українські практики також спрямовані на використання чотирьохетапних моделей транспортного моделювання, де здебільшого матриці пасажирських кореспонденцій формуються на основі результатів вибіркових натурних спостережень з подальшим використанням синтетичних моделей розрахунку пасажирських кореспонденцій. Моделювання роботи системи ГТ проводиться з використанням програмного продукту PTV VISUM, де передбачено можливість калібрування розрахункової моделі транспортного попиту. Таке калібрування, за сенсом, і є певним проявом первинного оцінювання точності результатів моделювання матриці, оскільки налаштування відбувається за рахунок використання фактичних даних про пасажиропотоки на ключових ділянках вулично-дорожньої мережі або ж обсяги перевезення пасажирів на маршрутах [11-17].

Інші роботи зосереджують увагу на поведінкових аспектах моделювання: у сфері вибору маршруту чи режиму пересування застосовуються дискретні логіт-моделі, моделі на основі теорії корисності, а також порівнюються класичні підходи з сучасними алгоритмами машинного навчання, що впливають на інтерпретацію і точність модельних результатів та вимагають відповідної оцінки їх поведінкової адекватності й прогнозного потенціалу [18]. В українському контексті наукові праці розглядають специфіку моделювання транспортного попиту на пересування в умовах міських і приміських транспортних систем, підкреслюючи потребу адаптації методів обстеження пасажиропотоків та обґрунтування статистичних і модельних показників, які надалі використовуються для оцінювання результатів моделювання [6, 7, 9].

Оцінювання результатів розрахунку моделей транспортного попиту розглядається і в дослідженнях, що аналізують роботу транспортної мережі в умовах змін, наприклад, у контексті зменшення кількості пасажирів або перевізників, де підкреслюється необхідність коригування матриць кореспонденцій для збереження адекватності моделювання реальних потоків у нових умовах [19].

Результати огляду літератури показують, що сучасні наукові підходи до моделювання транспортного попиту поєднують традиційні методи, поведінкові моделі та нові інструменти. Це свідчить про необхідність реалізації комплексних процедур оцінювання та валідації результатів розрахунків моделей транспортного попиту на пересування пасажирів для забезпечення їх практичної цінності.

Постановка завдання. Основною метою статті є оцінювання та аналіз результатів застосування запропонованої в [9] методики моделювання матриці пасажирських кореспонденцій на реальному прикладі.

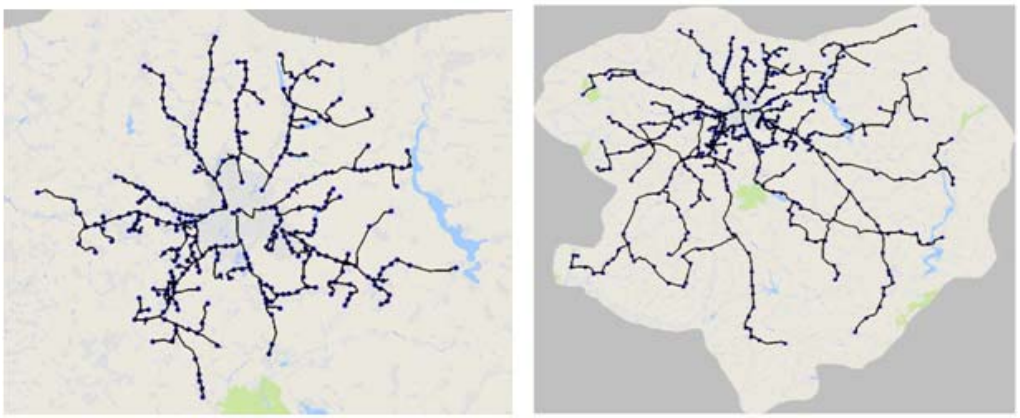
Для досягнення мети дослідження необхідно виконати наступні задачі:

- сформувати модель транспортної пропозиції системи ГТ приміської зони м. Харкова з використанням спеціалізованого програмного комплексу PTV VISUM;
- розрахувати модель транспортного попиту на пересування пасажирів у приміському сполученні;
- здійснити процедуру перерозподілу пасажиропотоків з використанням розробленої транспортної моделі та перевірити точність результатів моделювання матриці пасажирських кореспонденцій.

Виклад основного матеріалу.

Формування моделі транспортної пропозиції. Практична реалізація запропонованої в [9] методики проводилась на прикладі транспортної мережі громадського транспорту м. Харків та області. Вхідною інформацією стали дані про характеристики існуючих маршрутів у приміському та внутрішньобласному сполученні, розклад руху, схеми маршрутів [20].

Моделювання проводилось у програмному пакеті VISUM німецької компанії PTV AG. З використанням програми було побудовано модель транспортної мережі окремо в приміському та внутрішньобласному сполученнях (рисунок 1). На завантажений «фон», який представляє карту Харківської області, було нанесено точкові об'єкти, що визначають просторове положення перехресть – «вузли», які також є початковими або кінцевими точками відрізків. Наступним кроком моделювання було нанесення «відрізків» – спрямованих ребер, які характеризують прямий і зворотний напрямок і є самостійними об'єктами мережі. Відрізки з'єднують вузли і таким чином описують структуру дорожньої мережі системи громадського транспорту на території, що оточує місто. Структура дорожньої мережі громадського транспорту визначена на основі розташуванням кінцевих зупиночних пунктів, які представляють автостанції міста, розташовані практично в центральний частині міста та кінцеві пересадочні вузли тільки в приміському сполученні, розташовані поблизу станцій метро та на околиці міста, де відсутній метрополітен.

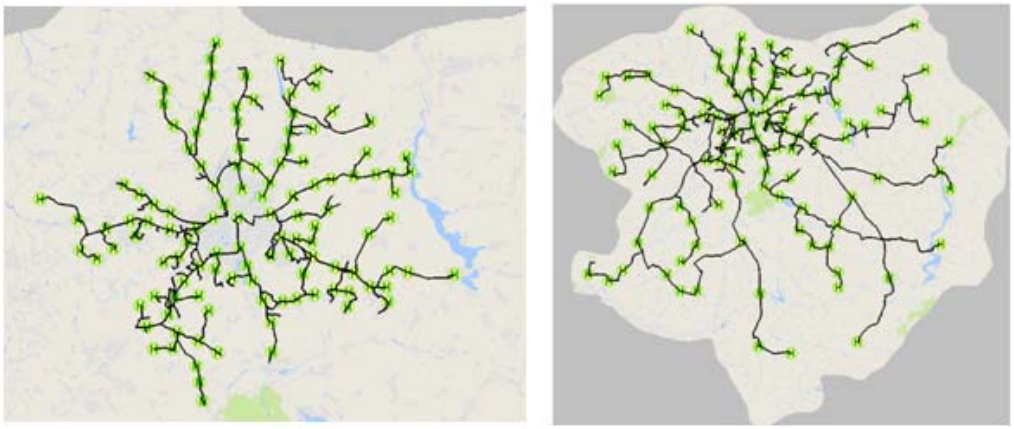


а *б*

Рисунок 1 – Структура дорожньої мережі громадського транспорту
(а – приміське сполучення, б – внутрішньообласне сполучення)

Джерело: розроблено авторами самостійно

Наступним кроком було моделювання системи зупиночних пунктів, рисунок 2.



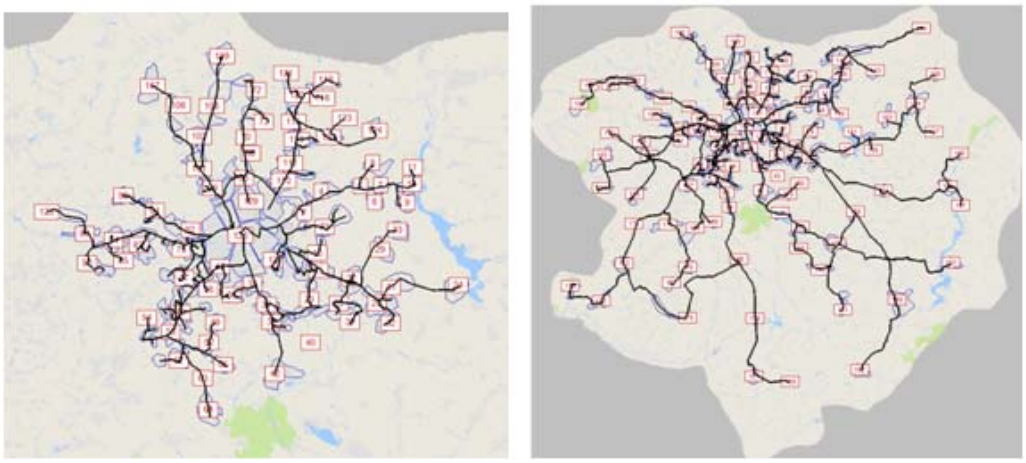
а *б*

Рисунок 2 – Мережа зупинок громадського транспорту
(а – приміське сполучення, б – внутрішньообласне сполучення)

Джерело: розроблено авторами самостійно

За транспортні райони запропоновано розглядати населені пункти, розташовані у приміській зоні та на території області, які охоплені існуючими приміськими та внутрішньобласними маршрутами. Центр транспортного району визначено в конкретних

населених пунктах згідно основних напрямків пасажиропотоку приблизно з однаковою площею обслуговування. З мережею вони з'єднуються через «примикання». Примикання з'єднують транспортні райони з транспортною мережею. Для кожної окремої транспортної системи вони відповідають кінцевому та початковому пішохідним підходам між центром транспортного району і вузлом транспортної мережі, рисунок 3.



а *б*

Рисунок 3 – Структура змодельованої транспортної системи
(а – приміське сполучення, б – внутрішньообласне сполучення)
Джерело: розроблено авторами самостійно

Слід зазначити, що у випадку, коли населений пункт розташований на деякій відстані від транспортної мережі громадського транспорту, центр транспортного району визначався в місці розташування відповідного зупиночного пункту. Це обумовлюється тим, що в реальній ситуації існування приміського сполучення саме так здійснюється функціонування системи громадського транспорту. Тобто мешканці таких населених пунктів здійснюють піші переміщення до зупиночних пунктів, які описуються «примиканнями». Також при моделюванні транспортних районів, у деяких випадках, було здійснено об'єднання невеликих населених пунктів, які розташовані на відстані один від одного до 1 км. Загальна характеристика змодельованої транспортної мережі представлена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристика моделі транспортної мережі громадського транспорту Харківської області

Характеристика транспортної мережі		Вид сполучення	
		Приміське	Обласне
Кількість зупиночних пунктів, од.		540	689
Кількість транспортних районів, од.		135	199
Кількість населених пунктів, які охоплені мережею ГТ, од.		125	218
Кількість населених пунктів, які мають залізничне сполучення од.		28	8
Кількість мешканців населених пунктів, осіб	мінімальна	16	119
	максимальна	32454	56655
Загальна чисельність населення, тис. осіб		422,591	878,485
Площа населеного пункту, км^2	мінімальна	0,06	0,618
	максимальна	56,026	48,62
Щільність населення, осіб/км^2	мінімальна	5,3	4,85
	максимальна	369	214

Розрахунок матриці пасажирських кореспонденцій. Згідно з методикою, представленою в [9], матриця пасажирських кореспонденцій формується на основі поєднання обмежених фактичних даних про пасажирські перевезення та модельного підходу до оцінки потреб у пересуваннях. Вхідною інформацією є місткості транспортних районів з відправлення та прибуття пасажирів, які визначалися за результатами звітно-статистичного обстеження. Проте з огляду на неможливість проведення суцільних обстежень на всій мережі приміського сполучення було застосовано розрахункову методику, що базується на визначенні потенційної кількості мешканців населених пунктів, які здійснюють пересування в напрямку міста.

Місткість транспортних районів з відправлення визначається як функція чисельності населення населеного пункту, його віддаленості від міста та ступеня впливу міського центру на інтенсивність пересувань автомобільним громадським транспортом з урахуванням наявності альтернативних видів сполучення, насамперед залізничного. Такий підхід дозволяє перейти від фіксації фактичних перевезень до оцінки попиту на поїздки, що є принципово важливим для прогнозування пасажиропотоків. Достовірність отриманих розрахункових значень перевіряється шляхом їх порівняння з результатами вибіркових табличних обстежень на основних напрямках руху та зі звітними даними квитково-касових відомостей з урахуванням пільгового контингенту і можливих перевезень без квитків. Встановлені відхилення знаходяться в допустимих межах, що підтверджує доцільність застосування запропонованої методики [9].

На наступному етапі сформовано матрицю найкоротших відстаней між транспортними районами, яка є просторовою основою для розподілу поїздок. Відповідно до експериментально встановлених закономірностей дальності пересувань та параметрів показникового розподілу було визначено ймовірності потрапляння поїздок у задані інтервали відстаней і кількість поїздок у кожному з них [9]. Ці величини використано як вихідні дані для побудови системи обмежень, що забезпечує узгодження сум відправлень транспортних районів із розподілом кореспонденцій за відстанями. Реалізація алгоритму розрахунку в середовищі MS Excel дозволила отримати матриці пасажирських кореспонденцій, які відображають просторову структуру попиту на перевезення та відповідають заданим демографічним і транспортним умовам.

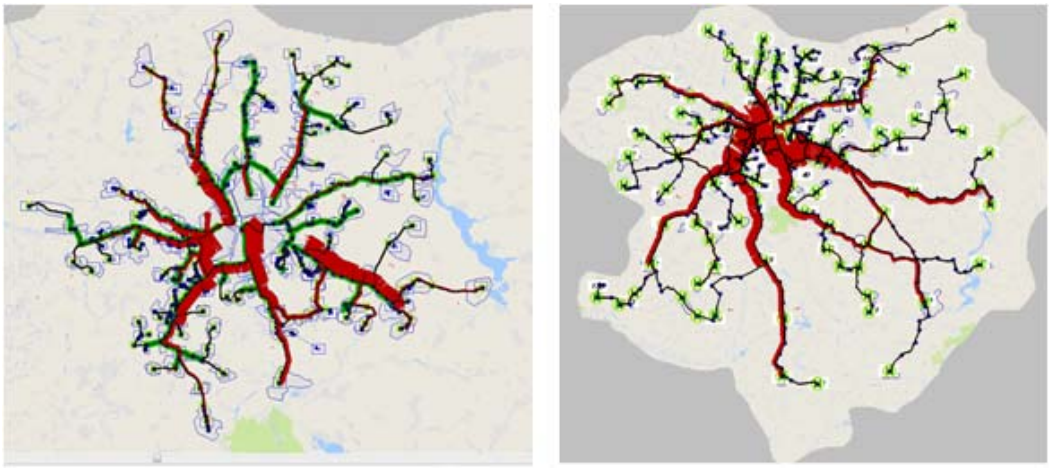
Оцінювання та аналіз результатів розрахунку моделі транспортного попиту на пересування пасажирів. Для оцінки відповідності сформованої матриці пасажирських кореспонденцій фактичному розподілу відстаней пересування на території приміської зони м. Харкова були розраховані відхилення в межах заданих інтервалів групування. Згідно з розрахунками максимальне відхилення у значеннях кореспонденцій $\sum_{\substack{i,j \\ i\neq j}} h_{ij}^{(\Delta_l)}$ в межах інтервалів групування відстаней складає 19,62 %, середнє – 6,3 % (табл. 2). Треба зазначити, що найбільше відхилення спостерігається на відстані понад 120 км і більше. Це може пояснюватись тим, що вплив міста суттєво знижується по мірі віддаленості населених пунктів від міста і обмежує дію приміського сполучення. У приміському сполученні точність розрахунку матриці пасажирських кореспонденцій значно більша, середній відсоток відхилення не перевищує 1,4 %, при цьому також спостерігається зниження точності розрахунків в мірі віддаленості від міста.

Результат оцінки розрахунку моделі транспортного попиту дає змогу стверджувати про можливість використання розрахованих матриць на практиці та вважати відтворення ними просторового розподілу переміщень навколо міста, тобто відповідність виявленим закономірностям розподілу відстаней пересувань на території, що оточує м. Харків.

Для додаткової оцінки результатів моделювання потреб у послугах громадського транспорту за допомогою процедури перерозподілу в середовищі PTV VISUM було отримано розрахункові пасажиропотоки, які наочно представлено на рисунок 4.

Таблиця 2 – Оцінка розрахунку матриці кореспонденцій на території Харківської області

Інтервал групування	Нижня межа, км	Верхня межа, км	Кількість пересувань, од			
			Фактична	Розрахункова	Відхилення	%
Приміська зона						
1	0	20	42 230	41650	-579	1,37
2	20	40	14 089	14379	289	2,06
3	40	60	8 279	8569	290	3,5
Внутрішньообласне сполучення						
1	0	20	41 393	40409	984	2,38
2	20	40	26 707	26854	-147	0,55
3	40	60	20 444	20327	117	0,57
4	60	80	13 318	12525	793	5,95
5	80	100	10 438	10051	387	3,71
6	100	120	7 919	8499	-580	7,33
7	120	140	3 743	3348	395	10,56
8	140	160	9 934	11883	-1949	19,62



а *б*

Рисунок 4 – Мережа маршрутів ГТ з відображенням епюр пасажиропотоків
(а – приміське сполучення, б – внутрішньообласне сполучення)

Джерело: розроблено авторами самостійно

Для оцінки розрахункових пасажиропотоків необхідно здійснити їх зіставлення з фактичними даними. Проведення суцільних обстежень на території області потребує значних витрат і в рамках даної роботи практично нездійсненно на такій великій території. Оцінити ступінь відповідності фактичних значень можливо при зіставленні розрахункових пасажиропотоків, які характеризують кількість мешканців населених пунктів, що виїжджають у напрямку міста. Отримати дану величину можливо як різницю між кількістю пасажирів у кожному населеному пункті, який представлений у моделі відповідним транспортними районами. У свою чергу пасажиропотоки розраховуються між транспортними вузлами, і величина різниці пасажиропотоку між

вхідними та вихідними відрізками в моделі відповідного транспортного району буде визначати кількість пасажирів, які виїжджають з нього. Оцінку моделювання пасажиропотоків доцільно проводити на території Харківської області враховуючи, що відхилення розрахунків у приміському сполученні незначні.

Результати аналітичного моделювання роботи транспортної мережі громадського транспорту Харківської області на основі закономірностей розподілу відстаней поїздок [9] показали, що відхилення між розрахунковими та фактичними пасажиропотоками практично відсутнє, що спостерігається на більшості ділянках. Середнє значення відхилення складає 5,4 %, максимальна похибка розрахунку пасажиропотоків склала 18,11 % на відстані від 20 км до 40 км, про що свідчать дані таблиці 3.

Таблиця 3 – Оцінка ступеню відповідності пасажиропотоків

Інтервал групування відстані	Номер транспортного району у моделі VISUM	Віддаленість від міста, км	Кількість виїжджаючих мешканців з транспортного району, пас.		Відносна похибка розрахунку, %
			згідно моделі VISUM	розрахунковий	
1	4	14.1	6	5	16,67
2	25	24,2	911	1076	18,11
3	62	51,1	26	25	3,85
4	140	71,9	441	426	3,4
5	184	95,3	454	452	0,44
6	165	103	2741	2738	0,11
7	173	137	336	334	0,6
8	187	143	760	759	0,04

Точність розрахунків пасажиропотоків збільшуються по мірі віддаленості населених пунктів від міста, що говорить про доцільність застосування запропонованої методики на території області. Відхилення значень розрахункових пасажиропотоків по мірі наближення до міста може бути пояснено збільшенням щільності транспортних зв’язків і перерозподілом пасажиропотоків на окремих ділянках транспортної мережі громадського транспорту.

Висновки. 1. Застосування розробленої методики моделювання потреб у послугах громадського транспорту на прикладі Харківської області дало можливість сформувати матриці кореспонденцій пасажирів, які можна використовувати на практиці, що підтверджується їх відповідністю фактичним закономірностям розподілу відстані поїздок з максимальним відхиленням 19,62 % та середнім відхиленням 6,3 %. Збільшення відхилення спостерігається на відстані понад 120 км і більше. Це може пояснюватися зниженням впливу міста по мірі віддаленості населених пунктів.

2. У результаті моделювання транспортної мережі громадського транспорту Харківської області ступінь відповідності розрахунків вхідних пасажиропотоків склала 5,4 %, максимальна похибка розрахунку пасажиропотоків спостерігається на відстані від 20 км до 40 км. Зростання похибки у розрахункових пасажиропотоків у міру наближення до міста можуть бути пояснені збільшенням щільності транспортних зв'язків.

3. Отримані матриці пасажирських кореспонденцій можуть бути використані для оцінювання рівня транспортного обслуговування пасажирів, що пересуваються у приміському сполученні.

Список літератури

1. Qasim, R.A., Asmael, N.M. Review different methods for estimating the origin-destination matrix. *Kufa Journal of Engineering*, 2025, 16(4), 540-557. https://doi.org/10.30572/2018/KJE/160431
2. Цинь, С., Любий, Є. Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 2025, 11(42), Частина 2, 394-409. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409
3. Білоус А.Б., Демчук І.А. Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(3(69) (2014). С. 53–57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545.
4. Willumsen, L. (1978) *Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts – A Review*. Leeds: University of Leeds, Inst. Transp. Stud., WP 99. Retrieved from https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/2415/2/Wp99_protected.pdf
5. Bera, Sh., Rao, K. V. K. Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art. *European Transport / Trasporti Europei*. 2011, issue 49, pages 2-23. Retrieved from https://www.openstarts.units.it/server/api/core/bitstreams/f0019ad1-6022-4c1e-a06c-29d5bbdceed9/content.
6. Гончаренко С.Ю. Визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в середніх містах : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2015. 182 с.
7. Пашкевич С.М. Дослідження впливу розташування міжміської автостанції на розподіл міських пасажиропотоків: дис. … доктора філософії: 275. Харків, 2024. 222 с.
8. Акбар Джан Полад Закономірності функціонування системи міського пасажирського транспорту міста Кабул : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2017. 189 с.
9. Кочина А.А. Формування пасажиропотоків у приміському сполученні на автомобільному транспорті : дис. канд. техн. наук : 05.22.01. Харків: ХНАДУ, 2020. 227 с.
10. Sumitsawan, P., Sangsrichan, C., Amorndechaphon, D., Lueatnakrop, P., Pochan, J., Sungtrisearn, P., Punchum, N. Performance evaluation of travel demand forecasting models for transportation network analysis. *Engineering and Applied Science Research*, 2025, 52(6), 609–617. Retrieved from https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/261110.
11. Аналіз діючої транспортної мережі м. Конотоп. Проведення обстеження пасажиропотоків. Обробка матеріалів обстеження пасажиропотоків по маршрутах. Розробка заходів щодо оптимізації транспортної мережі м. Конотоп: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0121U112782. Харків, 2021. 124 с.
12. Проведення аналізу та оптимізації транспортних систем міста Краматорськ: звіт про НДР (кінцевий). ХНАДУ, № державної реєстрації 0116U006995. Харків, 2016. 220 с.
13. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.
14. Розробка схеми руху громадського транспорту в місті Суми: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0108U006961. Харків, 2008. 51 с.
15. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі міста Кіровоград: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0112U00692. Харків, 2012. 115 с.
16. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі м. Олександрія : звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0113U005179. Харків, 2013. 130 с.
17. Моделювання та аналіз маршрутної мережі громадського транспорту міста Нікополя: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0115U004775. Харків, 2015. 197 с.
18. Martín-Baos, J.Á., López-Gómez, J.A., Rodriguez-Benitez, L., Hillel, T., García-Ródenas, R. A prediction and behavioural analysis of machine learning methods for modelling travel mode choice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 156, 104318. https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104318.
19. Славич, В.П. Transport system management model in the conditions of a reduction in the number of passengers or carriers. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025, том 1, 2(93), с. 248-251. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.32.
20. Автобус. Приміські та міжміські маршрути. *Офіційний портал «Харків транспортний»*. URL: https://gortransport.kharkov.ua/bus/suburban/ (дата звернення 02.02.2026).

References

1. Qasim, R.A. & Asmael, N.M. (2025) Review different methods for estimating the origin-destination matrix. *Kufa Journal of Engineering*. 16(4), 540-557. https://doi.org/10.30572/2018/KJE/160431.

2. Qin, X. & Liubyi, Ye. (2025) Analysis of Existing Methods of Forming Models of Passenger Travel Needs. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Science*. 11(42), P. 2, 394-409. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409 [in Ukrainian].
3. Bilous, A.B. & Demchuk, I.A. (2014) Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(3(69), 53–57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545 [in Ukrainian].
4. Willumsen, L. (1978) *Estimation of an O-D Matrix from Traffic Counts – A Review*. Leeds: University of Leeds, Inst. Transp. Stud., WP 99. Retrieved from https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/2415/2/Wp99_protected.pdf
5. Bera, Sh. & Rao, K. V. K. (2011) Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art. *European Transport / Trasporti Europei*. 49, 2-23. Retrieved from https://www.openstarts.units.it/server/api/core/bitstreams/f0019ad1-6022-4c1e-a06c-29d5bbdceed9/content.
6. Honcharenko, S.Yu. (2015). *The demand determining for passenger route transport service in the middle cities*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
7. Pashkevich, S.M. (2024) *Research on the impact of the location of intercity bus stations on the distribution of urban passenger flows*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
8. Akbar, D.P. (2017) *Patterns of functioning of the urban passenger transport system in Kabul*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
9. Kochina, A.A. (2020) *Formation of passenger flows in suburban motor transport*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
10. Sumitsawan, P., Sangsrichan, C., Amorndechaphon, D., Lueatnakrop, P., Pochan, J., Sungtrisearn, P. & Punchum, N. (2025) Performance evaluation of travel demand forecasting models for transportation network analysis. Engineering and Applied Science Research. 52(6), 609–617. Retrieved from https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/261110
11. R&D report 0121U112782. (2021). *Analysis of the existing transport network of Konotop. Conducting a passenger flow survey. Processing of passenger flow survey materials by routes. Development of measures to optimize the transport network of Konotop city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
12. R&D report 0116U006995 (2016). *Analysis and optimization of transport systems of Kramatorsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
13. R&D report 0117U006848. (2018). *Development of a comprehensive traffic scheme for the Lutsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
14. R&D report 0108U006961. (2008). Development of a public transport route plan for the Sumy city. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
15. R&D report 0112U00692. (2012). *Development of a rational variant of the route network in Kirovograd city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
16. R&D report 0113U005179. (2013). *Development of a rational variant of the route network in Oleksandriia city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
17. R&D report 0115U004775. (2015). *Modeling and analysis of the public transport route network in Nikopol city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
18. Martín-Baos, J.Á., López-Gómez, J.A., Rodriguez-Benitez, L., Hillel, T. & García-Ródenas, R. (2023) A prediction and behavioural analysis of machine learning methods for modelling travel mode choice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 156, 104318. https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104318.
19. Slavych, V.P. (2025) Transport system management model in the conditions of a reduction in the number of passengers or carriers. *Bulletin of Kherson National Technical University*. T. 1, 2(93), 248-251. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.32. [in Ukrainian].
20. Bus. Suburban and intercity routes. *Official portal «Kharkiv Transport»*. URL: https://gortransport.kharkov.ua/bus/suburban/ (date of access 02.02.2026).

Anastasia Kochina, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Ivan Nahliuk,** Prof., DSc., **Liudmyla Abramova,** Prof., DSc., **Serhii Sakhno**
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Evaluation of the Results of Passenger Trip Demand Model Calculation

The paper addresses the problem of evaluating the results of passenger travel demand modelling in suburban and interregional public transport systems. Reliable origin–destination (O–D) matrices are a fundamental element of transport planning; however, their practical application requires systematic validation under conditions of incomplete and heterogeneous empirical data. The study aims to assess the accuracy and practical applicability of a methodology for modelling passenger correspondence matrices using a real-world case study of the suburban and intra-regional transport network surrounding Kharkiv. The research methodology

combines limited statistical observations with a model-based estimation of travel demand. A transport supply model was developed in the PTV VISUM environment, including the representation of nodes, links, stop locations, transport zones, and access connections. Transport zones were defined at the level of settlements, taking into account spatial distribution, population size, distance from the city centre, and the availability of alternative modes, particularly railway services. The capacity of origin zones was estimated as a function of demographic characteristics and the influence intensity of the urban core. The O–D matrix was generated using a distance-based exponential distribution model reflecting empirically observed trip length patterns. A system of constraints ensured consistency between total departures from each transport zone and the probabilistic distribution of trips across distance intervals. Model validation was performed in two stages: comparison of calculated and observed trip distributions by distance groups, and comparison of simulated and reported passenger flows derived from assignment procedures within the network model. The results demonstrate that the average deviation between calculated and observed trip distributions equals 6.3%, with a maximum deviation of 19.62% for long-distance intervals exceeding 120 km. For passenger flows, the mean relative error is 5.4%, while the maximum deviation (18.11%) occurs in the 20–40 km distance range. The accuracy improves with increasing distance from the city, whereas larger discrepancies near the urban core are attributed to higher network density and flow redistribution effects. The findings confirm the adequacy of the proposed methodology for practical applications in regional transport planning, service level assessment, and route network optimisation.

origin–destination matrix, suburban transport, regional transport system, trip demand

Одержано (Received) 05.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 16.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 656.13 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).331-338

Р. І. Петрусенко, **Н. О. Семченко,** доц., канд. техн. наук
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
e-mail: nat-semchenko@ukr.net

Підвищення безпеки руху на нерегульованих пішохідних переходах

Стаття присвячена дослідженню взаємодії конфліктуючих транспортних і пішохідних потоків в зоні нерегульованих пішохідних переходів і розробці рекомендацій щодо підвищення їх безпеки. В якості об’єкту дослідження в роботі розглядається взаємодія потоків транспорту і пішоходів на нерегульованих пішохідних переходах. Дорожньо-транспортні пригоди на нерегульованих пішохідних переходах є предметом дослідження.

Проведений аналіз організації руху на нерегульованих пішохідних переходах. Виконана оцінка можливості запобігання наїзду на пішохода на нерегульованому переході при оглядовості, обмеженій нормативним трикутником видимості. Проведені експериментальні дослідження швидкості руху пішоходів на нерегульованому переході. Виконана оцінка можливості запобігання наїзду на пішохода на нерегульованому переході при обмеженій оглядовості. Запропоновані додаткові заходи для зниження аварійності на нерегульованих пішохідних переходах, які стосуються: внесення змін в Правила дорожнього руху щодо обмеження швидкості, зупинок і стоянок в зоні пішохідних переходів; зміни геометрії проїжджої частини в зоні пішохідних переходів, що поліпшить оглядовість і зменшить час руху пішоходів через перехід.

Результати дослідження можна використати в практичній діяльності як інструмент удосконалення організації дорожнього руху і підвищення безпеки пішоходів.

безпека дорожнього руху, нерегульований пішохідний перехід, обмежена оглядовість, запобігання наїзду на пішохода

© Р. І. Петрусенко, Н. О. Семченко, 2026

Постановка проблеми. Незважаючи на ухвалені Організацією Об'єднаних Націй у 2010 і 2020 роках резолюцій, які проголосили Перше і Друге Десятиліття із забезпечення безпеки дорожнього руху з метою запобігання смертей та травм унаслідок ДТП (щонайменше 50% до 2030 року) - суттєвого скорочення смертності на дорогах поки не відбулося.

Проаналізувавши аварійність в Україні за участю автомобільного транспорту, можна зробити висновок, шо суттєва кількість дорожньо-транспортних пригод трапляється саме в міських умовах. Серед них - наїзди на пішоходів, які становлять до 40% усіх ДТП із постраждалими і характеризуються високою тяжкістю наслідків. Понад 20% таких випадків відбувається безпосередньо на пішохідних переходах.

Важливим напрямом підвищення рівня безпеки дорожнього руху в містах є зниження ймовірності конфліктів пішоходів і транспорту в зонах пішохідних переходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням безпеки руху на нерегульованих пішохідних переходах займалися вітчизняні науковці, такі як Є. Рейцен, Г. Фоменко, І. Гевко, Є. Решетніков, В. Гук та ін. [1–7].

Закордонні дослідники в свою чергу порівнювали з точки зору аналізу ризиків конфліктів та швидкості руху різні інноваційні заходи для покращення безпеки пішоходів на дорогах, такі як нанесення різної дорожньої розмітки на основі інноваційних пішохідних переходів [8]; відмічали доцільність встановлення та потенціал «розумних» пішохідних переходів як засобу підвищення безпеки дорожнього руху в рамках розвитку «розумного» міста [9]; оцінювали вплив освітлення пішохідних переходів на помітність пішоходів і пропонували застосовувати такі системи освітлення, що формують позитивний контраст із фігурою людини (зокрема, освітлення ділянки перед переходом) [10].

В дослідженнях Федерального управління автомобільних доріг [11] зазначено, що є три ключові способи підвищення видимості пішохідних переходів, які дозволяють зробити самі переходи, а також пішоходів, велосипедистів, користувачів інвалідних візків та громадського транспорту більш помітними для водіїв. До таких заходів належать переходи з підвищеною видимістю, належне освітлення, а також дорожні знаки й розмітка. Окрім цього, вони допомагають учасникам руху краще орієнтуватися щодо безпечного місця для перетину дороги. Відповідні служби можуть застосовувати ці рішення як окремо, так і в поєднанні, щоб чітко позначити рекомендовані місця переходу.

Шарма С.Н. и Дехалвар К. в своїй роботі представили систематичний огляд 92 дослідницьких робіт та політичних документів з безпеки пішоходів. В цьому огляді зазначено, що найчастіше для забезпечення безпеки пішоходів використовуються такі заходи, як встановлення пішохідних світлофорів, забезпечення контролю швидкості та зміни в міському дизайні [12].

В цілому, організація руху на нерегульованому перехресті має гарантувати безпечне та плавне пересування транспорту без необхідності застосування екстрених маневрів або різкої зміни режимів руху, а також виключати наявність «мертвих зон» [6].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є обґрунтування заходів забезпечення належної оглядовості в зоні розташування нерегульованих пішохідних переходів, що суттєво підвищить безпеку руху на них.

Виклад основного матеріалу. Основні вимоги до облаштування нерегульованих пішохідних переходів визначені в ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів [13] і ПДР України [14]. Виконання цих вимог повинно забезпечити безпеку руху на цих переходах.

ДБН вимагають, з метою забезпечення достатньої оглядовості в зоні нерегульованих пішохідних переходів, забезпечувати трикутник видимості (АВС на рис. 1) 50х10 м (п.6.4.4) [13].

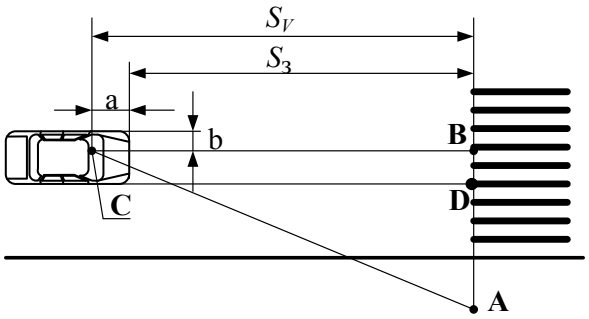


Рисунок 1 – Розрахункова схема

Джерело: розроблено авторами

На відстані 50 м будь який автомобіль, що рухається зі швидкістю 50 км/год. має змогу зупинитися до пішохідного переходу навіть при службовому гальмуванні (рисунок 2, а).

Втім, необхідна бічна видимість для водія для запобігання ДТП залежить від швидкості руху пішохода (при припущенні, що пішохід порушує ПДР і не зупиняючись, продовжує рух по дорозі). Якщо, наприклад, бічна видимість буде становити 10 м, коли легковий автомобіль, що рухається зі швидкістю 50 км/год. буде на відстані зупинного шляху екстреного гальмування, водій не зможе запобігти ДТП, якщо швидкість руху пішохода буде перевищувати 8,7 км/год., а водій вантажного - при швидкості руху пішохода більше 7 км/год. (рисунок 2, б).

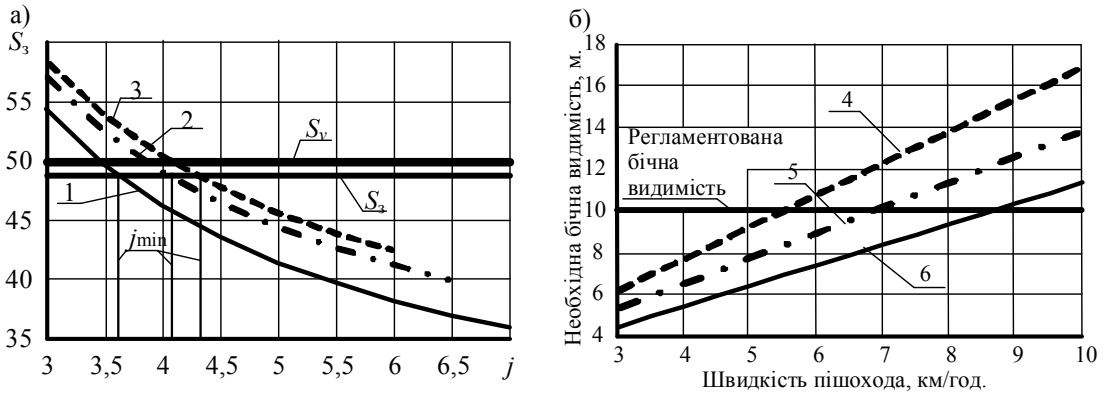


Рисунок 2 – Залежність зупинного шляху від сповільнення при швидкості автомобіля 50 км/год. (а) та необхідна бічна видимість пішохода для запобігання наїзду: 1 – легкові автомобілі; 2 – вантажні автомобілі і автобуси з гідроприводом гальм; 3 – вантажні автомобілі і автобуси з пневмоприводом гальм; 4 – службове гальмування легкових автомобілів; 5 – екстрене гальмування вантажних автомобілів і автобусів; 6 – екстрене гальмування легкових автомобілів

Джерело: розроблено авторами

Але, якщо водій автомобіля, згідно вимогам ПДР України, на підході до переходу зменшить швидкість, ДТП можна буде запобігти.

Для встановлення реальних значень швидкості руху на пішохідних нерегульованих переходах були проведені експериментальні дослідження. Як свідчать їх результати, пішоходи переходять нерегульований пішохідний перехід зі швидкістю від 1 до 10 км/год., але переважна їх частина - 65,5 % рухаються зі швидкістю 4-6 км/год. Наїзди можливі лише у випадках, коли пішоходи біжать і швидкість їх руху перевищує 7 км/год. Кількість випадків руху з такою швидкістю незначна, але може збільшуватись у місцях скупчення дітей і молоді. В цих місцях необхідне обов'язкове впровадження заходів по примусовому зменшенню швидкості руху.

Таким чином, Існуючі в Україні норми щодо трикутнику видимості в зоні нерегульованих пішохідних переходів науково і технічно обґрунтовані і сприяють забезпеченню безпеки руху.

Як правило, нерегульовані пішохідні переходи організують на вулицях і дорогах районного значення та місцевих. На цих дорогах, при достатній ширині дороги, в більшості випадків дозволена зупинка і стоянка транспортних засобів біля тротуарів. Ці автомобілі обмежують оглядовість водіям, що рухаються по сусіднім смугам. Правилами ПДР України (п.15.9) забороняється паркування автомобілів ближче, ніж 10 м від пішохідного переходу, а водій, згідно п. 18.1, наближаючись до нерегульованого переходу, при наявності на ньому пішоходів, повинен дати їм дорогу.

Визначимо, на якій відстані від пішохідного переходу можливе паркування для забезпечення вищезазначених вимог (рис.3).

Виходячи з подібності трикутників *ABC* і *FKC* авторами була визначена необхідна відстань видимості, при якій водій, побачивши пішохода, що почав рух по переходу (точка А рис.3), може зупинитися до переходу, застосував при цьому екстрене гальмування.

Забезпечення необхідної видимості залежить від швидкості руху автомобіля, що наближається до переходу і відстані від переходу до припаркованого автомобіля. Наприклад, якщо швидкість автомобіля становить 50 км/год., мінімальна відстань від переходу до місця паркування повинна становити 22 м. При швидкості автомобіля 30 км/год. ця відстань повинна дорівнювати 12 м (рис. 4, а). Необхідна відстань від пішохідного переходу до місця паркування автомобілів представлена на рисунку 4, б.

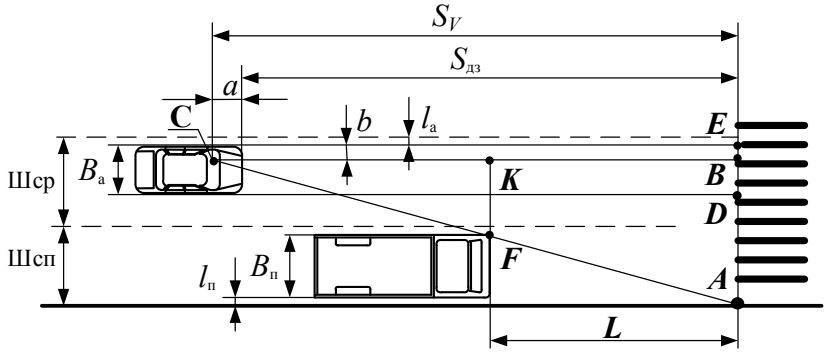


Рисунок 3 – Схема для розрахунку відстані видимості: $S_V = BC$ – відстань видимості пішохода, який розпочав рух на переході; $S_{дз}$ – відстань для зупинки автомобіля; a – відстань від передньої частини автомобіля до очей водія; b - відстань від лівої поверхні автомобіля до очей водія; $l_а$- відстань від лівої розмітки смуги для руху до лівої поверхні автомобіля; $B_а$ – ширина автомобіля, що рухається; $Ш_{ср}$ – ширина смуги для руху; $Ш_{сп}$ – ширина смуги для паркування; $l_п$ – відстань від припаркованого автомобіля до бордюрного каменю; $B_п$ – ширина припаркованого автомобіля; L – відстань від припаркованого автомобіля до пішохідного переходу.

Джерело: розроблено авторами

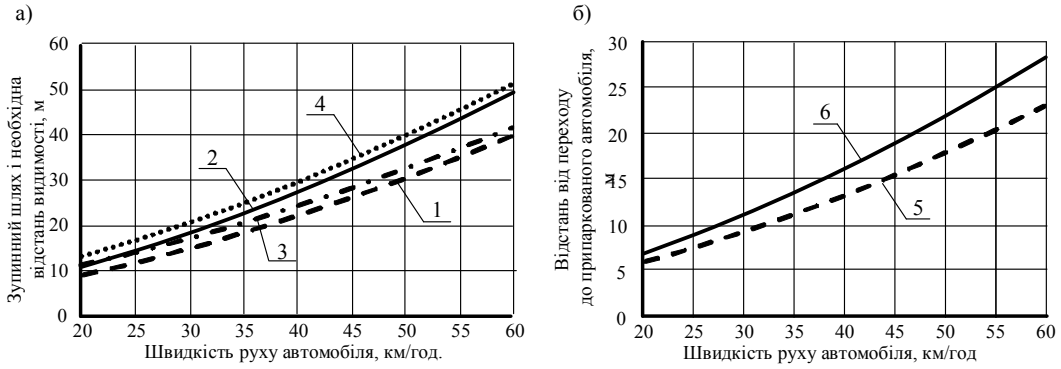


Рисунок 4 – Зупинний шлях автомобіля і необхідна видимість в залежності від швидкості автомобіля (а) та відстань від переходу до припаркованого автомобіля для забезпечення необхідної видимості водію (б): 1 – зупинний шлях легкового автомобіля; 2 – зупинний шлях вантажного автомобіля; 3 – необхідна відстань видимості для водія легкового автомобіля; 4 – необхідна відстань видимості для водія вантажного автомобіля; 5 – легковий автомобіль; 6 – вантажний автомобіль

Джерело: розроблено авторами

На підході до нерегульованого переходу обмежують оглядовість не тільки припарковані автомобілі, але й ті, що рухаються по сусідніх смугах.

Нами була змодельована наступна ситуація (рис. 5). По правій смузі рухається автомобіль 1, пропускаючи пішохода на переході. Цей автомобіль досягне межі переходу, коли пішохід звільнить його смугу руху (точка В) і продовжить рух. З моменту перетину точки В пішохід знаходиться на смузі руху автомобіля 2, який рухається, згідно вимогам ПДР з такою ж швидкістю, що і перший, на відстані S_{a2} і зобов'язаний пропустити пішохода.

Значення необхідної відстані між автомобілями в залежності від швидкості руху пішохода при різних значеннях швидкості автомобілів і ширині смуг руху 3 м надана на рисунку 6.

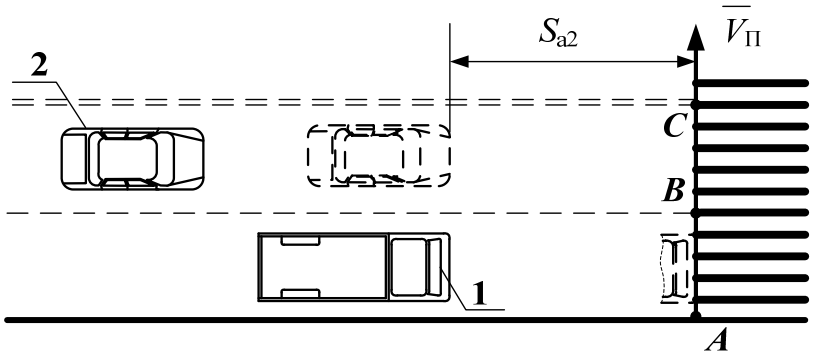


Рисунок 5 – Схема процесу наближення автомобілів до переходу на двосмуговій дорозі
Джерело: розроблено авторами

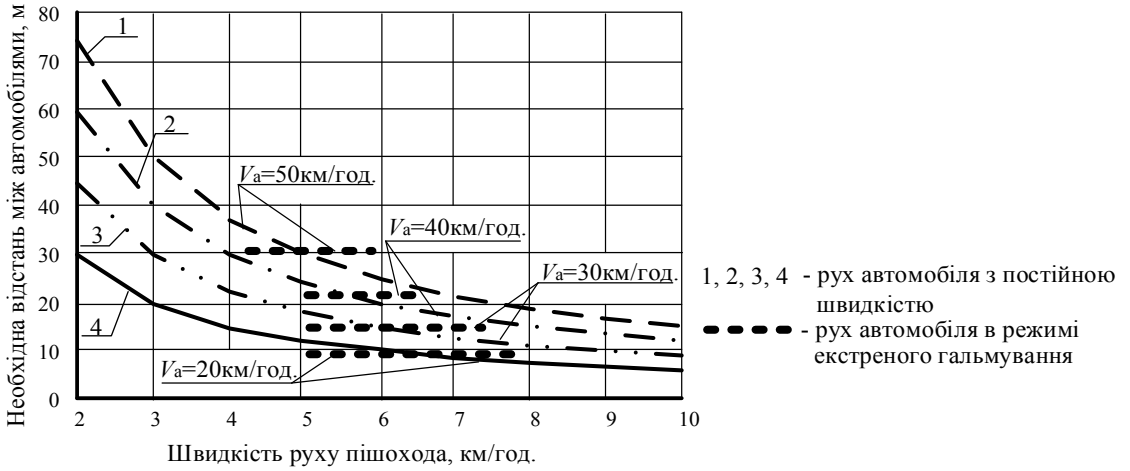


Рисунок 6 – Відстань від автомобіля до переходу, що необхідна пішоходу для виходу зі смуги руху автомобіля при різній його швидкості

Джерело: розроблено авторами

Якщо в момент появи пішохода на смузі руху автомобіля 2, той буде знаходитись на відстані зупинного шляху від переходу, пішохід, в залежності від швидкості свого руху, або встигне вийти зі смуги навіть у випадку руху автомобіля з постійною швидкістю, або якщо водій використає службове гальмування, або зможе закінчити перехід після зупинки автомобіля.

Розглянемо приклад, коли швидкість автомобіля становить 50 км/год. і він, в момент появи пішохода на його смузі, знаходиться на відстані зупинного шляху від переходу (рисунок 7).

Якщо швидкість руху пішохода більша, ніж 5 км/год., він встигне перейти проїжджу частину навіть, якщо водій не буде зменшувати швидкість. При швидкості

пішохода від 3,4 км/год. до 5 км/год. водію для запобігання наїзду необхідно застосовувати службове гальмування різної інтенсивності. Якщо швидкість пішохода менша за 3,4 км/год. він зможе завершити перехід тільки за умови зупинки автомобіля до лінії його .

Таким чином, якщо оглядовість обмежена автомобілем, що рухається сусідньою смугою, запобігання наїзду можливе, якщо відстань між передніми частинами транспортних засобів не менша зупинного шляху і безумовному виконанні п. 14.6 в) ПДР України про заборону обгонів в зоні пішохідного переходу.

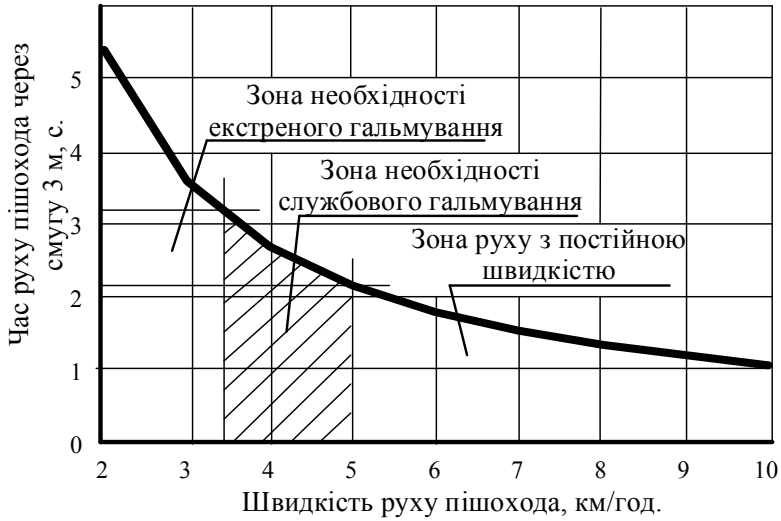


Рисунок 7 – Зони режимів руху автомобіля для запобігання наїзду на пішохода
Джерело: розроблено авторами

На вулицях, де дозволено паркування автомобілів для підвищення безпеки руху на нерегульованих пішохідних переходах в зарубіжній практиці використовують звуження проїзної частини на переході. Такий захід: дозволяє поліпшити видимість в зоні переходу; перешкоджає паркуванню автомобілів у безпосередній близькості від переходів і прямо на них; сприяє зменшенню швидкості руху; скорочує час руху пішоходів через перехід і сприяє залученню пішоходів до переходу саме в цьому, обладнаному для переходу, місці. В ході дослідження було розраховано, що відсоток зміни пропускної здатності збільшується при зростанні інтенсивності руху пішоходів. Скорочення часу руху пішохода скорочує затримки транспортних засобів та підвищує пропускну здатність ділянки в зоні переходу.

Висновки. В ході дослідження встановлено, що діючі нормативні і законодавчі акти України, які стосуються взаємодії транспортних і пішохідних потоків на нерегульованих пішохідних переходах в цілому спрямовані на підвищення безпеки руху на них. Подальше підвищення безпеки руху на нерегульованих пішохідних переходах потребує комплексного підходу до інформаційного і технічного забезпечення при організації руху в зонах їх розташування. Як свідчать результати дослідження, найважливішим завданням при організації руху на нерегульованих переходах є забезпечення достатньої взаємної видимості учасників руху і швидкісного режиму.

Нами пропонується для забезпечення безпеки руху пішоходів на нерегульованих пішохідних переходах, в зоні яких дозволено паркування автомобілів біля тротуарів, в Правилах дорожнього руху України необхідно: ввести вимогу обмеження швидкості руху в зоні нерегульованих пішохідних переходів до 30 км/год.; в розділ 15 Правил дорожнього руху України замість п. 15.9 (г) ввести пункт, який забороняє зупинку і стоянку транспортних засобів ближче 12 м від пішохідних переходів.

Також, для забезпечення безпеки руху пішоходів на нерегульованих пішохідних переходах при обмеженні оглядовості автомобілем, який рухається паралельно, нами пропонується в додаток до п. 14.6 в) ПДР України про заборону обгонів в зоні пішохідного переходу, рекомендувати водіям рухатись від передньої частини цього транспортного засобу не менш, ніж відстань зупинного шляху при даній швидкості руху.

Спираючись на міжнародний досвід, можливі додаткові заходи щодо реалізації цих завдань за допомогою впровадження звуження проїзної частини на переході, застосування штучних нерівностей та підведених пішохідних переходів.

Список літератури

1. Рейцен Є. О., Кучеренко Н. М. Про системний підхід до підвищення безпеки руху пішоходів у містах. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2013. № 2. С. 22-28.
2. Рейцен, Є.О. Організація і безпека міського руху: навч. посіб. Київ: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2014. 454 с.
3. Фоменко Г.Р.. Заходи з покращення безпеки пішоходів на переходах вулиць. *Вісник ХНАДУ*. 2025. Вип. 109. С.127-133. DOI: https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.127
4. Фоменко Г.Р. Напрямки підвищення безпеки пішохідних переходів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74) № 3. С. 231-235. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/36
5. Гевко І. Б., Тесля В. О., Сіправська М. Д., Гевко Б. Р., Хорошун Р. В. Нові технології для підвищення безпеки дорожнього руху на пішохідних переходах та регульованих перехрестях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. Вип. 11(42), ч. ІІ. С.268-277.
6. Решетніков Є. Б., Овсієнко Д. В. Дослідження безпеки руху на нерегульованих перехрестях при обмеженій оглядовості. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. №2/3 (56). С.36-39.
7. Гук В.І., Сітенко О.М. Містобудівні аспекти і безпека пішохідного руху. *Стандарти Європейського Союзу щодо захисту пішоходів та практичні аспекти їх застосування в Україні* / за ред. В. Козоріза. Харків: ТОВ «Цифра принт», 2013. С. 75–80.
8. Hussain Q., Alhajyaseen W.K.M., Kharbeche M., Almallah M. Safer pedestrian crossing facilities on low-speed roads: Comparison of innovative treatments. *Accident Analysis & Prevention*. 2023. Vol. 180. №106908. P. 1-12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106908
9. Pomoni M. Smart Crosswalks for Advancing Road Safety in Urban Roads: Conceptualization and Evidence-Based Insights from Greek Incident Records. *Future Transp.* 2025, Vol.5*,* №180; P. 1-19. DOI: https://doi.org/10.3390/futuretransp5040180
10. Bhagavathula R., Gibbons R. B. Lighting Strategies to Increase Nighttime Pedestrian Visibility at Midblock Crosswalks. *Sustainability.* 2023, Vol.15, №1455. P. 1-16. DOI: https://doi.org/10.3390/su15021455
11. Crosswalk Visibility Enhancements. FHWA-SA-21-049. *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration:* веб-сайт. URL: https://highways.dot.gov/safety/proven-safety-countermeasures/crosswalk-visibility-enhancements (дата звернення: 03.05.2026)
12. Sharma S. N., Dehalwar K. A Systematic Literature Review of Pedestrian Safety in Urban Transport Systems. *Journal of Road Safety*. 2025. №36(4), P. 55–78. DOI: https://doi.org/10.33492/JRS-D-25-4-2707507
13. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів. Зі Зміною № 1. [Чинний від 2022-09-01] *Будстандарт*: веб-сайт. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77079
14. Про правила дорожнього руху: постанова Кабінету Міністрів України від 10 жовтня 2001 р. №1306: станом на 9 грудня 2025 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#n16 (дата звернення: 03.05.2026)

References

1. Reitsen, E. O., & Kucherenko, N. M. (2013). On a systematic approach to improving pedestrian safety in cities. *Bulletin of the Donetsk Academy of Motor Transport*, 2, 22-28. [in Ukrainian]
2. Reitsen, E.O. (2014). *Organization and safety of urban traffic*. Kyiv: LLC "SIC GROUP Ukraine". [in Ukrainian]
3. Fomenko, G.R. (2025). Measures to improve pedestrian safety at street crossings. *Bulletin of the Ukrainian Academy of Sciences*, 109, 127-133. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.127

4. Fomenko, G.R. (2024). Directions for improving the safety of pedestrian crossings. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*, 35 (74), 3, 231-235. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/36
5. Hevko, I. B., Teslya, V. O., Sipravska, M. D., Hevko, B. R., & Khoroshun, R. V. (2025). New Technologies for Enhancing Road Traffic Safety at Pedestrian Crossings and Signalized Intersections. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), part II, 268-277. [in Ukrainian].
6. Reshetnikov, E. B., & Ovsienko, D. V. (2012). Research on traffic safety at unregulated intersections with limited visibility. *East European Journal of Advanced Technologies*, 2/3 (56), 36-39. [in Ukrainian].
7. Guk, V.I., & Sitenko, O.M. (2013). *Urban planning aspects and pedestrian safety*. In V. Kozoriz, (Ed.) European Union standards for pedestrian protection and practical aspects of their application in Ukraine (pp. 75–80). Kharkiv: LLC "Tsifra Print" [in Ukrainian].
8. Hussain, Q., Alhajyaseen, W.K.M., Kharbeche, M., & Almallah, M. (2023). Safer pedestrian crossing facilities on low-speed roads: Comparison of innovative treatments. *Accident Analysis & Prevention*, 180, 106908. https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106908
9. Pomoni, M. (2025). Smart Crosswalks for Advancing Road Safety in Urban Roads: Conceptualization and Evidence-Based Insights from Greek Incident Records. *Future Transp.*, *5*(4), 180; https://doi.org/10.3390/futuretransp5040180
10. Bhagavathula, R., & Gibbons, R. B. (2023). Lighting Strategies to Increase Nighttime Pedestrian Visibility at Midblock Crosswalks. *Sustainability*, *15*(2), 1455. https://doi.org/10.3390/su15021455
11. Crosswalk Visibility Enhancements. FHWA-SA-21-049. (2023). *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*. https://highways.dot.gov/safety/proven-safety-countermeasures/crosswalk-visibility-enhancements
12. Sharma, S. N., & Dehalwar, K. (2025). A Systematic Literature Review of Pedestrian Safety in Urban Transport Systems. *Journal of Road Safety*, *36*(4), 55–78. https://doi.org/10.33492/JRS-D-25-4-2707507
13. Derzhavni Budivelni Normy (2018). *Streets and roads of settlements*. (ДБН В.2.3-5:2018). Kyiv [in Ukrainian].
14. On Traffic Rules: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (2025, December 9). №1306 (2001, October 10). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#n16

Ruslan Petrusenko, Nataliia Semchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci
Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Enhancing Road Safety at Uncontrolled Crosswalks

An analysis of road traffic accidents in Ukraine shows that many occur in cities. One of the most common types of city traffic accidents involves collisions with pedestrians. These account for up to 40% of all accidents resulting in injuries and are often severe. More than 20% of pedestrian collisions happen at crosswalks. Improving traffic management near crosswalks is key to enhancing city traffic safety. At unregulated crosswalks, providing adequate visibility for road users is critical for pedestrian safety.

This article studies the interaction between vehicle and pedestrian flows at unregulated crosswalks. It develops recommendations for improving crosswalk safety. The object of the study is vehicle and pedestrian movement at unregulated crosswalks. The subject is traffic accidents at these crossings.

An analysis of traffic organization at unregulated pedestrian crossings was conducted. The study assessed the possibility of preventing pedestrian collisions at such crossings when visibility is limited by the regulatory visibility triangle. There were also experimental studies of pedestrian walking speeds at unregulated crossings. Further assessment examined the feasibility of preventing pedestrian collisions under limited visibility conditions.

Additional measures are proposed to improve safety at uncontrolled crosswalks. The Traffic Rules should be amended regarding speed limits, stopping, and parking near crosswalks. Changes to the roadway's geometry near crosswalks are also suggested. These will improve visibility and reduce pedestrian crossing time. Reducing crossing time increases the traffic capacity of the street section at the crossing. Proposing speed bumps and raised crosswalks. This will ensure vehicles travel at the established speed and prevent congestion near unregulated crossings.

The practical significance of the research results lies in their potential to serve as a tool for improving traffic management and enhancing pedestrian safety.

road safety, uncontrolled crosswalk, limited visibility, preventing pedestrian collisions

Одержано (Received) 07.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 02.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 656.025 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).339-352

Ів. Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **М. Д. П'єнтак, В. О. Тесля,** доц., канд. техн. наук,
Б. Р. Гевко, канд. екон. наук, **Р. В. Хорошун,** д-р філос., **Т. Д. Навроцька,** канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
Іг.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

Аналіз та перспективи розвитку автотранспортних перевезень в Тернопільській області

У статті проведено комплексне наукове дослідження сучасного стану та перспектив розвитку ринку автотранспортних перевезень у загальнодержавному та регіональному розрізах, зокрема Тернопільської області. На основі системного аналізу статистичних даних за період 2018–2025 років встановлено ключові закономірності трансформації вантажообігу та пасажирообігу в умовах динамічних економічних змін. Досліджено структурні особливості оновлення парку транспортних засобів Тернопільської області, зокрема виявлено специфічні періоди стрімкого зростання реєстрацій автобусів, вантажних автомобілів та сідлових тягачів, що суттєво відрізняються від середньоукраїнських показників. Особливу увагу приділено аналізу сегмента електричного транспорту, який демонструє стабільно високу динаміку росту та стає визначальним вектором екологізації галузі. Проаналізовано стан розвитку супутньої інфраструктури, зокрема мережі автозаправних станцій, як необхідної умови для забезпечення ефективного функціонування транспортної системи. За результатами дослідження обґрунтовано роль автомобільного транспорту як базового елемента логістичної стійкості регіону та визначено перспективні напрями підвищення загальної ефективності експлуатації транспортних засобів за рахунок технологічної модернізації галузі.
автотранспорт, пасажирообіг, вантажообіг, логістична інфраструктура, реєстрація транспортних засобів

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку сфери надання послуг автотранспортних перевезень характеризується високим рівнем динамічності. Зазначена тенденція детермінована актуалізацією потреби у підвищенні ефективності логістичних процесів у різних секторах економіки. Забезпечення вказаних процесів здійснюється суб'єктами господарювання автомобільного транспорту, незалежно від їхньої організаційно-правової форми та форми власності. Крім того, в контексті України слід враховувати динаміку логістичних процесів пов'язану із веденням широкомасштабних військових дій на фронті, яка має вирішальний вплив на розвиток автотранспортних послуг у різних областях України. Вище наведене вимагає детального аналізу основних аспектів діяльності логістичних підприємств автомобільного транспорту як України в цілому, так і окремо Тернопільської області, яка знаходиться відносно віддалено від лінії фронту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Послуги автотранспортних підприємств із перевезень (вантажних та пасажирських) забезпечують ефективне функціонування практично усіх секторів економіки України і їх невід'ємною складовою. Відтак дослідження динаміки їх розвитку забезпечують об'єктивну оцінку існуючого положення справ та можливих змін не лише у даній галузі, а й в економіці держави в цілому.

© Ів. Б. Гевко, М. Д. П'єнтак, В. О. Тесля, Б. Р. Гевко, Р. В. Хорошун, Т. Д. Навроцька, Іг. Б. Гевко, 2026

Питання функціонування та стратегічного розвитку автотранспортних систем постійно перебувають у центрі уваги провідних вітчизняних та закордонних учених. Значний внесок у дослідження теоретико-методологічних засад логістичного управління та економіки автомобільного транспорту зробило багато науковців [1-17]. У працях висвітлювались механізми адаптації транспортних підприємств до ринкових умов та методи підвищення їхньої конкурентоспроможності.

Окремий пласт досліджень присвячений регіональним аспектам розвитку транспортної інфраструктури [1, 2, 7, 9, 10]. Зокрема, у роботах дослідників західного регіону України [7, 9] акцентується увага на необхідності модернізації технічної бази автотранспортних підприємств та впровадження інноваційних рішень для оптимізації вантажних і пасажирських потоків.

У сучасних умовах науковий дискурс зміщується в бік екологізації та цифровізації галузі. Питання впровадження електричного транспорту та розбудови відповідної інфраструктури активно вивчаються в контексті сталого розвитку (Sustainable Development Goals). Дослідники зазначають, що перехід на «зелену» енергію в транспортному секторі є не лише екологічним пріоритетом, а й економічною необхідністю для зниження собівартості перевезень.

Проте, попри наявність ґрунтовних праць, залишаються недостатньо висвітленими питання різких структурних змін у реєстрації транспортних засобів на регіональному рівні під впливом глобальних та локальних кризових явищ. Потребує додаткового вивчення кореляція між стрімким зростанням парку електромобілів та готовністю регіональної інфраструктури до забезпечення їхньої безперебійної експлуатації. Саме ці аспекти, у поєднанні з аналізом динаміки перевезень у Тернопільській області, зумовили актуальність та напрям даного дослідження.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є аналіз та перспективи розвитку автотранспортних перевезень в Тернопільській області.

Виклад основного матеріалу. Статистичний аналіз під час військового стану проводити вкрай складно, позаяк багато інформації є закритою, а та, яка з'являється у відкритих джерелах чи державних статистичних органів, часто є неповною чи викривленою. Проте проведений нами аналіз з отриманих відкритих джерел [18-23] демонструє, що автомобільний транспорт зберігає домінуючу роль у логістичній системі держави (табл. 1). Особливо його вага почала зростати під час широкомасштабного вторгнення з 2022 року, коли практично припинились будь-які перевезення авіаційним транспортом, різко знизились перевезення водним транспортом, а також почали скорочуватись, особливо в кінці 2025 та на початку 2026 років перевезення залізничним транспортом, який почав масово піддаватись ворожим атакам.

У таблиці 1 наведено основні зібрані з відкритих джерел [18-23] дані по Україні за видом автомобільний транспорт за 2018-2024 роки. Аналізуючи ці дані можна констатувати, що:

- повних даних по капітальних інвестиціях в пасажирський автомобільний транспорт зібрати не вдалось, проте з наявних даних видно, що за 2024 рік вони були приблизно на тому ж рівні, що й у довоєнний час;

- капітальні інвестиції у вантажний автомобільний транспорт з 2020 року постійно зростають і найбільший стрибок (в 1,86 рази) їх відбувся у 2023 році, що пояснюється значним зростанням важливості автотранспорту у порівнянні з іншими видами транспорту після широкомасштабного вторгнення 2022 року;

- за 2023-2024 роки перевезення вантажів за всіма видами транспорту зросло на 108,0, млн. т, з яких на автомобільним транспорт припало 84,0 млн. т (77,78 %);

- перевезення вантажів автомобільним транспортом у відсотках до загального обсягу перевезень з 2018 року постійно зростає у 2022–2024 роках становить 77 %;

- у 2022-2024 роках зростає вантажообіг автомобільним транспортом (темп росту у 2024 році склав 106,13 %); проте він не досягає довоєнних показників;

- загалом вантажообіг автомобільним транспортом у відсотках до загального вантажообігу за всіма видами транспорту під час повномасштабного вторгнення різко зріс і за 2023 рік був найвищим за усі аналізовані роки, і становив 30,9 %, що є значно вищим у порівнянні з довоєнними показниками;

- з 2022 року зростає загальний пробіг вантажних автомобілів підприємств (темп росту у 2024 році склав 106,76 %), проте він не досягає довоєнних показників;

- аналогічна тенденція спостерігається з пасажирообігом, частка якого у загальному пасажирообігу зросла з 39 % до 41 % у 2023-2024 роках. Також наявні дані станом на 01.10.2025 показують, що перевезення пасажирів за всіма видами транспорту становило 1634,9 млн. пас. (2176,2 млн. пас. за 2024 р.), а зокрема автомобільним (автобуси) транспортом 692,7 млн. пас. (915,3 млн. пас. за 2024 р.). Тобто за дев'ять місяців 2025 року частка автомобільного транспорту у загальному пасажирообігу зросла і становила 42 %.

Таблиця 1 – Дані по Україні за видом автомобільний транспорт

Показники	Рік								
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Абс. відх., 2023-2024	Темп росту, %, 2023-2024
Капітальні інвестиції в пасажирський автомобільний транспорт, млн. грн.	5271,4	4355,0	5189,7	3856,8	-	-	4756,7	-	-
Капітальні інвестиції у вантажний автомобільний транспорт, млн. грн.	5819,6	5240,5	4136,9	4966,1	5500,5	10244,0	10281,7	+37,7	100,37
Перевезення вантажів за всіма видами транспорту, млн. т	1643	1579	1641	1518	902	878	986	+108,0	112,30
Перевезення вантажів загалом автомобільним транспортом, млн. т	1206	1147	1232	1121	695	677	761	+84,0	112,41
Перевезення вантажів автопідприємствами, млн. т	134	190	152	180	79	91	96	+5,0	105,49
Перевезення вантажів автомобільним транспортом у відсотках до загального обсягу перевезень, %	73	73	75	74	77	77	77	0	0,00%
Перевезення вантажів автопідприємствами у відсотках до загального обсягу перевезень, %	8	12	9	12	9	10	10	0	0,00
Вантажообіг за всіма видами транспорту, млрд. т км	361,3	355,0	313,2	304,7	182,4	179,8	204,1	+24,3	113,52
Вантажообіг автомобільним транспортом, млрд. т км	72,1	65,0	65,1	61,8	47,4	55,5	58,9	+3,4	106,13
Вантажообіг реалізований автопідприємствами, млрд. т км	24,0	30,3	27,7	31,7	20,8	25,4	26,6	+1,2	104,72%
Вантажообіг автомобільним транспортом у відсотках до загального вантажообігу за всіма видами транспорту, %	19,9	18,3	20,8	20,3	26,0	30,9	28,8	-2,1	93,20%

Продовження таблиці 1

Загальний пробіг вантажних автомобілів підприємств і організацій України, тис.км	6417750,8	6538066,9	6934526,3	6258757,8	4634632,1	5309702,1	5668726,1	+359024	106,76
Перевезення пасажирів за всіма видами транспорту, млн. пас.	4487	4262	2570	2655	1601	2038	2176	+138,0	106,77
Перевезення пасажирів автомобільним (автобуси) транспортом, млн. чол.	1907	1805	1084	1089	663	803	915	+112,0	113,95
Пасажирообіг за усіма видами транспорту, млрд. пас. км	104,4	107,2	49,0	62,7	31,1	39,4	43,4	+4,0	110,15 %
Пасажирообіг автомобільним (автобуси) транспортом, млрд. пас. км	34,6	33,9	19,1	18,8	12,3	15,4	18,0	+2,6	116,88 %
Пасажирообіг автомобільним (автобуси) транспортом до загального пасажирообігу за всіма видами транспорту, %	33	32	39	30	39	39	41	+2,0	105,13 %
Загальний пробіг пасажирських автобусів підприємств і організацій України, тис. км	2084270,9	2116822,1	1468095,8	1373739,6	813577,7	916031,1	1051699,1	+135668	114,81
Загальна довжина автомобільних доріг, тис. км	161,9	161,9	162,2	161,8	162,2	162,3	162,3	0	0,00%
Довжина автомобільних доріг з твердим покриттям, тис. км	158,5	158,4	158,7	158,4	158,9	159,0	159,0	0	0,00%
Загальна довжина автодоріг державного значення, тис. км	44500,1	44520,4	44555,9	44533,5	45016,6	45691,9	45705,9	+14,0	100,03
Загальна довжина автомобільних доріг місцевого значення, тис. км	113983,6	113955,6	114152,0	113894,5	113855,8	113290,1	113296,3	+6,2	100,01

Джерело: складено авторами на основі статистичних даних України [18-23]

Для наочного відображення динаміки обсягів перевезення вантажів за всіма видами транспорту та автомобільним транспортом загалом в Україні у 2018–2024 роках доцільно використати графічне представлення наведених у таблиці 1 даних (рис. 1). З нього чітко видно, який різкий спад відбувся у 2022 році, під час повномасштабного вторгнення, та подальше поступове зростання частки перевезення вантажів автомобільним транспортом у наступних роках.

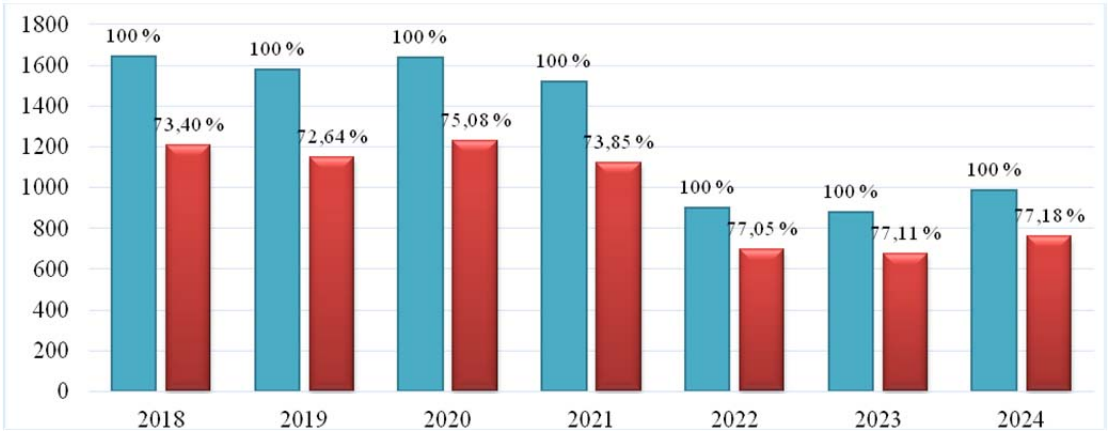


Рисунок 1 - Динаміка обсягів перевезення вантажів за всіма видами транспорту та автомобільним транспортом загалом в Україні (2018–2024 рр.)

Джерело: розроблено авторами

Попри загальне зниження обсягів перевезень за всіма видами транспорту у кризовий період 2022 року (з 1518 млн. т до 902 млн. т), сегмент автомобільних підприємств продемонстрував вищу гнучкість, забезпечивши зростання пасажирообігу у 2024 році на 16,88% порівняно з попереднім роком. Це свідчить про переорієнтацію логістичних ланцюгів на користь автотранспорту через його мобільність та адаптивність.

Також слід відзначити, що загальна довжина автомобільних доріг, як і доріг з твердим покриттям, державного та місцевого значення, за 2018–2024 роки практично не змінювалась.

На відміну від загальнодержавних тенденцій дослідження показників Тернопільської області виявило певні особливості (табл. 2) [24-30]. Загальна довжина автомобільних доріг, як і доріг з твердим покриттям, в області за 2018-2024 роки не зазнала змін, як і загалом по Україні. Аналогічні тенденції спостерігаються по вантажообігу, який на 2024 рік незначно впав і практично залишається на рівні довоєнних показників, й становить 1256,0 млн. т км.

Таблиця 2 – Дані по Тернопільській області за видом автомобільний транспорт

Показники	Рік						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Загальна довжина автомобільних доріг, тис. км	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Довжина автомобільних доріг з твердим покриттям, тис. км	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Вантажообіг, млн. т км	1381,1	1229,7	1391,5	1333,1	-	-	1256,0
Обсяги перевезення вантажів, тис. т	18427,1	16209,3	18620,2	17986,8	2609,0	2873,5	3295,4
Перевезено пасажирів, тис. пас.	45,1	47,4	31,9	36,3	40,6	45,0	-
Пасажирообіг, млн. пас. км	786,6	823,6	537,7	580,8	783,1	-	-

Джерело: статистичні відомості надані Головним сервісним центром МВС на запит ГО «Альянс автомобільного транспорту» (№ 469 від 20.10.2025)

Аналізуючи наявні дані [24-30] обсягів перевезення вантажів по Тернопільській області (табл. 2) можна зробити висновок, що вони становлять незначну частину від довоєнних часів. Так обсягів перевезення вантажів за 2022 рік становлять лише 14 % від обсягів перевезення у 2020 році (найвищий за аналізований період), 15,4 % за 2023 рік і 17,7 % за 2024 рік. Проте спостерігається чітка тенденція до його зростання. Також слід звернути увагу на те, що аналізовані дані під час повномасштабного вторгнення можуть бути спотворені у порівнянні з 2021 роком і не відображати дійсності. Що стосується пасажирообігу, то він у 2022 році у порівнянні з 2021 роком навпаки зростає в 1,27 рази, а за наступні роки дані не вдалось отримати. Також з 2020 по 2023 роки відбувається стабільний ріст перевезення пасажирів.

Аналізуючи дані вантажоперевезень у Тернопільській області за 2018–2024 роках (рис. 2), можна зробити висновок, що в області відбувались аналогічні до загальноукраїнських тенденцій зміни обсягів перевезення вантажів.

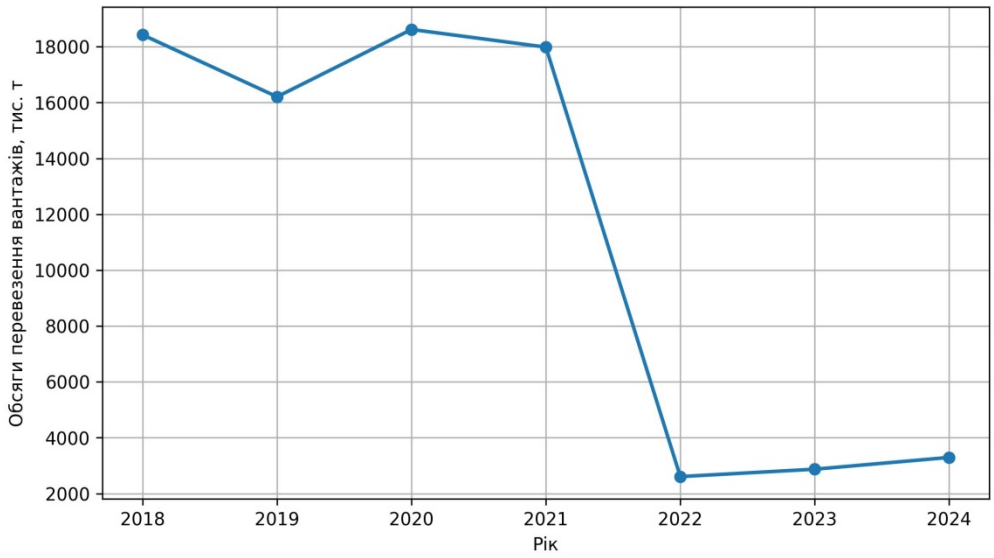


Рисунок 2 - Динаміка обсягів перевезення вантажів автомобільним транспортом у Тернопільській області (2018–2024 рр.)

Джерело: розроблено авторами

Розвиток автотранспортного парку характеризується високою інтенсивністю динамічних змін, що притаманно всім сегментам ринку: пасажирським, вантажним та легковим транспортним засобам. Зокрема, в останні роки зафіксовано стрімке зростання частки електричних транспортних засобів (BEV). Примітно, що процес електромобілізації зберігає позитивну динаміку в Україні навіть в умовах дії воєнного стану, що свідчить про стійкість даного тренду до дестабілізуючих зовнішніх чинників. Трансформація структури автопарку детермінована комплексною взаємодією низки факторів, серед яких ключове значення мають: специфіка логістичних процесів у воєнний період, економічна доцільність експлуатації, показники ремонтопридатності, а також еволюція споживчих пріоритетів [12, 13, 15, 17]. Для виконання дослідження нами використано статистичні відомості, надані Головним сервісним центром МВС на запит ГО «Альянс автомобільного транспорту» (№ 469 від 20.10.2025) [31]. У таблицях 3 – 5 систематизовано дані щодо первинної реєстрації транспортних засобів за період 2019–2025 рр. Статистичний аналіз охоплює кількісні показники пасажирського (автобуси) та вантажного (в т.ч. сідельні тягачі) транспорту, а також динаміку поповнення парку електромобілів. Порівняльна характеристика проведена у регіональному (Тернопільська область) та загальнодержавному масштабах.

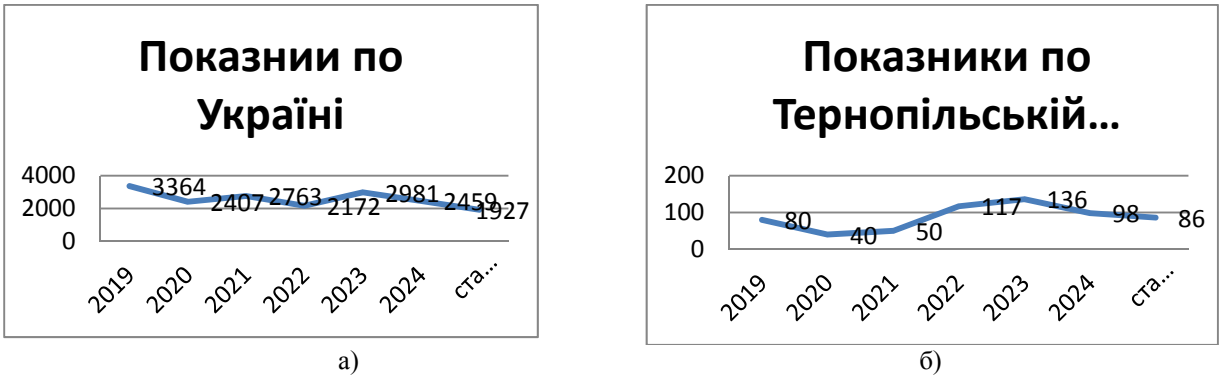
Так, в таблиці 3 наведені порівняльні дані за 2019-2025 рр. по реєстрації автотранспортних засобів за типом конструкції «Автобус» (відповідно до положень статті 1 Закону України «Про автомобільний транспорт»: автобус – це транспортний засіб, який за своєю конструкцією та обладнанням призначений для перевезення пасажирів з кількістю місць для сидіння більше ніж дев'ять з місцем водія включно).

Таблиця 3 – Реєстація автотранспортних засобів для перевезення пасажирів

Показники	Рік						
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Станом на 01.10.2025
Україна	3364	2407	2763	2172	2981	2459	1927
Тернопільська область	80	40	50	117	136	98	86 (прогноз до кінця року - 98)

Джерело: [31]

Динаміка реєстрації автобусів у Тернопільській області порівняно із загальнодержавними показниками представлена на рисунку 3.



а) б)

Рисунок 3 – Динаміка реєстрації автотранспортних засобів для перевезення пасажирів за 2019–2025 рр.: а) Україна; б) Тернопільська область

Джерело: розроблено авторами

Результати аналізу динаміки реєстрацій свідчать, що у період, який передував повномасштабній військовій агресії РФ, на загальнодержавному рівні простежувалася стійка тенденція до зростання кількості реєстраційних операцій. У 2022 році зафіксовано різку регресію показників, що безпосередньо зумовлено окупацією значної частини територій України. Наступний 2023 рік характеризувався компенсаторним зростанням, після чого у 2024–2025 роках відбулася стабілізація з тенденцією до зниження інтенсивності реєстрацій. На відміну від загальноукраїнських трендів, динаміка у Тернопільській області має специфічні відмінності. Зокрема, у 2022 році спостерігалося аномальне зростання кількості реєстрацій транспортних засобів (понад двократне збільшення відносно попереднього періоду) із подальшою позитивною прогресією у 2023 році. Починаючи з 2023 року, вектори розвитку регіонального та загальнодержавного ринків синхронізувалися. Різке збільшення показників у Тернопільській області впродовж 2022 року детерміновано демографічними чинниками, а саме: значною концентрацією внутрішньо переміщених осіб із зони активних бойових дій та тимчасово окупованих територій. Це зумовило зростання попиту на транспортне забезпечення для внутрішньообласних перевезень та транскордонної логістики.

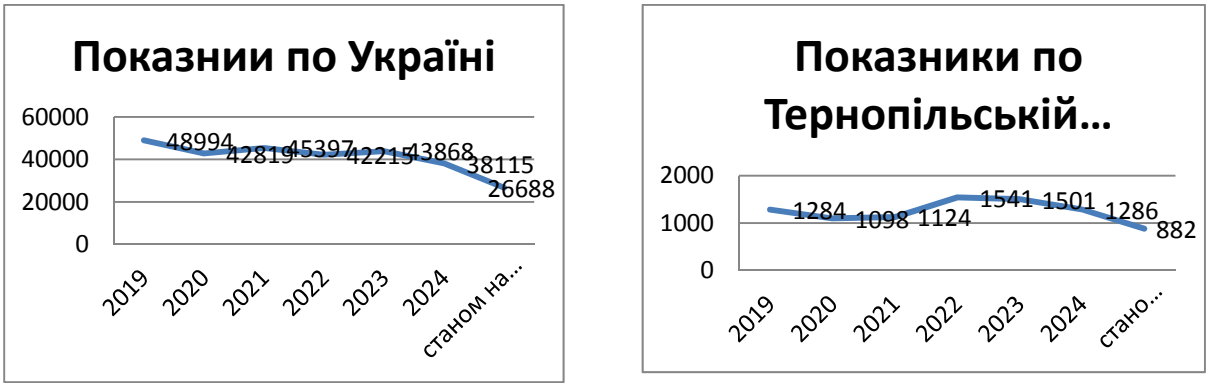
Динаміку реєстрації вантажних транспортних засобів в Україні та Тернопільській області за 2019-2025 роки представлено в табл. 4 та на рис. 2 (відповідно до положень статті 1 Закону України «Про автомобільний транспорт» «Автомобіль вантажний – це автомобіль, який за своєю конструкцією та обладнанням призначений для перевезення вантажів».

Таблиця 4 - Реєстація вантажних автотранспортних засобів

Показники	Рік						
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Станом на 01.10.2025
Україна	48994	42819	45397	42215	43868	38115	26688
Тернопільська область:	1284	1098	1124	1541	1501	1286	882
- в т.ч. сідловий тягач	476	363	306	690	651	396	205

Джерело: [31]

Динаміка реєстрації вантажних автотранспортних засобів у Тернопільській області порівняно із загальнодержавними показниками представлена на рисунку 4.



а) б)

Рисунок 4 - Динаміка реєстрації вантажних автотранспортних засобів за 2019–2025 рр.:
а) Україна; б) Тернопільська область

Джерело: розроблено авторами

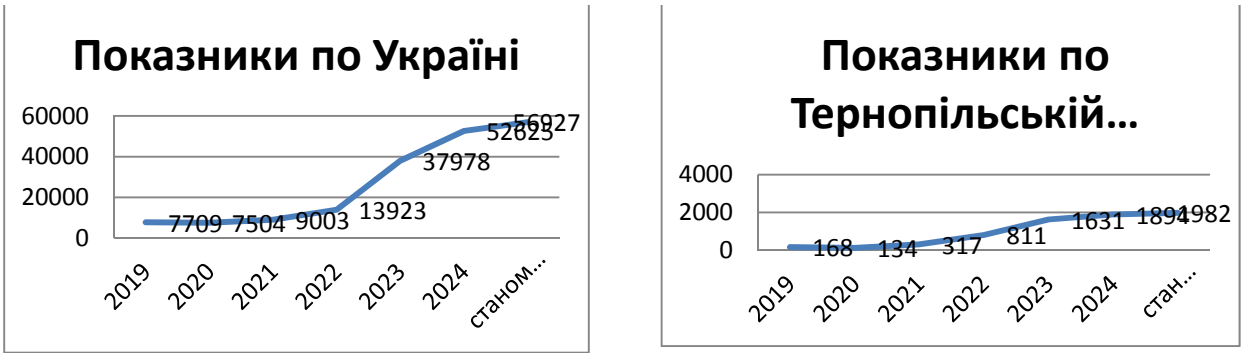
Схожий вектор розвитку простежується і в сегменті вантажних автотранспортних засобів. Так, у 2022 році на тлі загальнодержавної регресії обсягів реєстрації вантажного автотранспорту, у Тернопільській області зафіксовано протилежну динаміку - інтенсивне зростання показників (коефіцієнт зростання склав понад 1,37). Протягом 2023 року спостерігалася певна стабілізація ринку: загальноукраїнський показник продемонстрував незначну позитивну динаміку, тоді як у регіональному вимірі (Тернопільська область) відбулася корекція у бік зменшення на 40 одиниць. Період 2024–2025 рр. позначився синхронним зниженням інтенсивності реєстраційних процесів як на загальнодержавному, так і на регіональному рівнях, що може свідчити про насичення ринку або зміну кон'юнктури вантажних перевезень.

В таблиці 5 та на рисунку 5 наведені дані реєстрації електричних транспортних засобів (BEV) в Україні та Тернопільській області за 2019-2025 роки.

Таблиця 5 - Реєстація електричних транспортних засобів (BEV)

Показники	Рік						
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Станом на 01.10.2025
Україна	7709	7504	9003	13923	37978	52625	56927
Тернопільська область	168	134	317	811	1631	1894	1982 (прогноз до кінця року - 2256)

Джерело: [31]



а) б)

Рисунок 5 - Динаміка реєстрації електричних транспортних засобів за 2019–2025 рр.:
а) Україна; б) Тернопільська область

Джерело: розроблено авторами

Графічна інтерпретація результатів підтверджує стійку тенденцію до екологізації автотранспортного парку. У Тернопільській області чисельність електричних транспортних засобів (BEV) продемонструвала суттєву позитивну динаміку: зі 168 одиниць у 2019 році до прогностичного показника у 2256 одиниць у 2025 році. Аналогічна тенденція спостерігається і в Україні загалом. На відміну від сегментів пасажирського та вантажного транспорту з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), де спостерігалася волатильність показників, ринок електромобілів як у регіональному, так і в загальнодержавному масштабах характеризується стабільним експоненційним зростанням протягом усього досліджуваного періоду. Зазначена тенденція детермінована низкою економічних та експлуатаційних чинників. По-перше, вагомою перевагою є низька вартість енергоносія порівняно з традиційними видами палива. По-друге, високий рівень ремонтопридатності та конструктивна простота силових агрегатів мінімізують витрати на технічне обслуговування. Ключовим стимулюючим фактором виступає державна політика сприяння імпорту екологічного транспорту, зокрема застосування преференційного режиму оподаткування. Різке зростання обсягів реєстрації в останні роки зумовлене дією нульової ставки ввізного мита та звільненням від сплати ПДВ. Також очікуване скасування зазначених пільг у 2026 році виступало додатковим драйвером споживчого попиту в поточному періоді (ефект випереджальної купівлі). Це обґрунтовує необхідність розвитку мережі Е-АЗС, яких у регіоні вже налічується дише 169 одиниць, а в цілому на території України - 5249 станцій.

Загалом дослідження показників Тернопільської області виявило специфічні тенденції, що відрізняються від загальнодержавних. Зокрема, у 2022 році зафіксовано різке зростання реєстрації транспортних засобів:

- Пасажирський транспорт: кількість реєстрацій автобусів зросла у 2,3 рази порівняно з 2021 роком (зі 50 до 117 одиниць). Це зумовлено зростанням потреби у внутрішньообласних та міжнародних перевезеннях у західному регіоні.
- Вантажний сегмент: спостерігалося зростання реєстрацій вантажних транспортних засобів на 37% (з 1124 до 1541 одиниці) та сідлових тягачів (з 306 до 690 одиниць). Такі показники підтверджують статус області як важливого транзитного та логістичного вузла.
- Найбільш стійким до зовнішніх факторів виявився сегмент електромобілів. У Тернопільській області кількість реєстрацій транспортних засобів із типом палива «Електро» демонструє експоненціальне зростання: зі 168 одиниць у 2019 році до прогнозованого показника 2256 одиниць у 2025 році. Ця тенденція підкріплюється розвитком інфраструктури - станом на кінець 2025 року в області функціонує 169 заправних станцій, яких, на жаль, ще є досить мала кількість. Основними стимулами є економічна ефективність експлуатації, простота технічного обслуговування та державна підтримка через податкові пільги.

Висновки. Аналізуючи дані по Україні за 2018-2024 роки можна констатувати, що автомобільний транспорт залишається фундаментом логістичної системи України, забезпечуючи понад 75% вантажних перевезень (за 2023-2024 роки перевезення вантажів за всіма видами транспорту зросло на 108,0, млн. т, з яких на автомобільним транспорт припало 84,0 млн. т, тобто 77,78 %). Також у 2022-2024 роках зростає вантажообіг автомобільним транспортом (темп росту у 2024 році склав 106,13 %); проте він не досягає довоєнних показників. Загалом вантажообіг автомобільним транспортом у відсотках до загального вантажообігу за всіма видами транспорту під час повномасштабного вторгнення різко зріс і за 2023 рік був найвищим за усі

аналізовані роки, і становив 30,9 %, що є значно вищим у порівнянні з довоєнними показниками.

Аналогічна тенденція спостерігається з пасажирообігом, частка якого у загальному пасажирообігу зросла з 39 % до 41 % у 2023-2024 роках. Також наявні дані станом на 01.10.2025 показують, що перевезення пасажирів за всіма видами транспорту становило 1634,9 млн. пас. (2176,2 млн. пас. за 2024 р.), а зокрема автомобільним (автобуси) транспортом 692,7 млн. пас. (915,3 млн. пас. за 2024 р.). Тобто за дев'ять місяців 2025 року частка автомобільного транспорту у загальному пасажирообігу зросла і становила 42 %.

Розвиток автомобільних перевезень сприяв зростанню капітальних інвестицій у вантажний автомобільний транспорт. Так з 2020 року вони постійно зростають і найбільший стрибок (в 1,86 рази) їх відбувся у 2023 році, що пояснюється значним зростанням важливості автотранспорту у порівнянні з іншими видами транспорту після широкомасштабного вторгнення 2022 року.

У регіональному розрізі виявлено аномальне зростання реєстрації вантажного та пасажирського транспорту в Тернопільській області в період 2022–2023 років, що свідчить про зміщення логістичних центрів тяжіння у Західний регіон України. Зокрема, у 2022 році зафіксовано різке зростання реєстрації транспортних засобів. Зокрема пасажирського автотранспорту, де кількість реєстрацій автобусів зросла у 2,3 рази порівняно з 2021 роком (зі 50 до 117 одиниць). Також вантажного автотранспорту, де спостерігалося зростання реєстрацій вантажних транспортних засобів на 37% (з 1124 до 1541 одиниці) та сідлових тягачів (з 306 до 690 одиниць). А також найбільш стійким до зовнішніх факторів виявився сегмент електромобілів. У Тернопільській області кількість реєстрацій транспортних засобів із типом палива «Електро» демонструє експоненціальне зростання: зі 168 одиниць у 2019 році до прогнозованого показника 2256 одиниць у 2025 році.

Також, встановлено сталу тенденцію до електрифікації автопарку як в Україні, так і зокрема у Тернопільській області. Ріст реєстрацій електромобілів не уповільнився навіть під впливом війни, що робить цей напрям найбільш перспективним для інвестицій у інфраструктуру.

Список літератури

1. Аулін В. В., Голуб Д. В. Теоретичне обгрунтування прогнозування розподілу попиту пасажирів на послуги різних типів міського транспорту. *Вісник ЖДТУ*. 2014. № 2(69). С.16-20.
2. Aulin V., Hrynkiv A., Lyashuk O., Vovk Y., Lysenko S., Holub D., Zamota T., Pankov A., Sokol M., Ratynskyi V., Lavrentieva O. Increasing the functioning efficiency of the working warehouse of the "Uvk Ukraine" company transport and logistics center. *Scientific Letters of the University of Zilina*. 2020. 22(2). Pp. 3-14.
3. Aulin V., Lyashuk O.,Pavlenko O.,Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Holub, D., Vovk, Y., Dzyura, V., Sokol, M. Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. 21(2). Pp. 3-12.
4. Філімоніхіна І. І., Семенюта М. Ф., Якименко С. М. Прогнозування показників пасажирських перевезень на автомобільному транспорті. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Випуск № 9(40)_II. Кропивницький*. 2024. С. 219-229. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.219-229
5. Загорянський В. Г. Застосування статистичних методів наукових досліджень при обстеженні пасажиропотоків міського автомобільного транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Випуск № 6(37)_II. Кропивницький*. 2022. С. 82-89. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.82-89
6. Корнійко Я., Валявська Н., Міхеєв О. Аналіз сучасного стану транспортної галузі України *у розрізі вантажних перевезень. Економіка та суспільство*, (70). 2024. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-70.

7. Фалович Н. М., Фалович В. А., Шевчук О. С., Попович П. В., Прогній П. Б., Мельниченко В. В. Логістична інфраструктура Тернопільської області. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Випуск № 5(36)_II. Кропивницький*. 2022. С. 274-283. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.274-283
8. Дмитрів Д., Дмитрів О., Репак О. Аналіз ринку міжнародних вантажних автоперевезень в Україні в умовах воєнного стану. *Соціально-економічні проблеми і держава*. 2023. Вип. 2 (29). С. 48-60. URL: http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2023/23ddvuvs.pdf
9. Попович П. В., Маяк М. М., Розум Р. І., Буряк М. В., Березька К. М., Коваль Ю. Б., Мишко С. А. Дослідження стану транспортної інфраструктури міста Тернополя. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 7(38), ч.II. С. 243-249. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.243-249.
10. Плекан У. М., Ляшук О. Л., Рожко Н. Я., Цьонь О. П. Удосконалення соціальної функції транспортної галузі України. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. *Випуск № 6(37)_I. Кропивницький. 2022*. С. 157-166. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.157-166
11. Техніко-економічне обґрутування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 276 с.
12. Смерічевська, С., Штик, Ю., Стріжов, О. Аналіз стану і тенденції розвитку транспортноїінфраструктури України. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2023. № 9 (09). С. 56–62. DOI: https://doi.org/10.32782/dees.9-10.
13. Накалюжна А. О., Устіловська А. С. Транспортна галузь України: виклики, трансформації та перспективи розвитку в умовах війни та цифрової ери. *Вісник економіки транспорту і промисловості* № 90, 2025. С. 181-189. DOI: https://doi.org/10.18664/btie.90.337363
14. Шевчук О. А., Гайванович Н. В. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку морських вантажних перевезень в Україні та світі. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».* 2023. № 25. С. 59–64. URL: https://doi.org/10.20535/2307-5651.25.2023.278603.
15. Гнедіна К. В., Нагорний П. В. Ринок вантажних перевезень в Україні: аналіз сучасного стану, виклики воєнного часу та перспективи розвитку. *Підприємництво і торгівля*. 2023. №38. С. 19-28/ DOI: https://doi.org/10.32782/2522-1256-2023-38-03.
16. Томчук О., Головченко Я. Аналітична оцінка послуг вантажних перевезень в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*. 2023. № 53. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-53-90 (дата звернення: 16.01.2025).
17. Гусєв Ю., Циганок О., Вечір К., Бірoваш М. Галузеві тренди. Стан логістичної галузі в Україні: тренди та особливості. *Kyivstar Business Hub – корпоративний блог для бізнесу*. 2024. URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/galuzevi-trendi-stan-logistichnoyi-galuzi-v-ukrayini-trendi-ta-osoblivosti (дата звернення: 16.01.2025).
18. Транспорт України 2019 Статистичний збірник. За редакцією Ірини Петренко. *Державна служба статистики України. Київ*, 2020. С. 113.
19. Транспорт України 2020 Статистичний збірник. За редакцією Ірини Петренко. *Державна служба статистики України. Київ,* 2021. С. 114.
20. Транспорт України 2021 Статистичний збірник. За редакцією Ірини Петренко. *Державна служба статистики України. Київ,* 2022. С. 112.
21. Транспорт України 2022 Статистичний збірник. За редакцією Ірини Петренко. *Державна служба статистики України. Київ*, 2023. С. 96.
22. Транспорт України 2023 Статистичний збірник. За редакцією Ірини Петренко. *Державна служба статистики України. Київ*, 2024. С. 92.
23. Транспорт України 2024 Статистичний збірник. За редакцією Ірини Петренко. *Державна служба статистики України. Київ*, 2025. С. 92.
24. Статистичний щорічник Тернопільської області за 2018 рік. За редакцією Андрія Чорного. *Головне управління статистики у Тернопільській області. Тернопіль,* 2019. С.272-277
25. Статистичний щорічник Тернопільської області за 2019 рік. За редакцією Андрія Чорного. *Головне управління статистики у Тернопільській області. Тернопіль,* 2020. С.272-276
26. Статистичний щорічник Тернопільської області за 2020 рік. За редакцією Андрія Чорного. *Головне управління статистики у Тернопільській області. Тернопіль,* 2021. С.261-265
27. Статистичний щорічник Тернопільської області за 2021 рік. За редакцією Андрія Чорного. *Головне управління статистики у Тернопільській області. Тернопіль,* 2022. С.233-235

28. Статистичний щорічник Тернопільської області за 2022 рік. За редакцією Андрія Чорного. *Головне управління статистики у Тернопільській області. Тернопіль,* 2023. С.208-210
29. Статистичний щорічник Тернопільської області за 2023 рік. За редакцією Андрія Чорного. *Головне управління статистики у Тернопільській області. Тернопіль,* 2024. С.181-184
30. Головне управління статистики у Тернопільській області (дані за 2024 р) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.te.ukrstat.gov.ua/statinfoTZ.html
31. Гевко І. Б., Гевко Б. Р., Цьонь О. П., Навроцька Т. Д., П'єнтак М. Д. Динаміка структурних змін парку автотранспортних засобів за окремими типами в Тернопільській області. *Збірник матеріалів Міжнародної наукково-практичної конференції «Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту» (19 -21 листопада 2025 р.). Кропивницький: ЦНТУ.* 2025. С. 7-8.

References

1. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2014). Theoretical substantiation of forecasting the distribution of passenger demand for services of various types of urban transport. *Visnyk of ZhDTU,* 2(69), 16-20.
2. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., Lysenko, S., Holub, D., Zamota, T., Pankov, A., Sokol, M., Ratynskyi, V., & Lavrentieva, O. (2020). Increasing the functioning efficiency of the working warehouse of the "Uvk Ukraine" company transport and logistics center. *Scientific Letters of the University of Zilina,* 22(2), 3-14.
3. Aulin, V., Lyashuk, O.,Pavlenko, O.,Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Holub, D., Vovk, Y., Dzyura, V., & Sokol, M. (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Scientific Letters of the University of Zilina,* 21(2), 3-12.
4. Filimonikhina, I. I., Semenyuta, M. F., & Yakymenko, S. M. (2024). Forecasting of passenger transport indicators in road transport. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Science,* 9(40), II, 219-229. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.219-229
5. Zahoryanskyi, V. H. (2022). Application of statistical methods of scientific research in the survey of passenger flows of urban road transport. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 6(37), 82-89. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.82-89
6. Korniiko, Ya., Valiavska, N., & Mikheiev, O. (2024). Analysis of the current state of the transport industry of Ukraine in terms of freight transport. *Economy and Society*, (70). DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-70.
7. Falovych, N. M., Falovych, V. A., Shevchuk, O. S., Popovych, P. V., Prohniy, P. B., & Melnychenko, V. V. (2022). Logistics infrastructure of the Ternopil region. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences,* 5(36), II, 274-283. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.274-283
8. Dmytriv, D., Dmytriv, O., & Repak, O. (2023). Analysis of the international road freight transport market in Ukraine under martial law. *Socio-Economic Problems and the State,* Vol. 2 (29), 48-60. URL: http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2023/23ddvuvs.pdf
9. Popovych, P. V., Mayak, M. M., Rozum, R. I., Buryak, M. V., Berezka, K. M., Koval, Y. B., & Myshko, S. A. (2023). Research on the state of transport infrastructure of the city of Ternopil. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences,* Vol. 7(38), II, 243-249. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.243-249.
10. Plekan, U. M., Lyashuk, O. L., Rozhko, N. Y., & Tson, O. P. (2022). Improvement of the social function of the transport industry of Ukraine. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 6(37), I, 157-166. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.157-166
11. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Lutsykiv, I.V., Plekan, U.M., & Klendii, V.M. (2021). Technical and economic substantiation of engineering solutions at service stations and motor transport enterprises: Study guide . Ternopil: TNTU named after Ivan Puluj Publishing House .
12. Smerichevska, S., Shtyk, Y., & Strizhov, O. (2023). Analysis of the state and development trends of the transport infrastructure of Ukraine. *Digital Economy and Economic Security,* 9 (09), 56–62. DOI: https://doi.org/10.32782/dees.9-10.
13. Nakaliuzhna, A. O., & Ustilovska, A. S. (2025). Transport industry of Ukraine: challenges, transformations and development prospects in the conditions of war and the digital era. *Bulletin of Transport Economics and Industry,* 90, 181-189. DOI: https://doi.org/10.18664/btie.90.337363
14. Shevchuk, O. A., & Haivanovych, N. V. (2023). Current state, problems and prospects for the development of maritime freight transport in Ukraine and the world. *Economic Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",* 25, 59–64. URL: https://doi.org/10.20535/2307-5651.25.2023.278603.

15. Hnedina, K. V., & Nahornyi, P. V. (2023). Freight transport market in Ukraine: analysis of the current state, wartime challenges and development prospects. *Entrepreneurship and Trade,* 38, 19-28. DOI: https://doi.org/10.32782/2522-1256-2023-38-03.
16. Tomchuk, O., & Holovchenko, Y. (2023). Analytical assessment of freight transport services under martial law. *Economy and Society,* 53. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-53-90 (date of access: 16.01.2025).
17. Husiev, Y., Tsyhanok, O., Vechir, K., & Birovash, M. (2024). Industry trends. The state of the logistics industry in Ukraine: trends and features. Kyivstar Business Hub – corporate blog for business. URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/galuzevi-trendi-stan-logistichnoyi-galuzi-v-ukrayini-trendi-ta-osoblivosti (date of access: 16.01.2025).
18. Transport of Ukraine 2019 Statistical Publication. Edited by Iryna Petrenko. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv, 2020. P. 113.
19. Transport of Ukraine 2020 Statistical Publication. Edited by Iryna Petrenko. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv 2021. P. 114.
20. Transport of Ukraine 2021 Statistical Publication. Edited by Iryna Petrenko. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv 2022. P. 112.
21. Transport of Ukraine 2022 Statistical Publication. Edited by Iryna Petrenko. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv 2023. P. 96.
22. Transport of Ukraine 2023 Statistical Publication. Edited by Iryna Petrenko. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv 2024. P. 92.
23. Transport of Ukraine 2024 Statistical Publication. Edited by Iryna Petrenko. State Statistics Service of Ukraine. Kyiv 2025. P. 92.
24. Statistical Yearbook of Ternopil Region for 2018. Edited by Andriy Chornyi. Main Department of Statistics in Ternopil Region. Ternopil, 2019. Pp. 272-277
25. Statistical Yearbook of Ternopil Region for 2019. Edited by Andriy Chornyi. Main Department of Statistics in Ternopil Region. Ternopil, 2020. Pp. 272-276
26. Statistical Yearbook of Ternopil Region for 2020. Edited by Andriy Chornyi. Main Department of Statistics in Ternopil Region. Ternopil, 2021. Pp. 261-265
27. Statistical Yearbook of Ternopil Region for 2021. Edited by Andriy Chornyi. Main Department of Statistics in Ternopil Region. Ternopil, 2022. Pp. 233-235
28. Statistical Yearbook of Ternopil Region for 2022. Edited by Andriy Chornyi. Main Department of Statistics in Ternopil Region. Ternopil, 2023. Pp. 208-210
29. Statistical Yearbook of Ternopil Region for 2023. Edited by Andriy Chornyi. Main Department of Statistics in Ternopil Region. Ternopil, 2024. Pp. 181-184
30. Main Department of Statistics in Ternopil Region (data for 2024) [Online resource]. – Access mode: https://www.te.ukrstat.gov.ua/statinfoTZ.html
31. Hevko, I. B., Hevko, B. R., Tson, O. P., Navrotska, T. D., & Pientak, M. D. (2025). Dynamics of structural changes in the vehicle fleet by specific types in the Ternopil region. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies for the Development and Efficient Operation of Road Transport»* (November 19-21, 2025). Kropyvnytskyi: Central Ukrainian National Technical University. 2025. Pp. 7-8.

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Mariia Pientak, Volodymyr Teslia,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Bohdan Hevko,** PhD econ. sci., **Roman Khoroshun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetyana Navrotskaya,** PhD tech. sci.
Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine
Igor Hevko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Berezhany Professional College of the National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Berezhany, Ukraine

Analysis and Development Outlook for Road Transportation Services in Ternopil Region

The article is devoted to a comprehensive analysis and determination of the development prospects for road transport in Ukraine, specifically focusing on the Ternopil region. The study covers the period from 2018 to 2025 and is based on a systematic analysis of open statistical data, which allows for the identification of key patterns in the transformation of freight and passenger turnover under dynamic economic and socio-political shifts. Special attention is paid to the structural aspects of fleet renewal, including the registration of passenger and freight vehicles, the development of the Battery Electric Vehicle (BEV) segment, and the impact of regional infrastructure on transport efficiency.

At the current stage of development, the road transport sector exhibits high dynamism and flexibility, driven by the need to optimize logistic processes across various economic sectors and the adaptation of enterprises to crisis phenomena, particularly the full-scale military invasion. Road transport serves as a core element of the logistics system, ensuring mobility and continuity of operations even under challenging conditions. In Ukraine, road transport dominates the freight structure, accounting for over 75% of total freight volume. This trend is corroborated by statistical data for 2023–2024, when freight transportation across all modes increased by 108 million tons, of which road transport accounted for 84 million tons. Analysis of road freight turnover as a percentage of total freight turnover indicates an increase in share from 26% in 2022 to 30.9% in 2023, which is significantly higher than pre-war levels.

Passenger transportation also demonstrates a steady positive dynamic: the share of road transport in total passenger turnover rose from 39% to 41% during 2023–2024. As of October 1, 2025, passenger transportation across all modes totaled 1,634.9 million passengers, with 692.7 million (42%) carried by road (buses). These figures underscore the vital role of road transport in ensuring population mobility and the stability of economic processes.

The study highlights specific features of the Ternopil region, which, despite its distance from the active front line, shows a high level of adaptation within the transport sector. In 2022, an anomalous surge in passenger and freight vehicle registrations was observed: the number of new buses increased 2.3 times compared to 2021 (from 50 to 117 units), while freight vehicle registrations rose by 37% (from 1,124 to 1,541 units). This phenomenon is explained by both demographic factors related to the influx of internally displaced persons (IDPs) and the shift of logistical centers of gravity toward the western region of the country.

The development of the electric vehicle segment is particularly noted, characterized by stable exponential growth at both the national and regional levels. In the Ternopil region, the number of electric vehicles increased from 168 units in 2019 to a projected 2,256 units in 2025. Such progress reflects the global trend toward fleet greening and the digitalization of the transport industry. The primary drivers for EV adoption include operational economic efficiency, ease of maintenance, state support through tax incentives, and stimulating mechanisms for the rapid development of charging station infrastructure. By the end of 2025, 169 EV charging stations were operational in the Ternopil region, necessitating further expansion to ensure the seamless operation of electric transport.

Statistical analysis of capital investment in road freight transport shows a continuous increase since 2020, with the most significant jump recorded in 2023 (a 1.86-fold increase). This confirms the importance of road transport for the country's economic stability and logistical efficiency following the start of the full-scale invasion. The passenger segment showed relative stability, while the significant decrease in investment in 2022 is attributed to crisis circumstances that affected transportation dynamics and fleet renewal.

The study outlines key challenges and prospects for the development of the regional road transport system. In particular, it is necessary to increase vehicle utilization efficiency through technological modernization, the implementation of digital transport management systems, route optimization, and the integration of electric vehicles into the general fleet. A crucial direction is the development of maintenance infrastructure, including a network of filling stations, repair, and service centers, ensuring the logistical resilience of the region.

Analysis of regional characteristics shows that the Ternopil region plays a strategic role in the logistics processes of Western Ukraine, serving as a transit hub for both intra-regional and international transport. The positive dynamics of vehicle registrations in 2022–2023, particularly in the freight and passenger segments, demonstrate the region's adaptive capacity to changes in transport demand and the optimization of supply chains.

The research results indicate that road transport maintains a dominant role in Ukraine's transport structure, providing over 75% of freight flow and 42% of passenger turnover, while the electric transport segment shows the most resilient positive dynamic in terms of innovation and environmental sustainability. The need for a comprehensive approach to modernizing the road transport system is emphasized, including infrastructure development, technological fleet renewal, the implementation of digital solutions, and the promotion of greening through electric vehicles and alternative energy sources.

The scientific novelty of the article lies in the systematic analysis of regional and national road transport indicators within the context of economic and socio-political challenges, particularly martial law, as well as the identification of specific trends in the development of the electric vehicle segment. The practical significance of the study lies in the possibility of using the results for planning and optimizing the activities of road transport enterprises, developing logistical infrastructure, and forming effective state transport policies that contribute to the economic resilience and mobility of the region.

road transport, passenger turnover, freight turnover, logistic infrastructure, vehicle registration

Одержано (Received) 20.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 25.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 29.03.2026

УДК 656.1 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).353-361

Н. Л. Костьян, доц., канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: n.kostian@chdtu.edu.ua

Методологія адаптивного розвитку морфологічної моделі міської транспортної системи для динамічного синтезу проєктних рішень

Представлено методологію розвинення морфологічної моделі міської транспортної системи шляхом інтеграції моделей дотичних систем. Механізми адаптації композитної моделі реалізуються засобами крос-консистентних матриць та динамічного поліморфізму функцій об'єктів системи, що узгоджують морфологічні структури взаємодіючих систем через дотичні атрибути. Представлено залежності між атрибутами транспортної та зарядної систем. Розвинена морфологічна структура є моделлю відкритого типу та може бути розширена на основі адекватних імітаційних моделей.
міська транспортна система, морфологічна модель, адаптивний розвиток, динамічний синтез

Постановка проблеми. Багато ключових глобальних проблем сталого розвитку тісно пов'язані між собою, таких як забруднення повітря, зміна клімату, дефіцит ресурсів. Ці проблеми є результатом злиття та взаємодії численних, взаємопідсилювальних соціальних подій та екологічних процесів у різних масштабах. За даними Європейської комісії, транспортний сектор є відповідальним за близько чверті викидів парникових газів у ЄС [1], що актуалізує проблему комплексного оцінювання та управління ефективністю транспортних систем на мікро-, макро- та метарівнях. Сучасні тенденції розвитку транспортних систем характеризуються зростанням рівня автомобілізації, відмовою від експлуатації транспортних засобів з традиційними енергетичними установками та переходом на альтернативні джерела енергії, впровадженням інтелектуальних систем управління.

Специфіка функціонування транспортних систем в Україні обумовлена низкою особливостей. В Україні відбувається поступове, проте стале зростання віку автопарку. Станом на кінець 2025 року середній вік легкових автомобілів на ринку України складав 16,4 року. Цей показник суттєво вищий за середній вік легкових автомобілів в країнах ЄС (близько 12 років). Середній вік вантажних автомобілів в Україні складає 18 років, автобусів – понад 20 років [2]. Середній вік автомобілів різниться не лише залежно від категорії транспортних засобів, а і від типу енергетичної установки: бензинова – 14,3 року; дизельна – 14,8 року; газобалонна – 18,3 року; електрична – 4,7 року; гібридна – 5,8 року [3]. Оскільки в регіональних транспортних системах розвиток електромобільності обмежується дефіцитом електроенергії в умовах блекаутів, експлуатація застарілого автопарку з традиційними енергетичними установками призводить до підвищеного споживання палива та значних викидів забруднювальних речовин. За цих умов традиційні статичні моделі оцінювання транспортних систем виявляються неефективними, оскільки не здатні враховувати широку варіативність транспортних засобів, стан дорожнього покриття та інші параметри, що постійно змінюються в часі. Крім того, різні категорії транспортних засобів залежно від типу енергетичних установок потребують спеціалізованої інфраструктури та сервісу. За обмежень енергетичних ресурсів та необхідності забезпечення сталого розвитку

© Н. Л. Костьян, 2026

транспортного сектору актуалізується потреба у розробці адаптивних моделей для оцінювання ефективності функціональних елементів транспортних систем, здатних враховувати динамічну зміну параметрів системи та інтегруватися в інтелектуальні системи управління міським транспортом. В наукових дослідженнях представлено низку варіантів морфологічних структур транспортних систем, тому виникає нова наукова проблема узгодження їх з моделями дотичних систем та адаптивного розвитку в заданих умовах міської мобільності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Морфологічний аналіз дозволяє будувати моделі міської транспортної системи як ієрархічну структуру, де кожен рівень (макро-, мікро-, мета-) має свої закономірності формування [4]. Конфігурації транспортної системи визначають енергетичні потреби, екологічність та безпеку функціонування елементів системи [5]. Сучасні дослідження розширюють морфологічний аналіз, включаючи в морфологічну структуру, крім технічних об'єктів, нематеріальні аспекти: інформаційні, енергетичні потоки, сервісні мережі та інші. Багато досліджень присвячено морфологічному моделюванню інших підсистем міської системи, ефективність яких впливає на ефективність елементів транспортної системи. Зокрема, автори [6] визначили морфологічну структуру системи зарядних станцій для електромобілів. В роботі [7] зарядна інфраструктура представлена окремим функціональним елементом в морфологічній моделі режимів роботи електромобілів. Автори [8] розробили морфологічну матрицю системи автосервісу. Дослідження [9] присвячено побудові морфологічної моделі для підвищення паливної економічності транспортних засобів категорії N3 у взаємодії з інфраструктурою. Зазначені морфологічні моделі відповідають системам закритого типу, а визначені показники ефективності оцінюють відповідні системи в цілому, не характеризуючи їх складові, або обмежені ефективністю транспортних засобів одного типу. Отримані на основі цих моделей результати також не дозволяють оцінити вплив дотичних систем на транспортну систему міст. Авторами [10] запропоновано підхід на основі моделювання гібридної урбаністичної системи, що містить 7 підсистем, пов'язаних спільним інтерфейсом. В цій роботі також наведено 11 груп ключових показників ефективності такої системи та критерії їх моніторингу. Робота має концептуальний характер без детального проєктування.

Аналіз останніх досліджень показав, що незважаючи на значну кількість досліджень щодо морфологічного моделювання урбаністичних систем отримані моделі задають сталу множину конфігурацій таких систем. Не визначеним в повній мірі залишається механізм трансформації моделі транспортної системи під впливом дотичних до неї систем.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є визначення механізму та засобів адаптації морфологічної структури транспортної системи під динамічні зміни її функціонування для подальшої інтеграції в інтелектуальні системи. Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:

– формулювання концепції розвитку морфологічної структури міської транспортної системи через інтеграцію моделей дотичних систем;

– визначення принципу динамічного поліморфізму оцінювання ефективності функціональних елементів системи;

– застосування імітаційного моделювання для розширення множини та доменів параметрів впливу на ефективність системи.

Виклад основного матеріалу. Морфологічна модель транспортної системи не є статичною, а її конфігурації (стани) набувають постійної трансформації. Множину можливих проєктних рішень системи доцільно розширити через динамічний синтез додаткових конфігурацій, структура яких відрізняється від базових. В широкому

розумінні динамічний синтез системи базується на функціональних та морфологічних моделях, які відтворюють зміни системи в довільні моменти часу. В межах даного дослідження під динамічним синтезом транспортної системи будемо розуміти процес морфологічного моделювання системи, що еволюціонує у часі під дією зовнішніх або внутрішніх сил. Тобто, конфігурації композитної системи, що утворюється шляхом приєднання до транспортної системи інших міських систем, можуть відрізнятись не лише значеннями морфологічних ознак, а і самою структурою, яка трансформується залежно від заданих умов та цілей.

Прикладом композитної системи може виступати поєднання «Транспортна система – Зарядна інфраструктура (система зарядних станцій)». Морфологічні ознаки системи зарядних станцій охоплюють фізичні пристрої, енергетичні мережі та цифрові платформи. Технічна морфологія зарядної інфраструктури базується на рівнях потужності та типах струму. Різні режими заряджання корелюють з часовими характеристиками перебування транспортного засобу на сегменті транспортної системи. Окрім технічних характеристик, морфологія зарядної інфраструктури включає операційні та бізнес-параметри: напрямок енергетичного потоку, методи автентифікації, джерела живлення, стратегії ціноутворення та інші. Зазначені ознаки визначають життєздатність інфраструктури в ринкових умовах. Інтеграція двох морфологічних моделей (транспортної та зарядної) вимагає створення методологічної основи, яка б дозволила переносити обмеження та можливості однієї системи на іншу. Найбільш ефективним способом такого з'єднання є використання морфологічних матриць. В даному контексті цей методологічний підхід містить наступні кроки:

1. Ідентифікація спільних ключових змінних, які існують в обох моделях або мають безпосередній причинно-наслідковий зв'язок. Так у транспортній моделі це характеристика вузла (наприклад, 8 годин на робочому місці, 2 години у торговому центрі). У моделі зарядної інфраструктури цей параметр визначає максимально допустиму потужність пристрою для повного заряджання батареї. Тип сегменту, або тип локації, диктує обмеження на електричну потужність та доступну площу для зарядної станції. Параметри функціонального елементу «Транспортний потік» визначають кількість необхідних зарядних точок та ймовірність черг. Цей зв'язок моделюється через багатоканальну систему масового обслуговування. Такий підхід дозволяє врахувати і зворотний зв'язок: встановлення потужної станції може змінити транспортну морфологію міста, притягуючи нові транспортні потоки. Таблиця 1 ілюструє приклад залежності ефективності обох систем від варіантів реалізації атрибутів транспортної системи.

Таблиця 1 – Вплив атрибутів ФЕ «Дорога» [4] на параметри дотичних систем (транспортної та зарядної) в композитній системі на заданому сегменті транспортної мережі

Варіант реалізації атрибутів ФЕ «Дорога»	Вплив на ефективність ФЕ «Транспортний засіб» у складі транспортній системі	Вплив на систему зарядних станцій
Високий ступінь дорожнього опору, $f + i$	Підвищене споживання енергії	Необхідність у більш щільній мережі станцій
Високий рівень кривизни дороги	Зниження швидкості, рекуперація енергії	Зміна прогнозованого запасу ходу та точок зарядки

Джерело: розроблено автором

Окрім якісного морфологічного аналізу, існують методи математичного поєднання моделей через аналіз даних. Один із таких підходів полягає у використанні

архітектури типу GeoAdvAE, які дозволяють інтегрувати різнорідні морфологічні дані у спільний латентний простір [11]. Теорія систем масового обслуговування та імітаційне моделювання також може застосовуватись в якості інструменту для виявлення аналітичних залежностей між параметрами, що об'єднано у складні композитні системи за заданих морфологічних обмежень. Так в ході комп'ютерної імітації роботи заданої зарядної станції для електромобілів в м. Черкаси на рівні управління зарядною інфраструктурою було виявлено залежність її ефективності від атрибуту «Інтенсивність руху» ФЕ «Транспортний потік». При цьому, було досліджено загальний транспортний потік через прилеглий сегмент транспортної системи в центральній частині міста (по вул. Благовісна, від вул. Смілянська до вул. Дашкевича). Імітацію проведено в програмному середовищі, розробленому в Microsoft Visual C++. Регресійна залежність сумарних втрат на рівні управління зарядною інфраструктурою від інтенсивності руху складного транспортного потоку апроксимується поліномом 4-го порядку з коефіцієнтом детермінації R^2=0.98:

$$Los = 8\times10^{-9} I_{tr}^{\ 4} - 0{,}00002 I_{tr}^{\ 3} + 0{,}0207 I_{tr}^{\ 2} - 8{,}8078 I_{tr} + 1516{,}3\,, \tag{1}$$

де Los – сумарні втрати бізнесу та клієнтів при функціонуванні зарядної станції за оптимальних режимів роботи (без врахування параметрів транспортної системи), I_{tr} – інтенсивність руху загального транспортного потоку через прилеглу до станції територію.

На основі функції сумарних втрат (1) було визначено двоїсту до неї функцію ефективності зарядної інфраструктури E_f з приведенням області її визначення до інтервалу [0,1]:

$$E_f = 1 - \frac{Los - Los_{\min}}{Los_{\max} - Los_{\min}}\,. \tag{2}$$

Функція ефективності також добре апроксимується поліномом 4-го порядку:

$$E_f = -3\times10^{-10} I_{tr}^{\ 4} + 9\times10^{-7} I_{tr}^{\ 3} - 0{,}0009 I_{tr}^{\ 2} + 0{,}3791 I_{tr} - 58{,}257\,. \tag{3}$$

Морфологічний аналіз дозволяє ідентифікувати суттєві атрибути та критерії ефективності композитної системи та вбудувати їх у гнучкі сценарії транспортного планування міст.

2. Побудова композитної морфологічної матриці (крос-консистентний аналіз). Після ідентифікації параметрів будується крос-консистентна матриця, в якій стовпці відповідають параметрам транспортної системи, а рядки параметрам зарядної інфраструктури. В комірки матриці заноситься оцінка сумісності відповідних параметрів, яка визначає емпіричну ймовірність та нормативні обмеження. Тобто, значення в комірці відображає ступінь консистентності параметрів. Наприклад, пара з параметрів двох вихідних морфологічних моделей («Швидкісна магістраль», «Зарядка електромобіля рівня 1 (Level 1 AC)») отримує оцінку 0 (повна невідповідність), а пара («Житлова зона», «Level 2 V2G») має високий бал за синергію.

3. Редукція множини синтезованих рішень. Для завершення процесу з'єднання моделей необхідно перейти від аналізу окремих параметрів до синтезу конфігурацій моделі композитної системи. Це реалізується через побудову зведеної морфологічної матриці. Поєднання двох моделей може дати значну кількість теоретичних комбінацій. Аналіз крос-консистентної матриці, отриманої на попередньому кроці, дозволяє відсіяти нежиттєздатні варіанти.

Сформовану композитну матрицю зручно застосовувати за невеликої кількості дотичних систем (2 або 3). На практиці їх може виявитись більше [10]. Для різних елементів композитної системи застосовані окремі показники ефективності, алгоритм розрахунку яких різниться залежно до конфігурації системи. Морфологічну структуру системи (ФЕ, атрибути, їхні варіанти реалізації) доречно зберігати у вигляді об'єктної моделі з перевіркою на повноту, цілісність та надлишковість даних. Вибір суттєвих атрибутів та синтез раціональних конфігурацій композитної системи залежить від визначених критеріїв ефективності. Алгоритми оцінювання ефективності системи та її компонентів буде автоматично визначено на основі ключів (дотичних атрибутів) систем на основі динамічного поліморфізму, що реалізується в об'єктно-орієнтованій парадигмі. Так при приєднанні до поточної конфігурації транспортної системи атрибутів моделі зарядної інфраструктури через ключ «Тип енергетичної установки» в значенні «Електрична» метод відповідного класу реалізує функцію оцінювання енергоефективності електромобілів. За потреби може бути задано складений ключ (наприклад, Тип енергетичної установки−Категорія−Вік транспортного засобу).

На попередніх етапах множина атрибутів композитної систем може мати велику потужність. Після усунення залежних атрибутів морфологічну структуру пропонується розширити за рахунок атрибутів, які не було визначено на ранніх стадіях аналізу, але можуть виявитись параметрами впливу при врахуванні додаткових умов. Виникає необхідність розширити морфологічну структуру системи. Для перевірки цієї гіпотези було побудовано транспортні моделі двох вузлів транспортної мережі м. Черкаси із використанням PTV Vissim. Зазначені вузли мають обмеження щодо зміни конфігурацій системи через особливості геометрії (різниця рівнів ландшафту в місті локації, велика кривизна дороги, ухил, багаторівнева розв'язка), розташування додаткових об'єктів (залізнична колія, стадіон, теплотраса, місця для паркування, промислові об'єкти, автозаправна станція) та високий рівень складності транспортного потоку. Підвищення ефективності транспортної системи в заданих вузлах досягається коригуванням керуючих елементів. Для вузла (рис. 1) визначено два варіанти альтернативних транспортних моделей.

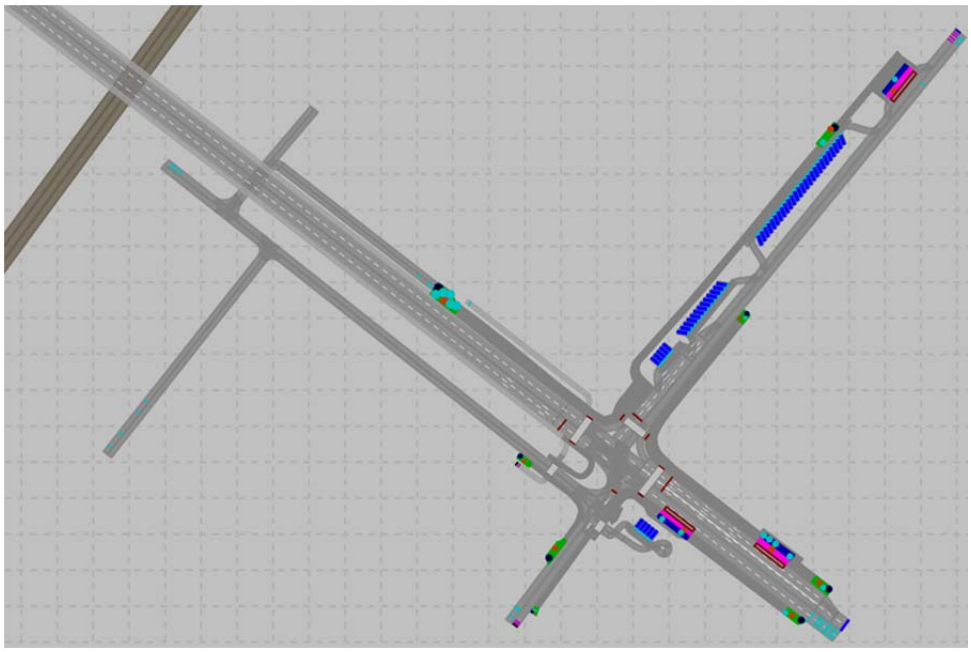


Рисунок 1 – Транспортна модель перехрестя пр. Хіміків – вул. М. Залізняка, м. Черкаси
Джерело: розроблено автором

Перший варіант реалізовано шляхом збільшення циклових параметрів та додаткових секцій світлосигнальних пристроїв по пр. Хіміків. Другий варіант представляє модель перехрестя з відокремленими світлофорними фазами для лівих смуг за незмінного циклу програми світлосигнальних пристроїв. Крім того, було виконано перерозподіл напрямків руху за окремими смугами. Результати аналізу отриманих моделей наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння імітаційних моделей вузла: пр. Хіміків – вул. М. Залізняка, м. Черкаси

Параметри транспортних моделей	Значення параметрів		
	Вихідна модель	І варіант вдосконаленої моделі	ІІ варіант вдосконаленої моделі
Середній час затримки, сек. імітації	26,1	28,59	20,88
Середня швидкість	21,44	20,99	22,57
Середній час затримки стоячи, сек. імітації	16,33	18,38	12,32
Загальний час затримки, сек. імітації	9701,52	10463,56	7643,28
Загальний час в дорозі, сек. імітації	39267,3	40062,2	37218,5
Загальний час затримки стоячи, сек. імітації	5978,46	6728,37	4507,92
Зупинок всього	319	359	251
Загальна кількість ТЗ в мережі наприкінці імітації	91	88	87

Джерело: розроблено автором

Другий варіант транспортної моделі виявився оптимальним за однакових варіантів реалізації інших ФЕ транспортної системи на заданому вузлу.

Другий змоделюваний вузол містив кілька перехресть (рис. 2).

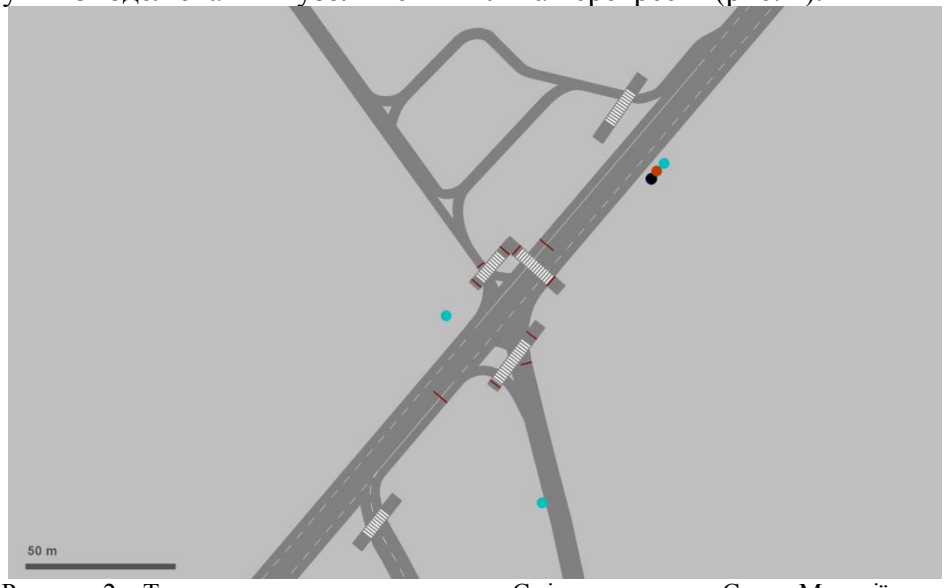


Рисунок 2 – Транспортна модель вузла: вул. Смілянська – вул. Свято-Макаріївська а вул. Смілянська – вул. В. Ложешнікова, м. Черкаси

Джерело: розроблено автором

Транспортний потік через зазначений вузол характеризується високим рівнем конгестії протягом доби, окрім нічних годин. Модель має велику кількість конфліктних точок. Через вузол проходить 20 маршрутів міських автобусів. Вдосконалена транспортна модель відрізняється додатковими напрямками руху, зміною розташування світлосигнальних пристроїв та їх програмами. При цьому швидкість проходження даного сегмента транспортної мережі міста зросла на 20%, а середній час затримки в дорозі скоротився на чверть. Результати аналізу побудованих моделей зазначеного вузла представлено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняння імітаційних моделей вузла: вул. Смілянська – вул. Свято-Макаріївська та вул. Смілянська – вул. В. Ложешнікова, м. Черкаси

Параметри транспортних моделей	Значення параметрів	
	Вихідна модель	Вдосконалена модель
Середній час затримки, сек. імітації	63,32	45,80
Середня швидкість	22,41	26,77
Середній час затримки стоячи, сек. імітації	39,46	25,83
Загальний час затримки, сек. імітації	39320,10	28670,28
Загальний час в дорозі, сек. імітації	72398	62811,4
Загальний час затримки стоячи, сек. імітації	24505,35	16172,08
Зупинок всього	1615	1282
Загальна кількість ТЗ в мережі наприкінці імітації	167	136

Джерело: розроблено автором

Результати роботи імітаційних моделей підтвердили доцільність введення в морфологічну модель транспортної системи ФЕ «Засоби керування рухом», що характеризується наявністю засобів статичного (детектори транспорту, дорожня розмітка, знаки, освітлення, світлофорне регулювання із незмінними у добовому циклі параметрами) та адаптивного керування та їх варіантами реалізації на заданому сегменті системи.

Висновки. Спосіб інтеграції моделей дотичних до транспортної системи систем в межах області визначення їх морфологічних ознак полягає у створенні системи взаємозв’язків, що охоплює фізичні, технічні, енергетичні та цифрові аспекти міської мобільності. Ключовим методологічним інструментом є загальний морфологічний аналіз, який через крос-консистентні матриці дозволяє узгодити їх суттєві параметри та розвинути морфологічну модель транспортної системи залежно від реальних умов. Такий підхід дозволяє уникати малоефективних рішень, стимулюючи розробку інноваційних комбінацій, які можуть бути неочевидними при традиційному проектуванні. Для перевірки повноти множини атрибутів об’єднаної моделі ефективним є використання імітаційних моделей, для яких задано параметри, що узгоджено з морфологічною структурою композитної транспортної системи. Додаткові атрибути функціонального елемента «Засоби керування рухом» суттєво впливають на значення ключових показників ефективності. При раціональному налаштуванні параметрів засобів статичного керування рухом спостерігається покращення ключових показників, що впливають на енергоефективність та екологічність транспорту. Функція оцінювання показників ефективності залежить від атрибутів-ключів зв’язку між морфологічними моделями підсистем та реалізується через динамічний поліморфізм об’єктів композитної системи. Запропонований адаптивний підхід перетворює

морфологічну модель на потужний інструмент динамічної підтримки прийняття рішень для міських планувальників.

Список літератури

1. Fatorachian H., Kazemi H., Pawar K. Digital transformation forsustainable transportation: leveraging Industry 4.0 technologies to optimize efficiency and reduce emissions. *Future Transportation*. 2025. Vol. 5, № 2. 34. DOI: 10.3390/futuretransp5020034.
2. Середній вік легкових авто в Україні: жовтень 2025 року. Інститут досліджень авторинку : веб-сайт. URL: https://eauto.org.ua (дата звернення: 30.01.2026).
3. The Ukrainian car fleet is aging: where the youngest and oldest cars will be sold in 2025 / Visit Ukraine. URL: https://visitukraine.today/uk/blog/7503/the-ukrainian-car-fleet-is-aging-where-the-youngest-and-oldest-cars-will-be-sold-in-2025 (дата звернення: 30.01.2026).
4. Mateichyk V., Kostian N., Smieszek M., Mosciszewski J., Tarandushka L. Evaluating vehicle energy efficiency in urban transport systems based on fuzzy logic models. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 2. 734. DOI: 10.3390/en16020734.
5. Mateichyk V., Smieszek M., Kostian N. Evaluation of transport system configuration by efficiency indicators. *Transport technologies*. 2022. Vol. 3, № 2. P. 52–62. DOI: 10.23939/tt2022.02.052.
6. Grascht R., Mateichyk P. V. Complex methodology of managing the development of the charging station network. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 3(90). С. 324–330. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.3.40.
7. Li S., Chen X., Song Z. Morphological Analysis on Electric Vehicles' Operating Model: Cases of Beijing Taxi Area. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research.* 2021. Vol. 610. P. 309–314. DOI: 10.2991/assehr.k.211215.057.
8. Tarandushka L., Mateichyk V., Kostian N., Tarandushka I., Rud M. Assessing the quality level of technological processes at car service enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, № 3 (104). P. 58–75. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200332.
9. Грицук І. В., Волков В. П., Маяк М. М., Український Є. О., Володарець М. В. , Волкова Т. В., Рижова В. Ю. Формування методу забезпечення нормування показників і керування паливною економічністю транспортного засобу у змінних умовах експлуатації. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. № 18, т. 1. С. 56–65. DOI: 10.36910/automash.v1i18.760.
10. Gabbar H. A. Modeling of interconnected infrastructures with unified interface design toward smart cities. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 15. 4572. DOI: 10.3390/en14154572.
11. Du J. T., Lin K. Z. Integrating morphology and gene expression of neural cells in unpaired single-cell data using GeoAdvAE. bioRxiv. 2025. 11(19). 689368. https://doi.org/10.1101/2025.11.19.689368.

References

1. Fatorachian, H., Kazemi, H., & Pawar, K. (2025). Digital transformation for sustainable transportation: Leveraging Industry 4.0 technologies to optimize efficiency and reduce emissions. *Future Transportation*, 5(2), Article 34. https://doi.org/10.3390/futuretransp5020034.
2. Institute of Automotive Market Research. (2026, January 30). Serednii vik lehkovykh avto v Ukraini: zhovten 2025 roku [Average age of passenger cars in Ukraine: October 2025]. https://eauto.org.ua.
3. Visit Ukraine. (2026, January 30). The Ukrainian car fleet is aging: Where the youngest and oldest cars will be sold in 2025. https://visitukraine.today/uk/blog/7503/the-ukrainian-car-fleet-is-aging-where-the-youngest-and-oldest-cars-will-be-sold-in-2025.
4. Mateichyk, V., Kostian, N., Smieszek, M., Mosciszewski, J., & Tarandushka, L. (2023). Evaluating vehicle energy efficiency in urban transport systems based on fuzzy logic models. *Energies*, 16(2), Article 734. https://doi.org/10.3390/en16020734.
5. Mateichyk, V., Smieszek, M., & Kostian, N. (2022). Evaluation of transport system configuration by efficiency indicators. *Transport Technologies*, 3(2), 52–62. https://doi.org/10.23939/tt2022.02.052.
6. Grascht, R., & Mateichyk, P. V. (2024). Complex methodology of managing the development of the charging station network. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 3(90), 324–330. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.40.
7. Li, S., Chen, X., & Song, Z. (2021) Morphological analysis on electric vehicles' operating model: Cases of Beijing taxi area. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, Vol. 610, 309–314. Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/assehr.k.211215.057.

8. Tarandushka, L., Mateichyk, V., Kostian, N., Tarandushka, I., & Rud, M. (2020). Assessing the quality level of technological processes at car service enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3), 58–75. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200332.
9. Gritsuk, I, Volkov, V, Majak, M., Ukrainskyi, Ye., Volodarets, M., Volkova, T., & Ryzhova, V. (2022). Formation of the Method of ensuring the Rating of indicators and management of the Fuel economy of the Vehicle in variable operating conditions. *Advances in mechanical engineering and transport*, 1(18), 56–65 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.36910/automash.v1i18.760.
10. Gabbar, H. A. (2021). Modeling of interconnected infrastructures with unified interface design toward smart cities. *Energies*, 14(15), Article 4572. https://doi.org/10.3390/en14154572.
11. Du, J. T., & Lin, K. Z. (2025). Integrating morphology and gene expression of neural cells in unpaired single-cell data using GeoAdvAE. *bioRxiv*, 11(19), Article 689368. https://doi.org/10.1101/2025.11.19.689368.

Nataliia Kostian, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Methodology of Adaptive Development of Morphological Model of Urban Transport System for Dynamic Synthesis of deSign Solutions

The aim of the research is to scientifically substantiate and determine the mechanism for adapting the morphological structure of the urban transport system to dynamic changes in its functioning. The work is aimed at developing a methodological basis for integrating transport network models with related urban systems within a single intelligent management environment. The main focus is on ensuring the possibility of dynamic synthesis of design solutions that take into account the variability of vehicles and environmental parameters.

The work develops a concept for the development of a morphological model of a transport system through the use of cross-consistent matrices and dynamic polymorphism of object functions. which allows to coordinate complex composite systems through common tangent attributes. An approach to assessing the effectiveness of functional elements is proposed, which provides the possibility of using several alternative algorithms for assessing and taking into account different configurations of a composite system. As an example, the interaction of the transport network and the charging infrastructure for electric vehicles is considered, analytical dependencies between the intensity of traffic flow and the efficiency of the charging infrastructure are identified. To expand the set of influence parameters, simulation modelling was carried out in the PTV Vissim 2026 environment. The methodology was tested on complex nodes of the transport network of the city of Cherkasy. The complexity of the nodes is determined by spatial and other configurational constraints. This makes it impossible to go beyond the area of definition of the accepted morphological features of the transport system in difficult conditions of lack of financial and energy resources. There is a need to expand the morphological structure of the system. Within the framework of a computer experiment, alternative options for organizing traffic were simulated using additional traffic light sections and redistribution of regulation phases. The simulation results allowed us to identify optimal system configurations and confirmed the feasibility of introducing new attributes into the morphological structure, such as statistical and dynamic traffic control tools.

The results of the work prove that the use of extended morphological analysis provides high accuracy of matching parameters of tangential systems, allowing to avoid inefficient solutions. It is established that the implementation of improved models in the nodal sections of the network allows to reduce the average delay time on the road by a quarter. The proposed adaptive approach turns the morphological model into a powerful decision-making support tool for urban planning. The created model is open and suitable for further integration into intelligent transport systems.

urban transport system, morphological model, adaptive development, dynamic synthesis

Одержано (Received) 27.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 656.13.073:658.21 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).362-374

О.С. Хачатурян, канд. екон. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: elenarice1210@gmail.com

Методологічні аспекти моделювання та оцінювання регіональних вантажопотоків у термінальних системах

У статті розглянуто актуальну науково-практичну проблему визначення потреб регіону в термінальних міжміських перевезеннях вантажів автомобільним транспортом. Сучасний стан галузі характеризується зростанням дрібних партій відправок та ускладненням логістичних ланцюгів, що робить традиційні методи організації перевезень малоефективними. Автор обґрунтовує, що впровадження термінальних систем є ключовим напрямом підвищення якості транспортно-експедиційного обслуговування та раціонального використання рухомого складу.

Основну увагу в роботі приділено методиці комплексного обстеження вантажопотоків, яка є передумовою для проєктування параметрів термінальної мережі. Пропонований підхід передбачає суцільне обстеження підприємств регіону незалежно від виду транспорту, яким вони користуються. У межах дослідження виокремлено етапи аналізу: від виявлення обсягів і періодичності вантажів до побудови матриць вантажопотоків і розрахунку необхідних ресурсів – складських площ, підйомно-транспортних механізмів та кількості автопоїздів.

Особливе місце в статті займає імітаційне моделювання процесу надходження відправок на термінал. Автор доводить, що через значні коливання частоти відправлень (від щоденних до щоквартальних) реальні розподіли вантажопотоків не відповідають класичним законам (нормальному, показовому чи Пуассона). Це підтверджує необхідність індивідуального моделювання для кожного конкретного об’єкта логістичної інфраструктури.

Також у роботі представлено топологічну модель регіону, де територія розглядається як сукупність правильних шестикутників (районів). Такий підхід дозволяє розрахувати середні відстані підвезення-розвезення вантажів та побудувати залежність обсягів перевезень від відстані навіть за умови відсутності повної статистичної інформації. Практична значущість дослідження полягає у можливості обґрунтувати економічну доцільність функціонування терміналів з точки зору мінімізації експлуатаційних витрат та забезпечення принципу доставки «точно в термін».

термінальні перевезення, **міжміські вантажопотоки**, **логістична інфраструктура**, **імітаційне моделювання**, **топологічна модель регіону** , **закон розподілу відправок** , **ефективність логістики**

Постановка проблеми. Сучасний стан міжміських автомобільних перевезень вантажів характеризується зростанням номенклатури та дрібності відправок, ускладненням логістичних зв’язків між підприємствами та підвищеними вимогами до якості транспортно-експедиційного обслуговування. За цих умов традиційна організація перевезень не забезпечує належної ефективності, своєчасності доставки та раціонального використання рухомого складу і складської інфраструктури. Особливо актуальною є проблема перевезення дрібних партій вантажів і кооперованих поставок промислових підприємств, які потребують пріоритетного та впорядкованого обслуговування.

Одним із перспективних напрямів розв’язання зазначених проблем є формування та розвиток системи термінальних перевезень у міжміському сполученні. Однак проєктування, впровадження та ефективне функціонування такої системи неможливе без ґрунтовного вивчення вантажопотоків регіону. Відсутність повної та систематизованої інформації про обсяги, структуру, напрямки та регулярність

© О. С. Хачатурян, 2026

міжміських вантажних перевезень, а також про потреби підприємств незалежно від виду транспорту, яким вони користуються, ускладнює обґрунтування параметрів термінальної мережі.

Таким чином, постає науково-практична проблема визначення реальних потреб регіону в термінальних міжміських перевезеннях за видами вантажів, а також обґрунтування необхідних ресурсів термінальної системи – складських площ, підйомно-транспортних механізмів і рухомого складу. Розв'язання цієї проблеми на основі комплексного обстеження вантажопотоків є необхідною передумовою підвищення ефективності організації міжміських автомобільних перевезень та вдосконалення транспортно-експедиційного обслуговування підприємств і організацій регіону.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження в галузі організації вантажних перевезень та логістичних систем зосереджують увагу на розробці методичних підходів і моделей, що забезпечують більш точне вивчення вантажопотоків та визначення потреб у транспортно-логістичних інфраструктурах, зокрема термінальних системах. Це створює наукову основу для реалізації методів, запропонованих у досліджуваній роботі, які дозволяють визначити потреби регіону в термінальних перевезеннях вантажів, у розрізі видів вантажів та необхідних ресурсів для функціонування термінальної мережі.

Українські науковці останніми роками активно розглядають питання логістичної інфраструктури та ефективності функціонування транспортних систем. Зокрема, у роботах С.В. Цимбала і Р.В. Мельника [1] висвітлено логістику терміналів як перспективний напрям розвитку транспортно-логістичних систем України, що узагальнює теоретичні підходи до організації та оптимізації процесів перевалки і обробки вантажів на терміналах, включно з параметрами їх просторового розміщення і функціонування.

А.М. Пасічник [2] пропонує алгоритм побудови та оптимізації регіональної мережі транспортно-логістичних комплексів, що безпосередньо пов'язано з питаннями проектування термінальної системи та визначення її параметрів на регіональному рівні. Такий алгоритмічний підхід дозволяє враховувати характеристики вантажопотоків під час формування ефективної мережі транспортних вузлів.

Інші дослідження торкаються загальних аспектів логістичного менеджменту та інфраструктури транспорту. Так, М.В. Харченко [3] аналізує транспортно-логістичну інфраструктуру та її роль у соціально-економічних системах підприємств в Україні, що має важливе значення при оцінці потреб регіону в складських приміщеннях та технічних засобах термінальної системи.

У контексті методологічних підходів до організації перевезень варто також відзначити праці з оптимізації логістичних процесів, які розширюють розуміння функціональних зв'язків між логістичними витратами, часом доставки та ефективністю використання рухомого складу, що опосередковано впливає на організацію міжміських вантажопотоків. Стан цих підходів висвітлюється в працях Е.Е. Савицького [4] та інших дослідників, котрі вказують на важливість інтегрованого погляду на логістичні процеси при формуванні стратегій розвитку транспортних систем.

Таким чином, існуючі вітчизняні наукові джерела створюють широке теоретико-методичне підґрунтя для дослідження вантажопотоків і проектування термінальних систем. Ці публікації підтверджують актуальність розробки методів, що дозволяють комплексно оцінювати потреби регіону у міжміських термінальних перевезеннях, включаючи аналіз видів вантажів, більших обсягів і необхідного технічного та складського забезпечення.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність розвитку термінальних систем у міжміському сполученні та складність прогнозування параметрів вантажопотоків у сучасних умовах, основним завданням даного дослідження є розробка та обґрунтування комплексного науково-методичного підходу до оцінювання потреб регіону у відповідній логістичній інфраструктурі.

Виклад основного матеріалу. Вивчення вантажопотоків у міжміських сполученнях проводиться для вдосконалення організації перевезень вантажів автомобільним транспортом загального користування, спрямованого на створення системи термінальних перевезень, що дозволяє значно покращити транспортно-експедиційне обслуговування підприємств та організацій, забезпечити перевезення дрібних партій вантажів та впорядкувати організацію міжміських перевезень, забезпечивши першочергове виконання кооперованих поставок промислових підприємств [5].

Мета вивчення вантажопотоків – визначити потреби обстежуваного регіону у термінальних перевезеннях вантажів у міжміському сполученні, у термінальних перевезеннях за видами вантажів, а також потреби термінальної системи у складських приміщеннях, підйомно-транспортних механізмах та рухомому складі, необхідних для виконання цих перевезень.

За результатами вивчення вантажопотоків виявляють усі дані, необхідні визначення основних параметрів термінальної системи регіону, щодо її проектування, впровадження та функціонування в оперативному регіоні.

При вивченні вантажопотоків регіону в міжміських внутрішньообласних перевезеннях проводиться суцільне обстеження всіх підприємств і організацій, що є в регіоні, незалежно від того, яким видом транспорту вони користуються задоволення своїх потреб у цих перевезеннях [6].

Терміни проведення обстеження та чисельність робочих груп визначаються виходячи з конкретних умов та затверджуються керівниками відповідних територіальних об'єднань автомобільного транспорту обстежуваного регіону.

Обстеження проводиться за методикою, в якій перші чотири таблиці складені таким чином, щоб відобразити кількісні та якісні характеристики з ввезення та вивезення вантажу на обстежуваному підприємстві, а саме:

– обсяги перевезень та кореспонденції щодо кожного найменування вантажу;
– структуру відправок за розміром;
– найменування, розмір і масу виробничої упаковки;
– необхідний тип рухомого складу;
– найменування пунктів кореспонденції вантажу та відстані перевезень;
– види транспорту, що використовуються.

На підставі наведених вище даних вибирають обсяги перевезень вантажів, які доцільно виконувати через термінали, у тому числі обсяги перевезень, які необхідно передати термінальній системі з інших видів транспорту, зокрема з залізниці, а також з відомчого автотранспорту. Складають матриці вантажопотоків, перевезень у регіоні через термінали. Узгоджують порядок виконання термінальних перевезень, складаючи часові графіки руху автопоїздів на постійних вантажопотоках. Розраховують потрібну кількість великовантажних автомобілів для міжтермінальних перевезень. Закріплюють клієнтуру за терміналами і для кожного з них визначають обсяг переробки вантажів.

Для кожного терміналу, виходячи з обсягів та структури переробки вантажів, визначають наявність та використання:

– складів у підприємств, закріплених за цим терміналом, та з урахуванням геометричних параметрів вантажів, періодичності їх надходження, необхідну для переробки даного обсягу вантажу площу складу терміналу, рівень механізації та необхідну кількість робітників;

– власного відомчого автотранспорту у закріплених за цим терміналом підприємств та потрібну кількість автомобілів для організації підвезення-розвезення вантажів на термінал;

– підйомно-транспортних механізмів у закріплених за цим терміналом підприємств та потреба у цих механізмах для забезпечення даного обсягу та структури перероблюваних вантажів на терміналі та для мобільного використання їх при організації вантажно-розвантажувальних робіт безпосередньо у клієнтури.

Методика аналізу містить такі етапи. На першому етапі проводиться виявлення обсягів і періодичності вантажів, що перевозяться, що приймаються до перевезення за термінальною технологією [7]. До перевезення за термінальною технологією приймають тарно-штучні вантажі, що допускають неодноразове навантаження.

На другому етапі аналізу проводиться заповнення форми [8]. Для цього використовують довідник тарифних відстаней та схему розміщення терміналів у регіоні. У кожну графу форми заносять дані щодо окремих кореспонденцій.

На третьому етапі визначають частотні розподіли відправок за масою вантажів, які ввозяться на термінали та вивозяться з них [7].

Істотне значення щодо термінальних систем перевезень вантажів має вигляд закону розподілу кількості відправок, що підвозяться щодня на термінал. Низка авторів [9-11], моделюючи роботу вантажної автостанції, користується для опису зазначеного розподілу нормальним або показовим законами. Однак нормальний закон розподілу справедливий за достатньо великої кількості відправників і досить частого надходження вантажів від них. Показовий закон досить точно описує розподіл відправок при малій кількості відправників та низькою частотою надходження вантажу від них. У низці випадків застосовується дискретний розподіл Пуассона.

Водночас у літературі відсутні досить точні визначення понять, а формулювання типу «досить велика» кількість відправників і «досить частого» надходження вантажів не дають можливості визначити кількісні межі застосування того чи іншого закону розподілу.

При аналізі та синтезі термінальних систем перевезень важливо знати вид та параметри відповідних законів розподілу сумарного вантажопотоку, що надходить на термінал залежно від добової потужності вантажопотоку від клієнтури та частоти відправлень вантажів від кожного відправника. Особливістю завдання є значне коливання можливого числа вантажів, що відправляються, і періодичності відправлень (від декількох відправлень на рік до щоденних). Ця обставина призводить до того, що у кожному конкретному випадку є різні параметри, а й різні закони розподілу шуканих випадкових величин. Для вивчення можливих варіантів аналізованої залежності необхідно виконати розрахунки ймовірностей. При цьому зробити такі припущення:

– розмір відправки, яка може бути доставлена на термінал, однакова для всіх відправників і дорівнює умовній одиниці;

– ймовірність підвезення відправки на термінал від відправників впродовж доби постійна і залежить лише від встановленої для даного відправника періодичності постачання *П*:

$$P=П/Д, \quad (1)$$

де *Д* – число робочих днів у році.

Моделювання можна провести за таким алгоритмом (рис. 1).

Крок 1. Встановлення числа відправників. Встановлюємо число відправників N.

Крок 2. Встановлення періодичності. Встановлюємо співвідношення груп клієнтів з тією чи іншою ймовірністю підвезення відправлення *P*:

$$\sum_{j=1}^{n} a_j = 1. \quad (2)$$

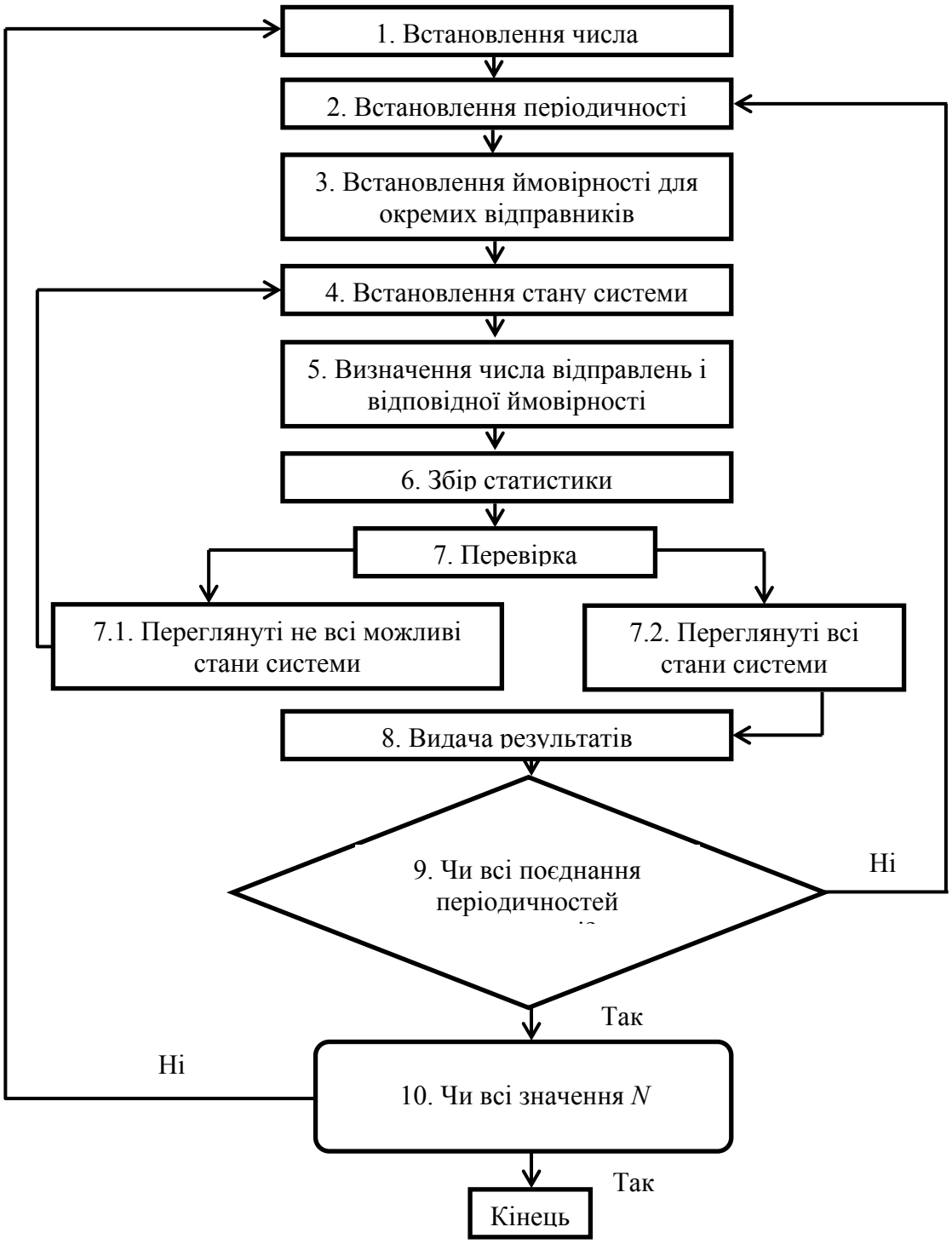


Рисунок 1 – Алгоритм моделювання системи перевезень вантажів в термінальних системах
Джерело: розроблено автором

При моделюванні значення a_j приймаємо кратним 0,2, а значення ймовірності P_j – таким, що відповідає щоденному, щотижневому, щоквартальному та щомісячному відправленню вантажів. Таким чином, на кроці 2 забезпечується повний перебір всіляких поєднань типу (табл. 1). Дані табл. 1 не є результатом статистичного

спостереження, а є інструментом для повного перебору можливих конфігурацій клієнтської бази термінала під час моделювання.

Таблиця 1 – Значення ймовірностей відправки вантажів за періодами

Щоденно	**Щотижня**	**Щомісячно**	**Щоквартально**
1,00	0,00	0,00	0,00
0,80	0,20	0,00	0,00
0,80	0,00	0,20	0,00
0,80	0,00	0,00	0,20
0,60	0,40	0,00	0,00
0,60	0,00	0,40	0,00
0,60	0,00	0,00	0,40
0,40	0,60	0,00	0,00
0,40	0,00	0,60	0,00
0,40	0,00	0,00	0,60
0,20	0,80	0,00	0,00
0,20	0,00	0,80	0,00
0,20	0,00	0,00	0,80
0,00	0,00	0,20	0,80

Джерело: розроблено автором

Крок 3. Встановлення ймовірності для окремих відправників. У залежності від встановленого на кроці 2 співвідношення a_j розраховуємо абсолютне число клієнтів з даною періодичністю відправлень: $n_j=N_{aj}$.

Після цього кожному клієнту присвоюємо відповідне значення ймовірності появи відправлення впродовж доби: $P_i=P_j$, якщо i-й клієнт входить у групу a_j.

Крок 4. Встановлення стану системи. На цьому кроці визначаємо стан кожного відправника (наявність або відсутність вантажу), котре визначає стан системи в цілому. Стан системи зображуємо двійковим кодом виду 01001, де кожна позиція відповідає одному з відправників, а цифра в даній позиції – наявності (1) чи відсутності (0) вантажу у даного відправника.

Крок 5. Визначення числа відправок і відповідної ймовірності. Для встановленого на кроці 4 стану системи визначаємо число відправок, які надійшли на термінал, і ймовірність даного стану:

$$P_{roo} = \prod_{i=1}^{N} f_i, \quad (3)$$

де N – загальна кількість відправників (клієнтів), закріплених за терміналом; $f_i=P_r$, якщо у i-го клієнта в цей день є відправка (стан «1» у двійковому коді); $f_i=1-P_{ri}$, якщо у i-го клієнта в цей день відправки немає (стан «0» у двійковому коді).

Формула 3 дозволяє перейти від індивідуальної поведінки окремих клієнтів до ймовірнісної картини роботи всього термінала.

На практиці це працює таким чином.

Уявімо спрощену систему з 3-х клієнтів (N=3) з різною періодичністю:

- Клієнт 1: возить щодня (P_1=1,0).
- Клієнт 2: возить щотижня (P_2≈0,2).
- Клієнт 3: возить щомісяця (P_3≈0,05).

Якщо необхідно знайти ймовірність стану 100 (коли приїхав лише перший клієнт), розрахунок буде таким:

$$P_{roo}=P_1(1-P_2)(1-P_3),$$
$$P_{roo}=1{,}0\cdot 0{,}8\cdot 0{,}95=0{,}76 \text{ (або 76\%)}.$$

Саме такий підхід обрано через те, що формула базується на припущенні, що поява вантажу у одного клієнта не залежить від іншого. Це дозволяє використовувати операцію множення ймовірностей. Оскільки алгоритм перебирає абсолютно всі комбінації нулів і одиниць (від 2^1 до 2^N станів), сума всіх отриманих P_{roo} завжди дорівнюватиме 1, що підтверджує математичну коректність моделі. Через множення малих і великих ймовірностей (P_i) підсумковий розподіл стає несиметричним і не вкладається в класичну криву Гауса.

Крок 6. Збір статистики. Після обчислення P_{roo} для кожного стану, програма не просто зберігає це число, а додає його до відповідної комірки масиву M, що відповідає сумарній кількості одиниць у двійковому коді. Так формується значення для кожної точки на рис. 2.

Крок 7. Перевірка закінчення. Якщо переглянуті не всі можливі стани системи, то повертаємося до кроку 4, де визначається черговий стан додаванням одиниці до поточного значення двійкового коду стану системи.

Крок 8. Видача результатів. На друк виводяться функція розподілу, полігон ймовірностей, математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення та дисперсія розподілу, котрий моделюється, отримані в результаті обробки масиву M.

Крок 9. Чи всі поєднання періодичностей проглянуто? Якщо проглянуті не всі можливі поєднання періодичності відправлень, то повертаємося до кроку 2, де встановлюються нові значення a_j.

Крок 10. Чи всі значення N проглянуто? Якщо проглянуті не всі значення числа відправників N, то повертаємося до кроку 2, де встановлюється чергове значення N.

Крок 10 алгоритму є завершальним етапом моделювання, де відбувається синтез усіх попередніх розрахунків – від імітаційного моделювання потоків до уточнених транспортних відстаней. На цьому етапі система проводить ітераційну перевірку всіх можливих комбінацій параметрів для пошуку глобального оптимуму.

Покажемо детально, як уточнені відстані ($l_{п\text{-}р}$) з урахуванням специфіки Кіровоградського регіону трансформуються в економічні показники на Кроці 10, коли алгоритм порівнює витрати для різних конфігурацій термінальної мережі. Уточнене значення $l_{п\text{-}р}$ (з урахуванням $k_м$ та $k_{кор}$) безпосередньо змінює два ключові блоки розрахунків: транспортні витрати ($C_{тр}$) та часовий бюджет. Оскільки пробіг автомобілів тепер розрахований не теоретично, а з урахуванням реальної кривизни доріг та заторів, собівартість одного рейсу зростає. Крок 10 перевіряє, чи не перевищують ці витрати вигоду від консолідації вантажів. Довша відстань або складний рельєф збільшують час обороту автопоїзда. Якщо час виконання замовлення перевищує нормативний, алгоритм на Кроці 10 відкидає таку комбінацію як неефективну, навіть якщо вона дешева.

Економічна ефективність ($E_{заг}$) у нашій моделі визначається як мінімізація цільової функції сумарних витрат:

$$Z=C_{скл}+C_{тр}\rightarrow min.$$

Коли ми вводимо уточнені (збільшені за рахунок ландшафту та мережі) відстані, то змінюються «радіус вигідності» та оптимізується парк**.** Уточнена відстань може показати, що обслуговувати віддалених клієнтів (наприклад, у Гайворонському чи Світловодському районах) з центрального термінала в Кропивницькому дорожче, ніж прямими рейсами. Крок 10 допомагає точно визначити межу, де термінальна доставка стає збитковою. Через складні умови (високий $k_м$) продуктивність одного автопоїзда падає. Алгоритм перераховує кількість машин. Економічна ефективність на Кроці 10 покаже, що краще: купити більше малотоннажних авто чи один великий автопоїзд з довшим графіком збору.

Крок 10 завершується вибором тієї комбінації, де собівартість переробки 1 тони вантажу є мінімальною при дотриманні термінів доставки, а коефіцієнт використання вантажопідйомності рухомого складу є найвищим (уточнена відстань дозволяє точніше розрахувати вікна прибуття, щоб машини не їздили напівпорожніми через помилки в таймінгу).

Після перевірки всіх комбінацій ми отримуєте не просто «середні цифри», а ресурсну карту:

1. Скільки саме складських площ потрібно (враховуючи нерівномірність з рис. 2).

2. Яку реальну кількість палива та часу буде витрачено (враховуючи $k_м$ з формули 5).

3. Який тарифний план можна запропонувати клієнтам, щоб система була рентабельною.

Аналіз отриманого сімейства розподілів показує, що реалізована схема випробувань не призводить до отримання будь-якого класичного розподілу. Так, відсутність стабільного співвідношення між математичним сподіванням і дисперсією змушує відкинути біномінальний (для якого дисперсія у всіх випадках менше математичного сподівання), негативний біномінальний (дисперсія більше математичного сподівання) розподіли. Наявність моди не дозволяє застосувати для апроксимації отриманих даних показовий розподіл, несиметричний характер кривих – нормальний розподіл.

У зв’язку з цим при проведенні імітаційного експерименту розподіли апроксимувались усіченими нормальними кривими, підібраними за двома характерними точками модельних розподілів. Нормальний закон не відображує фізичного змісту результатів, проте використовується як зручне, з точки зору машинної реалізації, аналітичне наближення фактичних залежностей.

Для розрахунку показників ефективності впровадження термінальної системи в тому чи іншому регіоні необхідно визначити такі характеристики цього регіону:

1. Середню відстань перевезення 1 т вантажу для внутрішньо обласних перевезень визначаємо за звітними даними місцевого транспортного управління:

$$L=P/Q \tag{4}$$

де P – звітне значення вантажообігу у внутрішньо обласному сполученні в регіоні;
Q – звітне значення обсягу перевозок у внутрішньообласному сполученні в регіоні.

2. Середня відстань підвозу-розвозу вантажу в термінальній системі наближено визначаємо за формулою (4), а більш точно за залежністю:

$$l = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{S}{\pi \cdot K \cdot R}}, \tag{5}$$

де S – площа регіону; K – число терміналів у регіоні, визначене за критерієм мінімуму числа транспортних зв’язків; R – коефіцієнт розвитку дорожньої мережі, котрий визначає частку площі регіону, котра практично може обслуговуватися автомобільним транспортом. Значення R оцінюють експертно.

Таким чином, L являє собою половину радіуса умовного кола, площа котрого дорівнює площі обслуговування одного терміналу в регіоні, що розглядається.

Розрахунок за формулою (5) є критичним для Кроку 9 алгоритму. Знаючи середню відстань $l_{n\text{-}p}$, визначається час обороту автомобіля на маршруті «термінал–клієнт–термінал». Це дозволяє розрахувати змінну продуктивність рухомого складу. Зрештою, це дає змогу визначити, скільки одиниць транспорту потрібно для обслуговування того обсягу вантажу, який ми «отримали» в результаті імітаційного

моделювання (Крок 6). Отже, формула (5) перетворює географічні параметри регіону на техніко-економічні показники роботи системи.

Формула (5) описує середню відстань підвозу/розвозу вантажів ($l_{п\text{-}р}$) у межах зони обслуговування термінала, яка представлена як правильний шестикутник:

$$l_{п\text{-}р}=\frac{2}{3}R \cdot k_{\text{м}}, \quad (6)$$

де R – радіус описаного кола навколо шестикутної зони обслуговування (фактично – максимальна відстань від термінала до межі зони); 2/3 – теоретичний коефіцієнт, що випливає з інтегрування відстаней від центру до точок всередині правильної фігури (середнє плече доїзду); $k_м$ – коефіцієнт нелінійності (маневрування), який враховує, що автомобіль рухається не по прямій, а по реальній дорожній мережі зі звивинами та перехрестями.

Адаптація коефіцієнта нелінійності ($k_м$) для Кіровоградського регіону вимагає врахування як топології дорожньої мережі, так і специфічних експлуатаційних умов, що характерні для центру України. Оскільки регіон має виражену аграрно-промислову специфіку, $k_м$ у моделі перестає бути статичною константою і перетворюється на динамічний параметр.

Кіровоградська область характеризується радіальною структурою доріг, що сходяться до обласного центру (Кропивницького). При русі основними трасами (наприклад, М-30 або М-05) мережа досить прямолінійна, тому $k_м$ коливається в межах 1,15÷1,25. Для сільських та міжрайонних сполучень через необхідність об'їзду природних перешкод (балок, річок, як-то Інгул чи Синюха) та специфіку землевідведення агрохолдингів, коефіцієнт зростає до 1,35÷1,45. Тобто реальний шлях на 40% довший за пряму лінію.

Хоча Кропивницький не є мегаполісом, він має критичні вузли, що створюють ефект заторів (наприклад, залізничні переїзди або мости через Інгул). В імітаційній моделі затори адаптуються через $k_м$ не як збільшення відстані, а як збільшення часового еквівалента шляху. Якщо затор затримує авто на 20 хвилин, у формулу (5) закладається підвищувальний коефіцієнт (наприклад, +0,1 до базового $k_м$), що автоматично збільшує розрахункову потребу в кількості автопоїздів (Крок 9 алгоритму).

Кіровоградщина розташована на Придніпровській височині, що має розчленований рельєф. Велика кількість підйомів та спусків змушує водіїв вантажівок обирати пологіші, але довші шляхи. У моделі це враховується через диференціацію $k_м$ залежно від напрямку (наприклад, у західних районах області коефіцієнт традиційно вищий, ніж у південних степових). При плануванні маршрутів термінала часто доводиться обирати об'їзні шляхи з кращим покриттям, що також збільшує фактичний пробіг.

При реалізації алгоритму може бути впроваджений коефіцієнт коригування ($k_{кор}$), який буде множитись на базовий $k_м$ з формули (5):

$$l_{п\text{-}р}=\frac{2}{3}R \cdot (k_{\text{м}} \cdot k_{\text{кор}}). \quad (7)$$

Для умов «год пік» у місті $k_{кор}$=1,2; для нічних рейсів $k_{кор}$=1,0; для районів із складним рельєфом $k_{кор}$=1,15. Така адаптація дозволяє зробити модель чутливою до реального часу, що є критично важливим для термінальних систем, де графік прибуття дрібних партій вантажів має бути максимально точним.

Залежність обсягу перевозок вантажів від відстані (рис. 2) є необхідною для розрахунку низки показників ефективності термінальної системи. Однак статистичні дані, необхідні для побудови вказаної залежності, є далеко не по всіх регіонах України.

Нижче описується модель, яка може бути використана для наближеної оцінки картини вантажопотоків і побудови залежності *Q-L* для того чи іншого регіону.

Для моделювання обрано топологічну модель регіону, де територія розбивається на правильні шестикутники (соти). Це професійний підхід у транспортній логістиці через дві причини:

1. Відсутність порожнеч: на відміну від кіл, шестикутники повністю вкривають площину без накладень та прогалин.

2. Мінімальне відхилення: шестикутник найбільш наближений до кола за своєю формою, що робить розрахунок середньої відстані ($2/3 \cdot R$) максимально точним для радіальних систем.

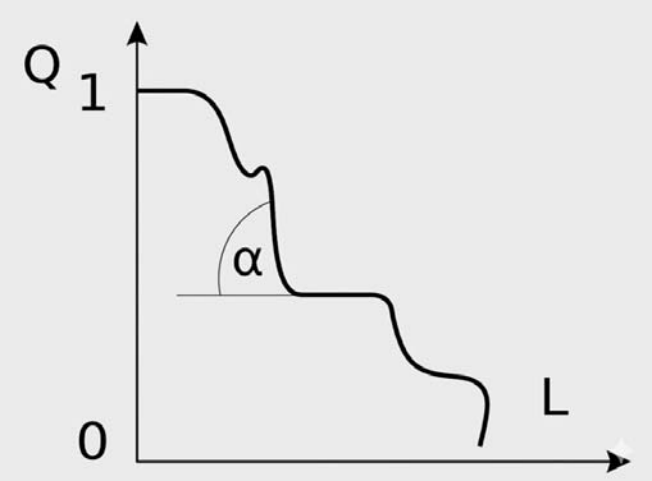


Рисунок 2 – Характерна залежність обсягу перевозок вантажів від відстані
Джерело: розроблено автором

В основу моделі покладені такі припущення:

а) передбачається, що найбільші обсяги перевозень у внутрішньообласному сполученні припадають на маршрути між районними центрами. На графіку *Q*-*L* (рис. 2) цим маршрутам відповідають нахилені «уступи», причому перший з них характеризує перевозки між сусідніми районами, другий – перевозки через один район и т. д.

б) передбачається, що крутизна кожного з таких «уступів» (кут α на рис. 2) залежить від частки міст серед населених пунктів даного регіону, причому крутизна тим більша, чим частка міст менша, і навпаки. Фізично це означає, що в розвинених регіонах з великою часткою міст припущення в пункті «а» виконується в меншій мірі, ніж в регіонах з незначною часткою міст.

в) топологічний регіон розглядається як частина площини, близька за формою до кола, заповнена правильними шестикутниками, що відповідають окремим районам. Число шестикутників дорівнює числу районів, а площа кожного з них:

$$S_6 = \frac{S \cdot K_{ДС}}{N}, \tag{8}$$

де S_6 – площа шестикутника; S – площа регіону; $K_{ДС}$ – коефіцієнт розвитку дорожньої мережі; N – число районів у регіоні.

г) районні центри вважаються розташованими в геометричних центрах шестикутників. Таким чином, відстань між сусідніми районними центрами дорівнює d, між центрами, розташованими «через район» – $2d$ і т. д. (рис. 3).

Відстань між сусідніми центрами:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot S_6}{\sqrt{3}}} = 1{,}07\sqrt{S_6}. \tag{9}$$

д) частка перевозок h_i на відстань d, $2d$ і т. д. (тобто висота відповідного «уступу» на графіку Q-L (рис. 2) пропорційна числу маршрутів відповідної довжини на топологічній моделі регіону (рис. 3).

Таким чином, розглянуті методи визначають доцільність застосування участі термінального об'єкту в обслуговуванні вантажопотоку з точки зору доставки «точно в термін», економічної доцільності участі термінального об'єкту в каналі вантажопотоків з метою економії експлуатаційних витрат.

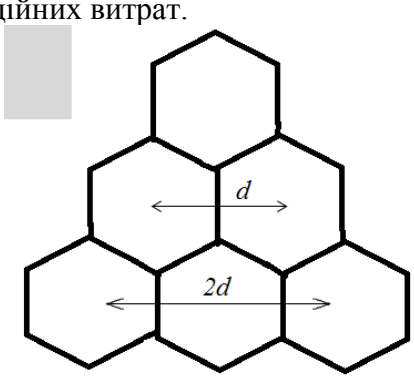


Рисунок 3 – Топологічна модель регіону

Джерело: розроблено автором

Висновки. 1. Обґрунтовано обмеженість традиційних підходів, які базуються на використанні класичних законів розподілу (Пуассона або нормального). Доведено, що при обслуговуванні дрібнопартіонних вантажопотоків із різною періодичністю відправлення (від щоденних до щоквартальних) реальний потік має дискретний та асиметричний характер, що не враховується стандартними методиками розрахунку складських площ.

2. Розроблено та реалізовано алгоритм імітаційного моделювання, який на основі двійкового кодування станів системи дозволяє розрахувати ймовірність кожної можливої комбінації надходження вантажів. Це забезпечує високу точність прогнозування пікових навантажень на термінал, що є критично важливим для уникнення черг та затримок у транспортно-експедиційному обслуговуванні.

3. Запропоновано вдосконалену модель топології регіону, де розрахунок середньої відстані підвозу-розвозу за формулою (5) адаптовано до специфіки дорожньої мережі. Впровадження коефіцієнта нелінійності $k_м$ дозволяє врахувати реальну конфігурацію транспортних шляхів та «заторні» фактори, що підвищує точність розрахунку необхідної кількості автопоїздів.

4. Доведено економічну ефективність ітераційного підходу (Крок 10 алгоритму), який через перевірку всіх комбінацій параметрів дозволяє знайти глобальний оптимум витрат. Це дає змогу мінімізувати сумарні витрати на утримання складу та експлуатацію транспорту, забезпечуючи при цьому гарантований рівень сервісу навіть для клієнтів із низькою періодичністю відправок.

5. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості створення «цифрового двійника» термінальної системи регіону. Це дозволяє логістичним операторам Кіровоградщини ще на етапі проектування гнучко змінювати параметри системи залежно від зміни клієнтської бази, не вдаючись до дорогих натурних експериментів.

Список літератури

1. Цимбал С.В. Мельник Р.В. Логістика терміналів (терміналістика) як один з перспективних напрямів розвитку логістики. *Вісник ВПІ.* 2024. Вип. 5 (176). С. 84-91. DOI: 10.31649/1997-9266-2024-176-5-84-91.

2. Пасічник А.М. Алгоритм побудови та оптимізації регіональної мережі транспортно-логістичних комплексів. *Математичне моделювання*. 2023. №2(49). С. 156-164. DOI: 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293184.
3. Харченко М.В. Транспортно-логістична інфраструктура та її місце в соціально-економічній системі підприємств України. *Економічний простір.* 2020. №153. С. 83-88. DOI: 10.32782/2224-6282/153-15.
4. Савицький Е.Е. Вплив оптимізації логістичних процесів на ефективність комерційної діяльності підприємства. *Економіка та суспільство.* 2023. Вип. 52. С. 125-131. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-52-47.
5. Голуб Д.В., Аулін В.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2022. Вип. 1(15), С. 44–51. URL: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-44-51.
6. Yang Zhang, Jinping Guan, Peiyu Jing, Linlin You, Fang Zhao, Moshe Ben-Akiva (2026). Future freight and logistics survey: An integrated vehicle-and-shipment-tracking data collection method and a case study in the United States. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* Vol. 205, January 2026, 104517.
7. Zając, M., Rozic, T., & Bajor, I. (2023). *Model for Evaluating the Effectiveness of Cargo Operation Strategy in an Inland Container Terminal*. Applied Sciences, 13(12), 7127. DOI: https://doi.org/10.3390/app13127127.
8. Freight Analysis Framework (FAF) U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics & Federal Highway Administration. *Freight Analysis Framework (FAF)*. https://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight analysis/faf/?utm source=chatgpt.com.
9. Бондаренко С.М. Використання розподілу Пуассона в системі управління якістю на підприємстві . *Причорноморські економічні студії.* 2020. Вип. 58, Ч. 1. С. 108-112.
10. Колісник А.В. Формування автоматизованої технології транспортування контейнерів залізницею на основі теорії випадкових потоків. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – «Транспортні системи» (275–Транспортні технології). – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2020.
11. Wang R., Li J., & Bai R. *Prediction and Analysis of Container Terminal Logistics Arrival Time Based on Simulation Interactive Modeling. Mathematics,* 11(15), 3271. DOI: https://doi.org/10.3390/math11153271.

References

1. Tsymbal, S.V., & Melnyk, R.V. (2024). Logistics of terminals (terminalistics) as one of the promising directions of logistics development. *Visnyk VPI,* 5(176), 84–91. 10.31649/1997-9266-2024-176-5-84-91. [in Ukrainian].
2. Pasichnyk, A.M. (2023). Algorithm for building and optimizing the regional network of transport and logistics complexes. *Mathematical Modeling,* 2(49), 156–164. 10.31319/2519-8106.2(49)2023.293184. [in Ukrainian].
3. Kharchenko, M.V. (2020). Transport and logistics infrastructure and its place in the socio-economic system of enterprises in Ukraine. *Economic Space,* 153, 83–88. doi.org/10.32782/2224-6282/153-15. [in Ukrainian].
4. Savytskyi, E.E. (2023). The impact of optimizing logistics processes on the efficiency of a company's commercial activities. Economy and Society, 52, 125–131. 10.32782/2524-0072/2023-52-47. [in Ukrainian].
5. Holub, D.V., Aulin, V.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2022). Implementation of system approach in determining the efficiency of functioning of complex regional transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport,* 1(15), 44–51. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-44-51 [in Ukrainian].
6. Yang Zhang, Jinping Guan, Peiyu Jing, Linlin You, Fang Zhao, Moshe Ben-Akiva (2026). Future freight and logistics survey: An integrated vehicle-and-shipment-tracking data collection method and a case study in the United States. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* Vol.205, January 2026, 104517 [English].
7. Zając, M., Rozic, T., & Bajor, I. (2023). *Model for Evaluating the Effectiveness of Cargo Operation Strategy in an Inland Container Terminal*. Applied Sciences, 13(12), 7127. DOI: https://doi.org/10.3390/app13127127 [English].

8. Freight Analysis Framework (FAF) U.S. Department of Transportation, Bureau of Transportation Statistics & Federal Highway Administration. *Freight Analysis Framework (FAF)*. https://ops.fhwa.dot.gov/freight/freight_analysis/faf/?utm_source=chatgpt.com [English].
9. Bondarenko, S.M. (2020). Using the Poisson distribution in the quality management system at the enterprise . *Black Sea Economic Studies.* Issue 58, Part 1. P. 108-112. [in Ukrainian].
10. Kolisnyk, A.V. (2020). Formation of automated technology for transporting containers by rail based on the theory of random flows. Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.01 – «Transport Systems» (275– Transport Technologies). – Ukrainian State University of Railway Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv [in Ukrainian].
11. Wang R., Li J., & Bai R. *Prediction and Analysis of Container Terminal Logistics Arrival Time Based on Simulation Interactive Modeling. Mathematics*, 11(15), 3271. DOI: https://doi.org/10.3390/math11153271 [English].

Olena Khachaturyan, PhD in econ. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methodological Aspects of Modeling and Assessing Regional Cargo Flows in Terminal Systems

The scientific article analyzes and proposes a solution to a relevant scientific and practical problem — determining the objective needs of a specific region for the development of terminal intercity road freight transport systems. The author notes that the current stage of transport sector development is characterized by a steady trend toward increasing cargo nomenclature, fragmentation of shipment lots, and significant complexity of logistic links between business entities. Under such conditions, traditional approaches to organizing the transport process no longer ensure the necessary level of efficiency, leading to irrational use of rolling stock and overloading of warehouse infrastructure. The paper scientifically substantiates that the formation of a terminal network is a strategic direction for improving the quality of transport and forwarding services and optimizing the cooperative deliveries of industrial enterprises.

Fundamental attention in the study is paid to the development of the author's methodology for a comprehensive survey of freight flows, which serves as a mandatory prerequisite for the justified design of the future terminal network parameters. The proposed methodical approach is based on conducting a continuous survey of enterprises and organizations in the region, regardless of their departmental subordination or the current modes of transport they use. The author describes the stages of analysis in detail: from the primary identification of actual volumes, structure, and periodicity of freight flows to the construction of forecast correspondence matrices. Particular emphasis is placed on calculating the necessary material and technical resources of the system, including: optimal warehouse space, nomenclature of lifting and transport mechanisms, and the quantitative composition of the long-haul road train fleet.

The scientific novelty of the work is reinforced by the application of simulation modeling of the daily arrival of shipments at the terminal. Based on the calculations, the author proves that due to the extremely high amplitude of fluctuations in shipment frequency (from daily cycles to isolated quarterly requests), real distributions of freight flows deviate significantly from classical theoretical laws, such as normal, exponential, or Poisson distributions. This conclusion is of critical practical importance, as it confirms the impossibility of applying unified solutions and dictates the need for individual modeling for each separate logistics hub depending on the specifics of its client base.

Additionally, the paper presents an original topological model of the region, in which the studied territory is approximated as a collection of regular hexagons (districts). This geometric approach allows for high-precision calculation of average pickup and delivery distances within the terminal zone, as well as the construction of analytical dependencies of transport volumes on distance (Q-L graphs), even in situations where direct statistical information is incomplete or fragmented.

The practical significance of the results lies in creating an effective toolkit for management bodies and transport companies to justify the economic feasibility of terminal operations. The implementation of the proposed methods will contribute to a significant reduction in unit operating costs, ensuring the stable implementation of the "Just-in-Time" delivery principle and increasing the overall competitiveness of the region's transport system.

terminal transportation, **intercity freight flows**, **logistics infrastructure**, **simulation modeling**, **topological model of the region**, **distribution law of shipments**, **logistics efficiency**

Одержано (Received) 26.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 656.13:338.47:629.33 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).375-383

Д.В. Голуб, доц., канд. техн. наук, **Н.О. Замкова, Д.П. Чорна**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Dimchik529@gmail.com, Natashkazamkova@gmail.com, Chornadianacooper@gmail.com, Cifromag291025@gmail.com

Удосконалення підходу техніко-економічної оцінки ефективності експлуатації транспортних засобів на маршрутах міста з урахуванням їх стану працездатності

Розглянуто актуальну науково-практичну проблему оцінки ефективності експлуатації міських автобусів з урахуванням їх напрацювання з початку використання. Встановлено, що недостатня дослідженість закономірностей зміни ефективності у процесі старіння рухомого складу ускладнює вибір раціональної структури автобусного парку та визначення економічно доцільних строків його оновлення. Обґрунтовано, що зі збільшенням пробігу відбувається поступове погіршення технічного стану автобусів, знижується коефіцієнт технічної готовності, зростає кількість відмов і тривалість простоїв у технічному обслуговуванні та ремонті, що призводить до підвищення експлуатаційних витрат і зниження загальної ефективності їх використання.

Проаналізовано сучасні підходи до оцінки ефективності експлуатації рухомого складу, включаючи моделі визначення оптимального строку служби автобусів на основі експлуатаційної надійності, зміни витрат і залишкової вартості. Виявлено обмеження існуючих методик, які полягають у недостатньому врахуванні прибутковості, складності визначення коефіцієнта дисконтування та суб'єктивності оцінки споживчої привабливості транспортних засобів. Запропоновано удосконалений підхід до техніко-економічної оцінки, що базується на інтегральному показнику ефективності, який враховує приведені витрати, обсяги транспортної роботи, ліквідну вартість, ринкові умови та експлуатаційні характеристики автобусів.

На основі експериментальних даних проведено порівняльний аналіз експлуатації автобусів різних моделей у міських умовах на прикладі м. Кропивницького. Досліджено залежність питомих витрат на забезпечення працездатності від напрацювання та встановлено, що після досягнення пробігу близько 350 тис. км відбувається їх суттєве зростання. Виявлено, що автобуси іноземного виробництва характеризуються більш стабільними показниками технічного стану, проте мають вищі витрати на обслуговування, тоді як вітчизняні моделі відзначаються меншою стабільністю, але нижчими початковими витратами.

Наголошено, що ефективність експлуатації рухомого складу повинна оцінюватися комплексно, не лише за витратами, а й з урахуванням отриманого прибутку та продуктивності. Запропонований підхід дозволяє більш обґрунтовано визначати доцільність подальшої експлуатації або заміни автобусів, що сприятиме оптимізації структури парку рухомого складу, підвищенню економічної ефективності перевезень та зниженню витрат автотранспортних підприємств.

ефективність експлуатації, автобуси, напрацювання, технічна надійність, питомі витрати, рухомий склад, термін служби, техніко-економічна оцінка, транспортна робота, оптимізація

Постановка проблеми. Ефективність функціонування системи не може бути повністю визначена виключно на основі її власних характеристик, оскільки необхідно також враховувати властивості її підсистем [1, 2]. Вона не підлягає безпосередньому спостереженню і може бути оцінена лише за допомогою непрямих методів [3, 4].

Ефективність виступає однією з ключових характеристик будь-якої системи, зокрема транспортної, підсистемою якої є експлуатація пасажирських автобусів на

© Д. В. Голуб, Н. О. Замкова, Д. П. Чорна, 2026

міських маршрутах [5]. У зв'язку зі зростанням обсягів пасажирських перевезень і підвищенням мобільності населення в містах останнім часом спостерігається посилена увага до дослідження ефективності функціонування такої підсистеми [6, 7]. Для виконання подібних досліджень застосовуються різноманітні підходи, що залежать від специфіки предметної області. Водночас створено ряд методів і методик, які використовуються для оцінювання ефективності об'єктів у широкому спектрі систем. Однак вони мають певні обмеження і дають змогу визначати лише відносну ефективність об'єктів, тобто оцінювати їх у порівнянні між собою [7, 8].

Для отримання більш обґрунтованої оцінки поточного рівня ефективності функціонування транспортної системи та прогнозування її подальшого розвитку доцільно враховувати комплекс показників, які більш повно відображають сучасні умови експлуатації рухомого складу (РС) як її ключового елемента [9, 10].

Зміна показників ефективності використання міських автобусів залежно від напрацювання залишається недостатньо дослідженим явищем. Наслідком цього є те, що на сучасному етапі не повною мірою вирішене завдання формування раціональної структури автобусного парку з урахуванням динаміки ефективності експлуатації залежно від пробігу. Інтенсивна експлуатація РС потребує проведення оцінки змін ефективності його використання [11, 18]. Для забезпечення високого рівня ефективності функціонування автобусних парків може виникати необхідність оновлення рухомого складу шляхом заміни автобусів.

Системний аналіз вирішення комплексних завдань, що пов'язані з управлінням технічним станом, а також ефективністю та експлуатацією рухомого складу, у перспективі сприятиме підвищенню продуктивності автобусів і зниженню питомих витрат на виконання транспортної роботи.

В умовах безперервного розвитку ринку міських автобусів і поступового вдосконалення окремих їхніх моделей часто постає проблема вибору найбільш ефективного транспортного засобу (ТЗ) для обслуговування міських пасажиропотоків [13, 19]. Він має характеризуватися комплексом технічних параметрів, які забезпечують його перевагу для використання в умовах міської експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зменшення середнього напрацювання до відмови для кожної окремої деталі, вузла чи агрегату міського автобуса призводить до суттєвого зниження надійності автобуса у цілому [13, 15]. Це негативно впливає на рівень витрат, необхідних для забезпечення працездатності, а отже, і на ефективність експлуатації автобусів [17, 18]. Крім того, це позначається на тривалості раціонального строку служби РС, оскільки відмова, що виникає через критичний стан елемента, може спричинити пошкодження та істотну зміну параметрів інших деталей [19, 20].

У технічній експлуатації автобусів існує обґрунтована модель зниження ефективності їх функціонування залежно від напрацювання [18, 20]. РС зазнає комплексного старіння зі збільшенням пробігу [12]. Зменшується коефіцієнт технічної готовності, оскільки зі зростанням напрацювання з початку експлуатації збільшуються простої під час технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) [14, 20]. За тривалого використання помітно погіршується ключовий показник безвідмовності - напрацювання до відмови [20]. Для підтримання працездатного стану необхідна все більша кількість запасних частин через аварійні відмови та пов'язані з ними дорогі поломки систем автобуса. У результаті зростає рівень експлуатаційних витрат [16].

На даний час недостатньо детально досліджено питання оцінювання зміни ефективності експлуатації автобусів, що залежить від напрацювання РС з початку його використання. Через високу інтенсивність змін ефективності міських автобусів залежно від пробігу може втрачатися значний економічний ефект.

Тому дослідження, що спрямовані на підвищення ефективності функціонування міських автобусів із урахуванням їх напрацювання від початку експлуатації, є безумовно актуальними.

Постановка завдання. Метою даної роботи є удосконалення підходу до техніко-економічної оцінки ефективності експлуатації пасажирських автобусів різних моделей з урахуванням їх напрацювання в міських умовах, що дає можливість здійснювати порівняння як за технічними, так і економічними показниками із визначенням найбільш ефективного ТЗ та обґрунтованої подальшої оптимізації структури парку РС.

Виклад основного матеріалу. Для автотранспортного підприємства (АТП), яке здійснює міські пасажирські перевезення, важливе значення має зменшення витрат на придбання ТЗ та їх утримання у технічно справному стані. Не менш суттєвим є визначення моменту, коли заміна автобуса є економічно доцільнішою, ніж його подальша експлуатація. Для вирішення цього завдання пропонується визначати строки заміни автобусів на основі оцінювання їх експлуатаційної надійності з урахуванням річних змінних експлуатаційних витрат. Ці витрати визначаються з урахуванням параметра «потоку відмов», а також початкової вартості і зміни залишкової вартості автобуса залежно від строку його використання. Розглянутий алгоритм підходу до визначення оптимального строку експлуатації автобусів на міських маршрутах наведено на рис. 1.

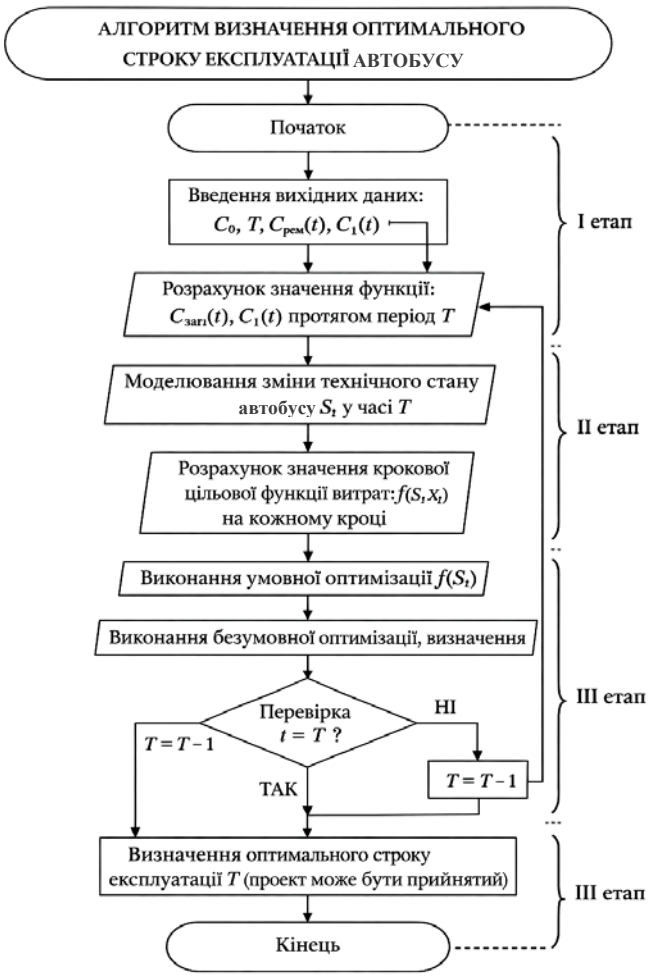


Рисунок 1 - Алгоритм підходу визначення оптимального строку експлуатації автобусів на маршрутах міста

Джерело: розроблено авторами

Обмеженням даного підходу є встановлений період експлуатації тривалістю 5 років. В умовах функціонування автотранспортних підприємств ефективність використання рухомого складу не знижується настільки швидко і експлуатаційні витрати можуть бути співставними з вартістю нових транспортних засобів. При цьому важливим є питання визначення залишкової вартості рухомого складу. Обчислення цього показника для п'ятирічного періоду експлуатації, свідчить про недостатню ефективність такого підходу.

Оцінювання економічно доцільної періодичності заміни автобусів проводять в міських умовах, а також визначається ефективність кожної окремої моделі РС:

$$E = \frac{K_н \sum_{i=1}^{T} L_i /(1+d)^{i-1}}{\sum_{i=1}^{T}[(B_i^{оп} + B_i^{то} + B_i^{ем} + B_i^{ш} + B_i^{нв})/((1+d)^{i-1})] + (B_i^{прд} / K_{сп}) - B_i^{лц} /(1+d)^{T}}, \quad (1)$$

де E - інтегральний показник ефективності, наприклад, приведений пробіг у км на 1 грн приведених витрат; $K_н$ - нормативний коефіцієнт, що дорівнює одиниці для сертифікованого автобуса або нулю - у разі його відсутності; T - строк служби автобуса до списання; L_i - середній річний пробіг в i-му році; d - коефіцієнт дисконтування, що відображає приведення майбутніх витрат і доходів; $B_i^{оп}, B_i^{то}, B_i^{ем}, B_i^{ш}, B_i^{нв}$ - відповідно витрати на оплату праці з нарахуваннями, технічне обслуговування і ремонт, експлуатаційні матеріали, шини та накладні витрати в i-му року; $B_i^{прд}$ - витрати на придбання, доставку та розмитнення автобусу; $B_i^{лц}$ - ліквідна вартість автобусу; $K_{сп}$ - споживчий коефіцієнт привабливості автобусу.

Даний показник забезпечує отримання результату, приведеного до моменту оцінювання. Для його визначення необхідно мати інформацію про зміну обсягів транспортної роботи та витрат за роками експлуатації. Також складність викликає визначення коефіцієнта дисконтування d. При придбанні автобусів застосовуються різні форми фінансування, зокрема зовнішні джерела та лізинг, або їх комбінація, що ускладнює розрахунки. Коефіцієнт $K_{сп}$, який характеризує привабливість ТЗ, також може суттєво змінюватися залежно від уподобань користувача.

Визначено ефективний ресурс та основні техніко-економічні показники експлуатації автобусів, що працюють у місті Кропивницькому. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення ефективного ресурсу та техніко-економічних показників експлуатації досліджуваних моделей автобусів м. Кропивницького

Марка міського автобусу	Приведе-ний ресурс, тис. км	Приведені витрати, тис. грн. при $К_{пв}$=1	Витрати на придбання запчастин, тис. грн.	Інтегральні оцінки приведених км пробігу на 1 тис. грн приведених витрат при $К_{пв}$=1	Інтегральна оцінка 10 місце-км пробігу на 1 тис. грн приведених витрат при $К_{пв}$=1
Mercedes-Benz Citaro O 530 G	800	14500	4200	55	7,2
МАЗ-103	400	8200	2500	49	6,1

Джерело: розроблено авторами

Ефективності різних інженерних рішень оцінюється за показником загальногосподарського економічного ефекту - інтегральним критерієм ефективності, який враховує собівартість реалізації різних варіантів:

$$E_{зг} = (B_1 + E_н K_1) - (B_2 + E_н K_2), \quad (2)$$

де B_1, B_2 - поточні річні виробничі витрати за першим і другим варіантами, грн; K_1, K_2 - обсяги капітальних вкладень за різними варіантами, грн; $E_н$ - коефіцієнт приведення капітальних вкладень по різних варіантах до поточних річних виробничих витрат.

В той час ефективність експлуатації автобусів визначається на основі значень складових собівартості. Найбільш поширеним є запропонований техніко-економічний показник - приведені питомі витрати на перевезення $B_п$:

$$B_п = \frac{C_е + 0{,}1(K + 0{,}1 \cdot B_л)100}{W_р}, \quad (3)$$

де $C_е$ - собівартість експлуатації, грн; K - капітальні вкладення, грн; $B_л$ - вартість автобусу ліквідна, грн.; $W_р$ - продуктивність автобусу за рік, грн.

Важливою характеристикою формули (3) є те, що вона враховує не лише величину капітальних витрат і продуктивність ТЗ, але й його ліквідаційну вартість.

Запропоновано застосування цільової функції, яка відображає прибуток підприємства, що експлуатує ТЗ, а також враховує його ринкову вартість з урахуванням попиту та експлуатаційних витрат:

$$П_{рі} = (B_i - C_i - E_н \frac{K_{рі}}{N_{рі}}) N_{рі} \to \max, \quad (4)$$

де B_i - ринкова вартість за якою може бути реалізовано автобус i-го варіанту, грн./од.; C_i - i-ий варіант собівартості автобусу, грн./од.; $E_н$ - економічний коефіцієнт ефективності підприємства; $N_{рі}$ - i-ий варіант річного об'єму реалізації моделі автобусу, що визначається на основі досліджень.

Проведена оцінка питомих витрат на експлуатацію різних моделей пасажирських автобусів, що функціонують в м. Кропивницькому Кіровоградської області, зокрема іноземного виробництва з початковими пробігами більш ніж 350 тис. км (рис. 2, 3).

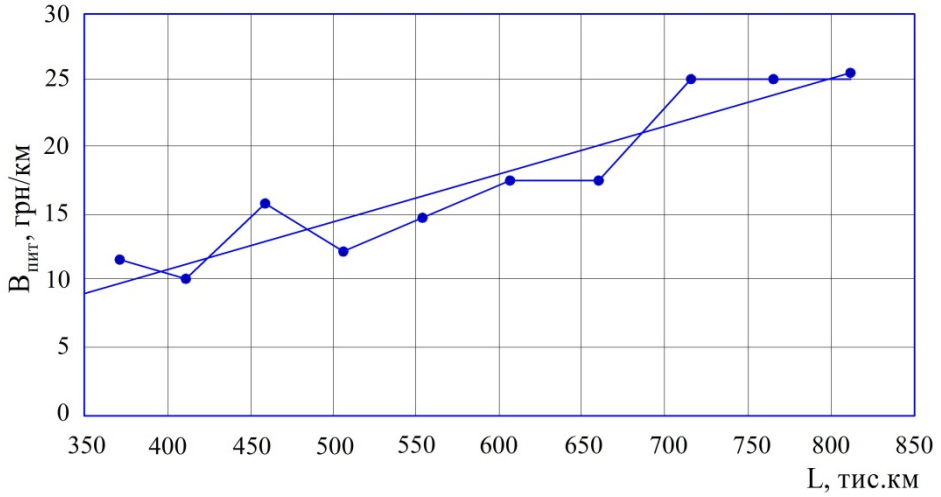


Рисунок 2 - Питомі витрати на забезпечення працездатності міських пасажирських автобусів Mercedes-Benz Citaro O 530 G

Джерело: розроблено авторами

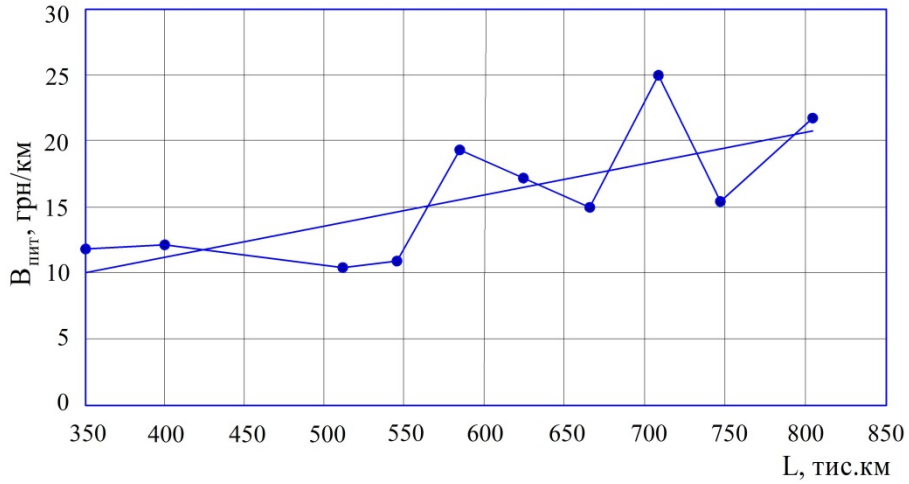


Рисунок 3 - Питомі витрати на забезпечення працездатності міських пасажирських автобусів МАЗ-103

Джерело: розроблено авторами

З аналізу наведених графічних залежностей випливає, що після досягнення порядку 350 тис. км пробігу відбувається різке підвищення питомих витрат, необхідних для підтримання працездатності автобусів моделей Mercedes-Benz Citaro O 530 G та МАЗ-103. Отримані результати дають змогу оцінити не лише фактичний технічний стан РС, але й швидкість зниження його експлуатаційної результативності. Оскільки обидві зазначені моделі експлуатувалися в однакових умовах одного підприємства, з'являється можливість порівняти їх за рівнем надійності та витратності, зокрема є можливість визначити, наскільки автобус Mercedes-Benz Citaro O 530 G є дорожчим або менш надійним в експлуатації порівняно з МАЗ-103. При цьому слід підкреслити, що перша група автобусів характеризується більш рівномірним і стабільним технічним станом, хоча це супроводжується більшими витратами. Саме тому здійснення планування експлуатації є більш передбачуваним для автобусів Mercedes-Benz Citaro O 530 G.

Важливим при цьому є встановлення рівня ефективності для кожної групи автобусів, оскільки без цього їх порівняльна оцінка не може бути об'єктивною. Отже, ключовою метою функціонування будь-якого АТП є максимізація прибутку, поряд з витратами на утримання РС.

Висновки.

1. Встановлено, що ефективність експлуатації міських автобусів істотно залежить від їх напрацювання: зі збільшенням пробігу знижується надійність, зростають витрати на технічне обслуговування і ремонт, що призводить до погіршення загальних техніко-економічних показників.

2. Доведено, що існуючі методики оцінки ефективності експлуатації автобусів мають обмеження, оскільки недостатньо враховують зміну прибутковості, складність визначення коефіцієнта дисконтування та вплив ринкових факторів, що знижує точність прийняття управлінських рішень.

3. Запропоновано підхід, в якому на основі інтегрального показника комплексно оцінюється ефективність експлуатації автобусів, враховуючи як витрати, так і результати транспортної роботи, ліквідну вартість та споживчу привабливість рухомого складу.

4. За результатами дослідження встановлено, що після пробігу порядку 350 тис. км відбувається суттєве зростання питомих витрат на забезпечення працездатності автобусів, що може бути критерієм для обґрунтування доцільності їх заміни.

5. Порівняльний аналіз значення ефективності ресурсу і техніко-економічних показників експлуатації досліджуваних моделей автобусів показав, що транспортні

засоби іноземного виробництва характеризуються більш стабільними експлуатаційними показниками, тоді як вітчизняні моделі можуть бути економічно вигіднішими на початкових етапах експлуатації. Це необхідно враховувати при формуванні та оптимізації автобусного парку на автотранспортному підприємстві.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лисенко С.В. та ін. Методологія визначення основних експлуатаційних властивостей та якості функціонування транспортних і технічних систем. Вісник інж. академії України, №2, 2017. С.110-115.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. та ін. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
3. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В. та ін. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. Вісник машинобудування та транспорту №1(11), 2020. С.5-10.
4. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лисенко С.В. та ін. Оцінка працездатності автомобільних транспортних систем на основі математичних методів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, 2020. №22. С. 262-271.
5. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В. та ін. Особливості дослідження ефективності транспортних систем на етапах життєвого циклу. Вісник машинобудування та транспорту №1(13), 2021. - С. 15-16.
6. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. та ін. Обґрунтування рівня конкуренції на міських пасажирських маршрутах. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 6(37). Ч.2 С. 89-98.
7. Босняк М. Г. Пасажирські автомобільні перевезення. Навчальний посібник. К.: Видавничий дім «Слово», 2009. 272 с.
8. Волобуєва Т. В., Сирота В. М., Мастепан С. М. та ін. Формування умов ефективного функціонування транспортної системи автотранспортного підприємства. *Вісник машинобудування та транспорту,* №1(19), 2024. С. 21-28.
9. Голуб Д.В. Теоретична модель транспортної системи як сукупності взаємодіючих і взаємоперетворюючих елементів та підсистем. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5(36). Ч.2 С. 324-334.
10. Голуб Д.В., Аулін В.В.,Біліченко В.В., Замуренко А.С. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. Вісник машинобудування та транспорту №15(1), ВНТУ, 2022. С. 6-14.
11. Голуб Д.В.Методи та підходи до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5(36). Ч.1 С. 317-327.
12. Голуб Д.В., Біліченко В.В., Аулін В.В. та ін. Методологічний підхід до розв'язання проблеми надійності функціонування автомобільних транспортних систем. Вісник машинобудування та транспорту №19(1), ВНТУ, 2024. С. 48-57.
13. Горбачов П. Ф. Сучасні наукові підходи до організації роботи маршрутного пасажирського транспорту в містах : монографія. Х. : ХНАДУ, 2009. 196 с.
14. Горяїнов О. М. Вплив техніко-експлуатаційних показників роботи автотранспорту на ефективність логістичної системи: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01-Транспортні системи, Національний транспортний ун-т., Київ, 2004.17 с.
15. Ge Liping, Vob Stefan, Xie Lin Robustness and disturbances in public transport. Public Transport. Planning and Operations, 2022. Vol. 14. P. 191-261.
16. Іванілов О.С., Дмитрієв І.А., Шевченко І.Ю. Економіка підприємств автомобільного транспорту: підручник. Х.: ФОП Бровін О.В., 2017. 632 с.
17. Корецька С.О., Якимчук А.Ю., Карпан Т.С. Економіка автомобільного транспорту: Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2012. 309 с.
18. Podvalna Halina, Bochko Olena, Kuziak Viktoriia and other. Economic efficiency of road transport vehicles of fleet and its impact on commercial indices and production plan of a motor transport enterprise. E3S Web of Conferences 234(4):00056. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021. P. 1-11.
19. Хаврук В.О.. Оцінка резервів підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортного підприємства. Наука та прогрес транспорту, № 2 (98), НТУ, 2022. С. 17-25.
20. Yu Zhou, Ran Zheng Capacity-based daily maintenance optimization of urban bus with multi-objective failure priority ranking. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 244, 2024. P. 109-124.

References

1. Aulin, V. V., Holub, D. V., Lysenko, S. V., et al. (2017). Methodology for determining the main operational properties and quality of functioning of transport and technical systems. *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 2, 110–115 [in Ukrainian].

2. Aulin, V. V., Holub, D. V., Hrynkiv, A. V., et al. (2017). Methodological and theoretical foundations for ensuring and improving the reliability of automotive transport systems functioning. Kropyvnytskyi: LLC "KOD" Publishing House, 370 p. [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V., Holub, D. V., Bilichenko, V. V., et al. (2020). Formation of indicators for evaluating the efficiency of the transportation process. Bulletin of Mechanical Engineering and Transport, 1(11), 5–10 [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V., Holub, D. V., Lysenko, S. V., et al. (2020). Assessment of the operability of automotive transport systems based on mathematical methods. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 22, 262–271 [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., Holub, D. V., et al. (2021). Features of studying the efficiency of transport systems at different stages of the life cycle. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 1(13), 15–16 [in Ukrainian].
6. Aulin, V. V., Holub, D. V., Hrynkiv, A. V., et al. (2022). Justification of the level of competition on urban passenger routes. *Central Ukrainian National Technical University Bulletin*, 6(37), Part 2, 89–98 [in Ukrainian].
7. Bosniak, M. H. (2009). *Passenger road transportation*. Kyiv: Publishing House “Slovo”, 272 p. [in Ukrainian].
8. Volobuieva, T. V., Syrota, V. M., Mastepan, S. M., et al. (2024). Formation of conditions for efficient functioning of the transport system of a motor transport enterprise. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 1(19), 21–28 [in Ukrainian].
9. Holub, D. V. (2022). Theoretical model of the transport system as a set of interacting and transforming elements and subsystems. *Central Ukrainian National Technical University Bulletin*, 5(36), Part 2, 324–334 [in Ukrainian].
10. Holub, D. V., Aulin, V. V., Bilichenko, V. V., & Zamurenko, A. S. (2022). Implementation of a systems approach in determining the efficiency of functioning of complex regional transport systems. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 15(1), 6–14 [in Ukrainian].
11. Holub, D. V. (2022). Methods and approaches to modeling the effectiveness of operational goals in transport systems. *Central Ukrainian National Technical University Bulletin*, 5(36), Part 1, 317–327 [in Ukrainian].
12. Holub, D. V., Bilichenko, V. V., Aulin, V. V., et al. (2024). Methodological approach to solving the problem of reliability of automotive transport systems functioning. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 19(1), 48–57 [in Ukrainian].
13. Horbachov, P. F. (2009). *Modern scientific approaches to the organization of urban passenger transport operation*. Kharkiv: KhNADU, 196 p. [in Ukrainian].
14. Horiainov, O. M. (2004). Influence of technical and operational indicators of motor transport operation on the efficiency of the logistics system. Extended abstract of candidate’s thesis. Kyiv: National Transport University, 17 p. [in Ukrainian].
15. Ge, L., Vob, S., & Xie, L. (2022). Robustness and disturbances in public transport. *Public Transport. Planning and Operations*, 14, 191–261 [in English].
16. Ivanilov, O. S., Dmytriiev, I. A., & Shevchenko, I. Yu. (2017). *Economics of motor transport enterprises*. Kharkiv: FOP Brovin O. V., 632 p. [in Ukrainian].
17. Koretska, S. O., Yakymchuk, A. Yu., & Karpan, T. S. (2012). *Economics of road transport*. Rivne: NUVHP, 309 p. [in Ukrainian].
18. Podvalna, H., Bochko, O., Kuziak, V., et al. (2021). Economic efficiency of road transport vehicles of fleet and its impact on commercial indices and production plan of a motor transport enterprise. *E3S Web of Conferences*, 234(4), 00056, 1–11 [in English].
19. Khavruk, V. O. (2022). Assessment of reserves for improving the efficiency of the use of the rolling stock of a motor transport enterprise. *Science and Transport Progress*, 2(98), 17–25 [in Ukrainian].
20. Zhou, Y., & Zheng, R. (2024). Capacity-based daily maintenance optimization of urban bus with multi-objective failure priority ranking. *Reliability Engineering & System Safety*, 244, 109–124 [in English].

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Nataliia Zamkova**, **Diana Chorna**
Central Ukranian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of the Approach to the Technical and Economic Evaluation of Vehicle Operation Efficiency on Urban Routes Considering their Operational Condition

The article considers an aктyal scientific and practical problem of assessing the efficiency of urban bus operation taking into account their accumulated mileage from the beginning of operation. It has been established that insufficient study of the patterns of efficiency change during the aging process of rolling stock complicates the selection of a rational bus fleet structure and the determination of economically feasible replacement periods. It is substantiated that with increasing mileage there is a gradual deterioration of the technical condition of buses, a

decrease in the coefficient of technical readiness, an increase in the number of failures and downtime in maintenance and repair, which leads to higher operating costs and a decrease in the overall efficiency of their use.

Modern approaches to assessing the efficiency of rolling stock operation are analyzed, including models for determining the optimal service life of buses based on operational reliability, changes in costs, and residual value. The limitations of existing methods are identified, which consist in insufficient consideration of profitability, the complexity of determining the discount rate, and the subjectivity of assessing the consumer attractiveness of vehicles. An improved approach to technical and economic assessment is proposed, based on an integral efficiency indicator that takes into account reduced costs, transport work volumes, residual value, market conditions, and operational characteristics of buses.

Based on experimental data, a comparative analysis of the operation of buses of different models in urban conditions is carried out using the example of the city of Kropyvnytskyi. The dependence of specific costs for maintaining operability on mileage is studied, and it is established that after reaching a mileage of about 350 thousand km, a significant increase in these costs occurs. It is found that foreign-made buses are characterized by more stable technical condition indicators, although they have higher maintenance costs, while domestic models are less stable but have lower initial costs.

It is emphasized that the efficiency of rolling stock operation should be assessed comprehensively, not only in terms of costs, but also taking into account profit and productivity. The proposed approach makes it possible to more reasonably determine the feasibility of further operation or replacement of buses, which will contribute to optimizing the structure of the rolling stock fleet, increasing the economic efficiency of transportation, and reducing the costs of motor transport enterprises.

efficiency of operation, buses, mileage, technical reliability, specific costs, rolling stock, service life, technical and economic assessment, transport work, optimization

Одержано (Received) 30.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 656.02:656.073 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).383-397

Д.О. Кульова, д-р філос., **А.В. Гриньків**, ст. дослід., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: d.coolava@gmail.com, avgrinkiv@gmail.com

Виявлення та аналіз перешкод у застосуванні мультимодальних технологій в логістиці вантажних перевезень

Європейська Комісія звертає основну увагу на вдосконалення мультимодальних вантажних перевезень, щоб зменшити проблеми, що пов’язані з екологією, заторами, а також досягти всіх цілей, які визначені у Паризькій угоді. Стимулювання мультимодальності не дає значних результатів, через те, що більшість вантажних перевезень продовжують здійснюватися автомобільним транспортом. За таких умов необхідно визначити основні проблемні питання, пов’язані з мультимодальними перевезеннями у логістичних послугах, а також розробити рекомендації для їх вирішення.

Перешкоди для розвитку мультимодальних вантажних перевезень аналізуються комплексно з використанням математичного та структурного моделювання. Визначено основні перешкоди розвитку мультимодальності, які пов’язані з: попитом, характером відправлень вантажів, інфраструктурою, низькою пропозицією, неналежною організацією транспортного процесу із законодавством та ін.

Розроблено орієнтовані на користувача необхідні заходи для підтримки мультимодальних перевезень, використовуючи підхід «знизу догори». Показано, що участь логістичних компаній сприяє прийняттю запропонованих заходів. Формування економічної ефективності, аналіз та обробка логістичної інформації та підготовка кваліфікованого персоналу або підвищення обізнаності в логістичних колах, в роботі визначені як заходи, що мають значний вплив на стимулювання мультимодальних перевезень.

мультимодальне перевезення, вантажні перевезення, перешкода, інтерпретаційне структурне моделювання, транспортно-логістична система

© Д. О. Кульова, А. В. Гриньків, 2026

Постановка проблеми. Вантажні перевезення автомобільним транспортом (АТ) мають більший темп розвитку, ніж перевезення іншим видом транспорту, в той же час даний вид транспорту має негативні екологічні показники. До того ж проблеми з заторами постійно збільшуються, що створює значні витрати на розвиток інфраструктури. Можливим вирішенням даної проблеми є реалізація мультимодальних вантажних перевезень. Основна концепція мультимодальних вантажних перевезень була запропонована для зниження екологічного впливу АТ шляхом перевезення значних партій вантажів залізничним або водним транспортом. Мультимодальні перевезення (ММП) – це перевезення вантажів щонайменше двома різними видами транспорту. З метою комбінованого використання декількох видів транспорту можна реалізувати сильні сторони кожного виду транспорту та знизити слабкий вплив кожного з них. Таким чином, економічна ефективність і стабільність залізничного та водного транспорту повинні також поєднуватися з гнучкістю та швидкістю АТ.

Від моменту появи концепції ММП країни Європейського Союзу (ЄС) докладали значні зусилля для розвитку таких перевезень, оскільки вони є ключовими ланками в боротьбі зі зростанням викидів парникових газів при реалізації перевізного процесу. ЄС виявив загрозливу ситуацію дисбалансу між транспортною роботою в різних видах транспорту, а також розробив низку заходів для вирівнювання цього дисбалансу, таких як: зміна ціноутворення, збільшення інвестицій, що спрямовані на збільшення частки сталих видів транспорту та економічної ефективності логістики європейських країн. Слід зазначити, що європейський логістичний ринок в останній час створює всі умови, щоб забезпечити всіх заходів розвитку мультимодальності. Така увага свідчить про те, що ММП є ефективним способом для підвищення якості та продуктивності транспортних систем.

Розглядаючи окремі проблемні питання ММП, такі як регулювання залізничного транспорту, вагонні системи, транспортний менеджмент, необхідно впроваджувати системний підхід. Даний підхід є ефективним для розроблення рекомендацій, які пропонують впровадження інтегрованих рішень в транспортні системи логістики. Відповідно, першим проблемним питанням є: виявлення ключових перешкод для розширення ММП і визначення, як вони пов’язані між собою.

Розробка та розвиток алгоритмів моделювання логістичних систем з ММП є важливим інструментом для виявлення та вивчення взаємозв’язків між проблемними питаннями ринку та управління в компаніях з ММП. Під час реалізації даних алгоритмів можливо відобразити важливі структурні взаємодії та сформувати ієрархію між виявленими перешкодами розвитку даного виду перевезень. Розроблені методи слід використовувати під час розробки рішень стратегічних заходів, що дає можливість підтримати впровадження та реалізацію ММП різних видів вантажів. Розробка стратегічних рішень для запровадження ефективних заходів, що розвивають мультимодальність в логістичних ланцюгах, потребує виявлення основних вимог та потреб споживачів логістичних послуг в ММП, в більшості випадків логістичних компаній України.

Також необхідно розглянути питання основних стратегічних заходів, що допоможуть логістичним компаніям України розвивати логістичні ланцюги ММП. При цьому застосовується підхід «знизу догори» за участю логістичних операторів та кількох інших учасників ММП. Залучення логістичних компаній України дає можливість розробити заходи, що будуть орієнтовані на користувачів логістичних послуг та адаптовані до потреб тих, хто безпосередньо впроваджує ММП на практиці. Оскільки логістичні компанії України є важливими учасниками перевізного процесу та мають значні бази даних, вони можуть суттєво коригувати різні процеси та реалізовувати стратегічні рішень в даному напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових дослідженнях вантажних перевезень значна увага приділяється питанням функціонування транспортно-логістичних систем (ТЛС) та підвищенню ефективності перевізного процесу загалом, що формує теоретичне підґрунтя для організації ММП. Зокрема, розглядаються підходи до удосконалення технологій перевезення вантажів у контейнерах [1], у т.ч. температурно чутливих вантажів у рефрижераторних контейнерах [2], що є важливим з огляду на необхідність забезпечення безперервності умов транспортування та збереження вантажу при зміні видів транспорту в межах мультимодальних транспортних ланцюгів.

У ряді досліджень розглядаються питання перевезення вантажів, зокрема небезпечних [3], у яких обґрунтовано вибір більш безпечних маршрутів перевезення [4], здійснено оцінювання ризиків при реалізації перевізного процесу [5] та визначено превентивні заходи щодо забезпечення високого рівня безпеки при виконанні перевезень [6, 7]. Зазначене дозволяє враховувати особливості використання різних видів транспорту, проте не в повній мірі охоплює питання їх взаємодії

У роботі [8] висвітлено особливості функціонування транспортно-логістичних терміналів та проаналізовано параметри їхньої роботи. Основну увагу зосереджено на організації процесів у вузлових точках, де відбувається взаємодія елементів транспортної системи та забезпечується безперервність переміщення вантажів.

Теоретичні та методологічні основи організації роботи логістичних систем, а також закономірності функціонування транспортної інфраструктури відображено у роботі [9], що дозволяє розглядати перевезення як складну інтегровану систему взаємопов’язаних процесів. Питання формування та функціонування логістичних центрів у ТСЛ досліджено у роботі [10], де визначено їхня роль як ключових елементів інфраструктури, що забезпечують взаємодію різних видів транспорту та обслуговування вантажопотоків. Разом із тим наведені дослідження переважно зосереджені на окремих аспектах функціонування ТЛС, технологіях перевезення та організації перевізного процесу. У той же час у науковій літературі приділяється увага питанням мультимодальних, інтермодальних та комбінованих перевезень, що розглядаються як форма інтеграції різних видів транспорту в межах єдиного перевізного процесу. Так, у роботі [11] досліджено вплив розвитку мультимодальних перевезень на внутрішні та міжнародні транспортні процеси. Встановлено їхній позитивний ефект, більш виражений для міжнародних перевезень, а також визначено відмінності залежно від виду транспорту та регіону країни.

У роботі [12] проаналізовано розвиток ММП зерна та їх роль у підвищенні ефективності логістичних систем. Встановлено, що мультимодальні перевезення забезпечують підвищення ефективності маршрутів, узгодження роботи різних видів транспорту та стійкість ланцюгів постачання. Також узагальнено наявні технічні обмеження та окреслено напрями подальших досліджень.

Математичну модель маршрутизації перевезень різних видів вантажів в інтермодальній мережі за умов збурень представлено в роботі [13]. Модель спрямована на мінімізацію операційних витрат, витрат на перевалку в терміналах, а також витрат, пов’язаних із неможливістю виконання перевезень у повному обсязі. Отримані результати показали, що в умовах збурень доцільним є використання автомобільно-залізничних інтермодальних перевезень завдяки можливості застосування альтернативних маршрутів.

В роботі [14] розглянуто організацію міжнародних мультимодальних перевезень вантажів у діяльності транспортно-експедиторських підприємств. Запропоновано імітаційну модель, яка дозволяє оптимізувати процес обслуговування перевезень з урахуванням тривалості операцій, затримок та помилок. Встановлено, що застосування

моделі сприяє скороченню часу обслуговування та підвищенню ефективності організації мультимодальних перевезень.

Таким чином, аналіз останніх досліджень у цьому напрямі свідчить про те, що вони присвячені окремим аспектам функціонування ТЛС та реалізації мультимодальних вантажних перевезень. Водночас недостатньо уваги приділено комплексному дослідженню виявлення та аналізу проблем розвитку ММП з урахуванням потреб замовників та організаційних особливостей перевізного процесу.

Метою роботи є формулювання початкових етапів розвитку та аналізу перешкод реалізації мультимодальних вантажних перевезень, для науково обґрунтованого підґрунтя та подальшої практичної реалізації у сфері транспортної логістики.

Для реалізації мети визначене розв'язання наступних завдань:

– сформувати основні методи дослідження та виявлення перешкод розвитку мультимодальних вантажних перевезень;

– розробити інтерпретативну модель виявлення та аналізу перешкод мультимодальних вантажних перевезень;

– виявити рівні впливу перешкод на розвиток мультимодальних технологій в логістиці вантажних перевезень.

Виклад основного матеріалу. В дослідженні розвитку мультимодальних вантажних перевезень основна структура формується на інтерпретативному структурному моделюванні (ICM) [15]. Це дає змогу виявити та класифікувати перешкоди ММП і на основі цього сформувати початкові умови для розвитку мультимодальності у вантажних логістичних перевезеннях (рис. 1). Щоб виявити перешкоди, які значно впливають на споживачів транспортної логістики, та розробити відповідні рішення зниження впливу даних перешкод на розвиток мультимодальних транспортних ланцюгів, було використано підхід «знизу догори». У межах реалізації такого роду підходу проаналізовано логістичні провайдери у форматі багаторазового дослідження відмов від мультимодальних перевезень.



Рисунок 1 – Структура виявлення перешкод розвитку мультимодальних вантажних перевезень
Джерело: розроблено авторами

У сучасній міжнародній практиці відсутній єдиний чинний нормативно-правовий акт, який би комплексно регулював ММП. Натомість правове регулювання здійснюється на основі сукупності міжнародних конвенцій, що застосовуються залежно від виду транспорту. Для автомобільних перевезень – це Конвенція про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів (Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road, CMR), для залізничних – Конвенція про міжнародні залізничні перевезення (Convention concerning International Carriage by Rail, COTIF), зокрема Єдині правила перевезення вантажів залізницею (Uniform Rules Concerning the Contract of International Carriage of Goods by Rail, CIM), для морських – міжнародні конвенції у сфері морських перевезень (коносаментні режими).

У межах одного перевезення можуть одночасно застосовуватися різні правові режими, що зумовлює фрагментарний характер регулювання. Спроба уніфікації підходів до організації мультимодальних перевезень на міжнародному рівні була здійснена в межах Конвенції ООН про міжнародні мультимодальні перевезення вантажів. У зазначеному документі мультимодальне перевезення визначається як перевезення вантажів із використанням двох або більше видів транспорту на підставі єдиного договору мультимодального перевезення, що укладається між замовником та оператором ММП [16]. При цьому оператор виступає відповідальною особою за виконання перевезення на всьому маршруті незалежно від кількості залучених видів транспорту. Однак зазначена Конвенція не набула чинності, хоча її концептуальні положення, зокрема щодо єдиного договору та єдиної відповідальності логістичного оператора, отримали подальший розвиток у національному законодавстві країн та практиці. Зокрема, у Законі України «Про мультимодальні перевезення» [17] закріплено підхід до здійснення ММП на основі єдиного договору мультимодального перевезення.

Термінологічні засади ММП визначаються у документі Європейської економічної комісії ООН (UNECE) Terminology on Combined Transport, який має рекомендаційний характер і містить термінологічні визначення, що відображають технологічні особливості організації перевезень [18]. ММП розглядається як перевезення вантажів із використанням двох або більше видів транспорту, інтермодальне – як перевезення в межах однієї вантажної одиниці без перевантаження самого вантажу, а комбіноване – як різновид інтермодального перевезення (у законодавстві України, як різновид мультимодального), у якому основна частина маршруту здійснюється залізничним, внутрішнім водним або морським транспортом, а початкові та/або кінцеві ділянки автомобільним транспортом на короткі відстані.

Загалом значна кількість менеджерів із компаній транспортної логістики вантажних вантажів погодилися брати участь в онлайн інтерв'ю, що стосувалися питання розвитку мультимодальності логістичних ланцюгів. Інформацію про основні компанії представники яких брали участь в онлайн інтерв'ю наведено в таблиці 1. Процес вивчення експертних даних та потреб логістичних транспортних компаній проводився значний період часу. За даний час, детально досліджено перспективу мультимодальності вантажних перевезень, сформовано чітке розуміння перешкод та можливостей розвитку ММП.

Для проведення онлайн інтерв'ю окремо з кожною групою або одним представником компаній що займаються ММП було також розіслано запрошення підприємствам, які брали участь у окремих різнорідних кейс‑дослідженнях логістичних послуг, але й представників інших груп стейкхолдерів, залучених до впровадження та просування ММП. Це було зроблено для того, щоб розширити дискусію онлайн інтерв'ю та забезпечити додаткові точки зору від інших учасників логістичного ринку. До фокус ‑ груп також увійшли представники інфраструктурних операторів

(залізничних та внутрішніх водних шляхів), вантажовідправники, науково‑дослідні організації.

Загалом від 3 до 5 учасників взяли участь у першій фокус‑групі, присвяченій аналізу контекстуальних взаємозв'язків між перешкодами мультимодальності вантажних перевезень, а 5 учасників – у другій фокус‑групі, спрямованій на розробку методичного апарату аналізу основних перешкод розвитку мультимодальних транспортних перевезень. В подальшому було детально описано та розроблено інструменти інтерпретативної структурної моделі виявлення перешкод мультимодальності в ланцюгах вантажних перевезень, а також подається опис ІСМ.

Таблиця 1 – Основні характеристики логістичних компаній, представники яких брали участь в онлайн опитуванні, з питань можливості аналізу та розвитку мультимодальних ланцюгів доставки вантажів

№	Компанії, що забезпечують мультимодальні перевезення в Україні	Посада респондента	Розмір компанії	Основні види транспорту та послуги	Частка транспортних операцій, виконаних у мультимодальному форматі
1	2	3	4	5	6
1	Daleth Group	Генеральний директор; керівник філії; керівник підрозділу (за видами транспорту); Керівник з управління ризиками та логістики.	Середня (стабільний клієнтський набір, регіональна присутність)	Автомобільний, морський, залізничний	15–20% (компанія працює з контейнерними потоками та міжнародними перевезеннями)
2	Zammler		Велика (одна з найбільших в Україні)	Автомобільний, авіаційний, морський, залізничний, складська логістика.	35–45% (компанія розвиває мультимодальні маршрути ЄС і Китаю)
3	DSV Ukraine		Велика (одна з найбільших в Україні)	Автомобільний, авіаційний, морський, залізничний, інтермодальні ланцюги.	25-30% (компанія розвиває глобальну логістичну мережу)
4	Wingo		Мала (має чудові регіональні рішення)	Автомобільний, залізничний.	5-10% (компанія в основному опирається на автоперевезення і високу логістичну мобільність)
5	SYNEX Logistics		Середня (стабільний клієнтський набір, регіональна присутність)	Автомобільний, морський, залізничний.	12-18% (компанія працює з контейнерними перевезеннями та логістикою e-commerce)

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6
6	Ekol Ukraine		Велика (представник турецької Ekol Logistics).	Автомобільний, морський, залізничний, інтермодальні ланцюги.	30-35% (компанія одна з найбільших мультимодальних операторів у Європі)
7	KST Group		Середня (стабільний клієнтський набір, регіональна присутність)	Автомобільний, морський, залізничний.	10-15% (компанія працює з контейнерними перевезеннями, але мультимодальність не основний профіль)
8	Ally Logistic		Мала (має чудові регіональні рішення)	Автомобільний, морський,	5-10% (компанія працює з контейнерними перевезеннями, але мультимодальність не основний профіль)
9	AsstrA		Велика (міжнародна група).	Автомобільний, морський, авіаційний, залізничний, інтермодальні ланцюги.	25-40% (компанія працює з контейнерними та інтермодальними сервісами
10	UTEC Logistics		Середня (стабільний клієнтський набір, регіональна присутність)	Автомобільний, морський, залізничний.	10–15% (компанія постійно реалізує мультимодальні перевезення)

Джерело: розроблено авторами

Першим етапом побудови інтерпретативної структурної моделі є визначення елементів моделі перешкод розвитку мультимодальності. Для їх ідентифікації було проведено ґрунтовний огляд досліджень даного напрямку. Опираючись на них було сформовано блоки основних питань для онлайн інтерв'ю з представниками компаній (табл. 2).

Таблиця 2 – Основні блоки питань для представників компаній, що займаються мультимодальними перевезеннями

№	Блоки питань та їх сутність
1	2
I Оцінка ефективності мультимодальних перевезень:	
1	Як ви оцінюєте ефективність реалізації мультимодальних вантажних перевезень на коротких відстанях у вашій компанії?
2	Які мінімальні обсяги вантажу дають можливість мультимодальним ланцюгам бути економічно доцільними для вашої компанії?
3	Наскільки мультимодальні рішення придатні для термінових або чутливих до часу вантажів?
4	Які типи вантажів у вашій компанії найменш підходять для мультимодальних перевезень?
II Оцінка можливостей транспортної інфраструктури для мультимодальних вантажних перевезень:	

№	Блоки питань та їх сутність
1	2
1	Наскільки якість транспортної інфраструктури впливає на мультимодальні маршрути у вашій компанії?
2	Чи достатня кількість та зручність сервісів (залізничних, морських, інтермодальних) для реалізації мультимодальних ланцюгів перевезень?
3	Які інфраструктурні обмеження найбільше стримують розвиток мультимодальності у вашій компанії?
4	Наскільки критичною є проблема взаємної сумісності між різними видами транспорту у логістичних ланцюгах вашої компанії?
5	Які інфраструктурні інвестиції, на вашу думку, дали б найбільший ефект для мультимодальних вантажних перевезень?
III Організаційні та операційні перешкоди в транспортних компаніях	
1	Наскільки мультимодальні перевезення збільшують організаційне навантаження на ваших співробітників?
2	Як мультимодальні перевезення впливають на гнучкість компанії в операційній діяльності?
3	Які внутрішні процеси довелося змінити для роботи з мультимодальними ланцюгами вантажних перевезень?
4	Чи відчуваєте ви недостатню координацію між учасниками ланцюга постачання підчас реалізації мультимодальних перевезень?
5	Які цифрові інструменти найбільше допомагають зменшити складність мультимодальних операцій?
IV Ринкові та клієнтські фактори в мультимодальних ланцюгах вантажних перевезень	
1	Як клієнти сприймають мультимодальні перевезення порівнюючи з автоперевезеннями?
2	Чи зустрічали ви випадки відмови клієнтів від мультимодальних перевезень через недовіру до їх ефективності або негативне сприйняття?
3	Які аргументи найкраще переконують клієнтів обирати мультимодальні перевезення?
4	Наскільки сильно цінова конкуренція та мобільність з боку автотранспорту впливає на реалізацію мультимодальних перевезень?
5	Який сектор клієнтів найактивніше переходить та користується мультимодальними перевезеннями?
V Регуляторні та нормативні перешкоди в мультимодальних перевезеннях	
1	Які регуляторні вимоги та умови найбільше ускладнюють мультимодальні перевезення?
2	Чи впливає відсутність міжнародних технічних стандартів у різних видах транспорту на вашу діяльність?
3	Наскільки складною є взаємодія з митними та адміністративними органами?
4	Як державне регулювання в різних видах транспорту впливає на ваші мультимодальні сервіси?
5	Які зміни в законодавстві могли б найбільше стимулювати розвиток мультимодальності в логістиці?
VI Особливості стратегії розвитку мультимодальності в логістиці України	
1	Які ключові фактори визначають доцільність запуску нового мультимодального маршруту?
2	Як ви оцінюєте потенціал зростання мультимодальних перевезень у вашій компанії до 2035 року?
3	Які партнерства і взаємодія (залізниця, порти, термінали) є найбільш критичними для розвитку вашої компанії?
4	Чи плануєте ви здійснювати інвестиції у власні мультимодальні потужності і проекти (контейнери, трейлери, термінальні рішення)?
5	Які технології в транспортній логістиці, на вашу думку, найбільше вплинуть на розвиток мультимодальних ланцюгів вантажних перевезеннях у найближчі 5 років?
6	Які головні перешкоди ви вважаєте пріоритетними для усунення на рівні логістичного ринку або національного, регіонального масштабу?

Джерело: розроблено авторами

Кожне інтерв'ю за цими питаннями записувалося та згодом транскрибувалося інтерв'юером. Тривалість розмов становила приблизно 20–35 хвилин, загалом було зібрано понад 5 годин аудіоматеріалів. Після всіх інтерв'ю було сформовано практичну базу даних кожного з досліджуваних питань. Перелік ідентифікованих блоків перешкод розвитку мультимодальних ланцюгів доставки вантажів наведено рисунку 2.



Рисунок 2 – Основні поточні блоки перешкод розвитку мультимодальності в ринку логістики
Джерело: розроблено авторами

Після визначення основних блоків перешкод наступним етапом є встановлення контекстуальних взаємозв'язків між даними блоками. Сформована фокус-група провела оцінювання взаємозв'язків між визначеними блоками перешкод, які відображено на рисунку 2 шляхом розроблення структурної матриці взаємодії, яка наведена у таблиці 3.

Таблиця 3 – Матриця структурної взаємодії блоків перешкод розвитку мультимодальних ланцюгів перевезення

i \ J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		δ	δ	β	β	β	β	δ	α	β	β	β	β	β	β
2			δ	β	β	β	β	δ	α	β	β	β	β	β	β
3				β	β	β	β	δ	α	β	β	β	β	β	β
4					α	α	δ	δ	α	β	β	γ	δ	δ	β
5						γ	β	β	β	0	β	β	δ	β	β
6							δ	β	α	β	γ	β	δ	γ	β
7								δ	α	δ	δ	α	δ	δ	δ
8									α	γ	α	δ	γ	α	γ
9										β	β	β	β	β	β
10											α	α	δ	γ	β
11												γ	δ	δ	β
12													δ	δ	β
13														γ	β
14															γ
15															

Джерело: розроблено авторами

Разом із експертами, які погодилися взяти участь та були добровольцями в даному досліджені, вони безпосередньо брали участь у організації мультимодальних маршрутів доставки вантажів компаній-учасників та науково-дослідних підрозділів. Експерти проводили оцінку наявності взаємозв'язків між будь-якими попарними перешкодами, а також характер цього взаємозв'язку з відображенням їх в матриці структурної взаємодії блоків.

Підчас реалізації ІСМ використовуються чотири символи для позначення типу взаємозв'язку між елементами в межах структурної матриці взаємодії. Експерти розподіляють вплив перешкод відповідно до їх досвіду та практичного результату в компаніях. Матриця в кінцевому варіанті формується за найбільш точною реалізацією і врахуванні всіх думок експертів. В матриці є наступні варіанти впливу перешкод: α - перешкода *i* впливає на перешкоду *j*; β – перешкода *j* впливає на перешкоду *i*; γ – перешкоди *i* та *j* взаємно впливають одна на одну; δ – перешкоди *i* та *j* не пов'язані між собою.

На наступному етапі аналізу первісну матрицю структурної взаємодії необхідно перетворити у матрицю досяжності шляхом заміни символів α, β, γ та δ на бінарні значення 0 і 1 за відповідними правилами. Матрицю досяжності формується за наступними правилами:

Правило 1: якщо елемент (i, j) у матриці структурної взаємодії блоків перешкод дорівнює α, тоді елемент (i, j) у матриці досяжності стає – 1, а елемент (j, i) – 0;

Правило 2: якщо елемент (i, j) у матриці структурної взаємодії блоків перешкод дорівнює β, тоді елемент (i, j) у матриці досяжності стає – 0, а елемент (j, i) – 1;

Правило 3: якщо елемент (i, j) у матриці структурної взаємодії блоків перешкод дорівнює γ, тоді елемент (i, j) у матриці досяжності стає – 1, і елемент (j, i) також стає – 1.

Правило 4: якщо елемент (i, j) у матриці структурної взаємодії блоків перешкод дорівнює δ, тоді елемент (i, j) у матриці досяжності стає – 0, і елемент (j, i) також стає – 0.

Результати перетворень представлено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Матриця досяжності впливу на розвиток мультимодальності логістичних ланцюгів

j / i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Сила впливу
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
4	1	1	1	1	1	1*	0	0	1	0	1*	1	0	1*	0	7
5	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1*	0	1*	1*	0	6
6	1	1	1	1*	1	1	0	1*	1	1*	1	1*	1	1	1*	9
7	1	1	1	1*	1	1*	1	0	1	0	1*	1	0	1*	0	7
8	1*	1*	1*	1*	1	1	0	1	1	1	1	1*	1	1	1	9
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
10	1	1	1	1	1*	1	0	1	1	1	1	1	1*	1	1*	11
11	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1*	1*	0	9
12	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1*	1	1	1*	1	1*	10
13	1	1	1	0	1*	1	0	1	1	1*	1*	1*	1	1	1*	8
14	1	1	1	1*	1	1	0	1*	1	1	1*	1	1	1	1	11
15	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	14
Залежність	11	11	11	5	9	9	1	4	15	4	6	7	5	7	3	
Транзис-тивність	1	1	1	4	2	2	0	2	0	3	5	3	4	4	4	

Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що матриця досяжності впливу на розвиток мультимодальності логістичних ланцюгів отримується з урахуванням транзитивності у взаємозв'язках перешкод. Транзитивність означає, що між перешкодами *i* та *j* є непрямий зв'язок через інший елемент *k*. Це означає, що *i* впливає на *k*, а *k* впливає на *j*, і тому елемент (i, j) у фінальній матриці досяжності позначається як 1*. Найбільш транзистивними проблемами є: недостатній розвиток інфраструктури (термінали, під'їзні колії тощо); низька щільність мережі для ММП; адміністративні перешкоди в компаніях; відсутність координації; державне регулювання залізничного транспорту. Дані проблеми можуть відображати вплив інших проблем на розвиток мультимодальних вантажних перевезень.

Матриця досяжності описує повну систему причинно-наслідкових зв'язків між перешкодами розвитку ММП, яка включає прямі та непрямі причинно-наслідкові (транзитивні) зв'язки, коли одна перешкода впливає на іншу через посередництво третьої перешкоди. В даній матриці також відображається наскільки перешкода є впливовою шляхом відображення кількості перешкод які саме вона спричиняє. А також за даною матрицею можливо визначити залежність перешкод, а саме можливо визначити скільки інших перешкод впливають на конкретну перешкоду розвитку ММП. Транзистивність перешкод також дає розуміння які перешкоди мають найбільше зв'язок, які породжують базові перешкоди.

На основі матриці досяжності впливу на розвиток мультимодальності логістичних ланцюгів можна визначити множину впливу перешкоди, множину попередників перешкоди та множину перетину в перешкоді для кожної конкретної перешкоди, що було виявлено на рисунку 2, з використанням ІСМ. Множина впливу перешкоди включає елемент або сукупність елементів, на які він може впливати. Множина попередників перешкоди включає саму перешкоду та всі інші перешкоди, які впливають на неї. Множина перетину в перешкоді складається з елементів, що одночасно входять і до множини впливу перешкоди і до множини попередників перешкоди. Всі відповідні вище зазначені множини перешкод відображено в таблиці 5.

Щоб визначити рівень перешкоди, потрібно порівняти множину впливу перешкоди та множину перетину в перешкоди для певної перешкоди, якщо дані множини співпадають, цій перешкоді призначається рівень І. Потім дану перешкоду видаляють з всіх множин таблиці і повторюють аналіз, якщо є інші співпадаючі множини, то відповідній перешкоді призначають рівень ІІ. Процес повторюється таку кількість разів, поки всі елементи не будуть розподілені за рівнями.

Таблиця 5 – Множини та рівні впливу перешкод

№ переш-коди	Множина впливу на перешкоди	Множина попередників перешкоди	Множина перетину в перешкоді	Рівень
9	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	9	I
1	1, 9	1, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	1	II
2	2, 9	2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	2	II
3	3, 9	3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	3	II
5	1, 2, 3, 5, 6, 9, 11, 13, 14	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	5, 6, 11, 13, 14	III
11	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15	4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	4, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 15	III
12	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15	4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	4, 6, 11, 12, 13, 14, 15	III

№ перешкоди	Множина впливу на перешкоди	Множина попередників перешкоди	Множина перетину в перешкоді	Рівень
13	1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15	III
14	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15	4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15	III
4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 14	4, 6, 11, 12, 14, 15	4, 6, 11, 12, 14	IV
8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	8, 10, 13, 14, 15	8, 10, 13, 14, 15	IV
6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	6	6, 10, 11, 12, 13, 14, 15	V
7	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 14	7	7	V
10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	10, 13, 14, 15	10, 13, 14, 15	V
15	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	6, 8, 10, 12, 13, 14, 15	6, 8, 10, 12, 13, 14, 15	V

Джерело: розроблено авторами

Дані таблиці 5 та застосування алгоритмів ІСМ дає можливість виявити множини впливів на перешкоду та множини попередніх перешкод. Натомість множина перетинів в перешкоді буде відображати спільні елементи між впливами та попередниками. Рівень в даній таблиці відображає ієрархічний рівень перешкоди в блоках перешкод розвитку мультимодальних вантажних перевезень на логістичному рівні України. В свою чергу рівень перешкоди І перешкода № 9, яка не має попередників, цей рівень відображає найбільш незалежну перешкоду. Рівні II-V перешкоди №№ 1-8,10-15 відображають поступове зниження відповідно по ієрархії, де перешкоди в свою чергу є значно більш залежними. Результати дослідження свідчать, що дана таблиця вкрай необхідна для аналізу ієрархії перешкод, що впливають на мультимодальні вантажні перевезення провідних компаній України. Також встановлені рівні перешкод можуть відображати: ключову перешкоду (рівень І): перешкода №9, проміжні перешкоди (рівні II-III): перешкоди №№1-3,5, 11-14, а також перешкоди, які формуються по наслідкам попередніх перешкод (рівні IV-V): перешкоди №4,8,6,7,10,15.

В свою чергу, перешкода №9 (рівня І) є системоутворювальною перешкодою в розвитку мультимодальних маршрутів вантажних перевезень транспортних компаній України. Дана перешкода запускає інші перешкоди в сформованій системі. Перешкода № 9 є драйвером перешкод розвитку мультимодальних перевезень вантажів, а тому саме з неї необхідно починати працювати і оптимізувати. Перешкоди №1-3 являються ключовими проміжними драйверами, які безпосередньо залежать від перешкоди на рівні І. Вони мають значний вплив на переважну частину сформованих перешкод розвитку.

Критичними для управління, в свою чергу, є перешкоди № 1-3, дані перешкоди відображають та збільшують основу середньорівневих проблем розвитку мультимодальності вантажних маршрутів перевезення. Перешкоди №№5,11-14 є середньорівневими системними перешкодами, які формуються через базову комбінацію перешкод рівнів І-ІІ. Зону тактичного управління мультимодальними вантажними перевезеннями формують перешкоди №№ 5, 11-14, над ними потрібно працювати на верхніх рівнях перешкод. Перешкоди №№4, 8 є наслідковими перешкодами рівнів І-ІІІ, які неможливо усунути без проробленої роботи з перешкодами вищих рівнів. Перешкоди №№6, 7, 10, 15 є симптоматичними перешкодами, виявлення розбалансування мультимодальних перевезень і збільшення проблематичних моментів, в операційній діяльності компаній, що застосовують мультимодальні вантажні перевезення. Операційними наслідками запобігання і

негативними маркерами є перешкоди №№ 4, 8, 6, 7, 10, 15. Вони мають щоденний характер з якими постійно стикається менеджмент мультимодальних вантажних перевезень. Стратегічний вплив на них не дасть в довготривалій перспективі бажаного результату розвитку мультимодальності вантажних перевезень українських транспортних компаній.

Висновки:

1. З'ясовано, що не існує єдиного чинного нормативно-правового акту, який би комплексно регулював мультимодальні перевезення в міжнародному сполученні. Виявлено, що правове регулювання здійснюється на основі сукупності міжнародних конвенцій, що застосовуються залежно від виду транспорту, зокрема: Конвенція про договір міжнародного автомобільного перевезення вантажів, Конвенція про міжнародні залізничні перевезення, зокрема Єдині правила СІМ, та коносаментні режими для морських перевезень. Тому важливо враховувати, що у межах одного мультимодального перевезення можуть одночасно застосовуватися різні правові режими транспортування в логістичному ланцюгу.

2. Сформовано структуру дослідження та аналізу перешкод розвитку мультимодальних технологій в логістиці вантажних перевезень та виявлено на ринку України основні транспортні компанії, що безпосередньо мають значну частку логістичного ринку мультимодальних перевезень. З даних компаній було сформовано групу, яка брала участь у окремих інтерв'ю стосовно перешкод розвитку мультимодальних перевезень.

3. Розроблено основні блоки питань для представників компаній, що займаються мультимодальними перевезеннями. Дані питання дали можливість виявити 15 основних поточних блоків перешкод розвитку мультимодальності в ринку логістики українських транспортних компаній.

4. Сформовано матрицю досяжності впливу на розвиток мультимодальності логістичних ланцюгів, матрицю структурної взаємодії блоків перешкод розвитку мультимодальних перевезень та виявлено рівні впливу перешкод на дані перевезення. З відповідних рівнів перешкод було визначено, що проблема негативного сприйняття або відмова з боку вантажовласників є базовою перешкодою розвитку мультимодальних перевезень, а основу середньорівневих проблем формують перешкоди, які пов'язані з неефективністю мультимодальності на коротких відстанях, малих партіях вантажів та термінових доставках вантажів. Визначено, що розробка рекомендацій вирішення даних перешкод потребує подальших системних досліджень.

Список літератури

1. Fesovets O., Strelko O., Berdnychenko Yu., Isaienko S., Pylypchuk O. Container Transportation by Rail Transport Within the Context of Ukraine's European Integration. *Proceedings of 23rd International Scientific Conference «Transport Means 2019»*. 2019. P. 381–386.
2. Kulova D., Boyko M., Kosyakevych D. Assessment of Risk Factors and Improvement of Transportation Technology for Temperature-Sensitive Cargo in Refrigerated Containers. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2026. Issue 13(44). P. 230-240.
3. Lavrukhin O., Kovalov A., Schevcenko 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
4. Lavrukhin O., Kovalov A., Kulova D. Technological and economic estimation of efficiency of a route choice for transportation of dangerous goods. SHS Web of Conferences. 2019. Vol. 67. P. 1-6. DOI: https://doi.org/10.1051/shsconf/20196702005
5. 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.II, С. 205-213. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213
6. Кульова Д.О., Магопець 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.II. С. 298-312. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.278-285
7. Кульова Д.О. Застосування концептуального підходу ризик-менеджменту в сфері безпеки руху на транспорті. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч.I. С. 261-269. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269
8. 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.I. С. 263-271. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.263-271.
9. 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.
10. 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.
11. Wei L., Zheng X., Li Y., Li X., Liu L. Research on the impact effect of multimodal transport on domestic and international dual circulation: Evidence from China's railway and water transport. *PLoS ONE*. 2025. Vol. 20, Issue 4. Article e0319982. P. 1-18. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319982
12. Zhang Z., Jin J., Li S., Han Z., Wu Z., Xu X., Li Y., Peng T. Research review and development trend analysis of grain multimodal transport with a special emphasis upon China. *Agriculture*. 2026. Vol. 16. Article 592. P. 1-35. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture16050592
13. Uddin M. M., Huynh N. Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016. No. 2548. P. 71–80. DOI: https://doi.org/10.3141/2548-09
14. Lebid I., Luzhanska N., Lebid I., Mazurenko A., Roi M., Mykhailenko I., Yelnikova L., Tihov O. Construction of a simulation model of the work of a transport and forwarding enterprise in organizing multimodal cargo transportation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6 No. 3 (132). P. 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316568
15. Jayant A., Azhar M., Singh P. Interpretive structural modelling (ISM) approach: a state of the art literature review. *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*. 2014. Vol. 4, No. 3. P. 15–21.
16. United Nations Conference on a Convention on International Multimodal Transport : Final Act and Convention on International Multimodal Transport of Goods. – New York : United Nations, 1981. Vol. 1. 16 p.
17. Про мультимодальні перевезення : Закон України від 17.11.2021 р. № 1887-IX станом на 19 груд. 2021 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text (дата звернення: 10.03.2026).
18. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Terminology on Combined Transport. New York and Geneva: United Nations, 2000. 13 p.

References

1. Fesovets, O., Strelko, O., Berdnychenko, Y., Isaienko, S., & Pylypchuk, O. (2019). Container transportation by rail transport within the context of Ukraine's European integration. *Proceedings of the 23rd International Scientific Conference "Transport Means 2019"*, 381–386. [in English].
2. Kulova, D., Boyko, M., & Kosyakevych, D. (2026). Assessment of risk factors and improvement of transportation technology for temperature-sensitive cargo in refrigerated containers. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 13(44), 230–240. [in English].
3. 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(98)), 25–31. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163442. [in English].
4. Lavrukhin, O., Kovalov, A., & Kulova, D. (2019). Technological and economic estimation of efficiency of a route choice for transportation of dangerous goods. *SHS Web of Conferences*, 67, 1–6. https://doi.org/10.1051/shsconf/20196702005. [in English].
5. Aulin, V. V., Kulova, D. O., Hrynkiv, A. V., & Lysenko, S. V. (2024). Otsiniuvannia ryzykiv neskhoronnykh perevezen naftoproduktiv avtomobilnym transportom. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 10(41), Part 2, 205–213. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213. [in Ukranian].
6. Kulova, D. O., Mahopets, S. O., & Livitskyi, O. M. (2025). Bezpeka dorozhnoho rukhu v Ukraini: otsiniuvannia ryzykiv i perspektyvy tsyfrovizatsii. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), Part 2, 298–312. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.278-285. [in Ukranian].
7. Kulova, D. O. (2024). Zastosuvannia kontseptualnoho pidkhodu ryzyk-menedzhmentu v sferi bezpeky rukhu na transporti. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 10*(41), Part 1, 261–269. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.261-269 [in Ukranian].
8. Aulin, V. V., Kulova, D. O., & Varvarov, V. V. (2025). Vyiavlennia, analiz i prohnozuvannia parametriv

ryzyku bezvidmovnoho navantazhennia hotovoi produktsii na transportno-lohistychnomu terminali pidpryiemstva. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky, 11*(42), Part 1, 263–271. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.263-271 [in Ukranian].

9. Aulin, V. V., Hrynkiv, A. V., Lysenko, S. V., Holovatyi, A. O., & Holub, D. V. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychykh system* (V. V. Aulin, Ed.). Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V. F. [in Ukranian].
10. 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 lohistychnykh tsentriv v rehionalnykh transportno-lohistychnykh systemakh Ukrainy* (V. V. Aulin & O. L. Liashuk, Eds.). Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukranian].
11. Wei, L., Zheng, X., Li, Y., Li, X., & Liu, L. (2025). Research on the impact effect of multimodal transport on domestic and international dual circulation: Evidence from China's railway and water transport. *PLoS ONE*, 20(4), e0319982. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319982. [in English].
12. Zhang, Z., Jin, J., Li, S., Han, Z., Wu, Z., Xu, X., Li, Y., & Peng, T. (2026). Research review and development trend analysis of grain multimodal transport with a special emphasis upon China. *Agriculture*, 16, Article 592. https://doi.org/10.3390/agriculture16050592. [in English].
13. Uddin, M. M., & Huynh, N. (2016). Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2548, 71–80. https://doi.org/10.3141/2548-09. [in English].
14. Lebid, I., Luzhanska, N., Lebid, I., Mazurenko, A., Roi, M., Mykhailenko, I., Yelnikova, L., & Tihov, O. (2024). Construction of a simulation model of the work of a transport and forwarding enterprise in organizing multimodal cargo transportation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(3 (132), 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316568. [in English].
15. Jayant, A., Azhar, M., & Singh, P. (2014). Interpretive structural modelling (ISM) approach: A state of the art literature review. *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, 4(3), 15–21. [in English].
16. United Nations. (1981). *United Nations Conference on a Convention on International Multimodal Transport: Final act and convention on international multimodal transport of goods* (Vol. 1). United Nations. [in English].
17. Verkhovna Rada of Ukraine. (2021, November 17). *On multimodal transportation (Law No. 1887-IX)*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text. [in Ukranian].
18. United Nations Economic Commission for Europe. (2000). *Terminology on combined transport*. United Nations. [in Ukranian].

Daria Kulova, PhD in transport technology, **Andrii Hrynkiv,** Senior Researcher, PhD tech. sci.
Central Ukranian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Identification and Analysis of Barriers to the Implementation of Multimodal Technologies in Freight Transport Logistics

The European Commission places significant emphasis on the development of multimodal freight transport in order to reduce environmental impacts, alleviate congestion, and achieve the objectives set out in the Paris Agreement. However, the promotion of multimodality has not yielded the expected results, as a substantial share of freight transport continues to be carried out by a single mode, predominantly road transport. This indicates the presence of barriers to the implementation of multimodal technologies in logistics systems.

The barriers to the development of multimodal transport are analyzed comprehensively using mathematical and structural modeling methods. It is determined that the main barriers are associated with demand, shipment characteristics, infrastructure conditions, insufficient supply, organization of the transport process, and regulatory support. The study is based on the analysis of transport companies operating in Ukraine and the results of surveys of their representatives, which made it possible to identify key groups of barriers. A structured approach to the study of barriers is developed, and a system of questions is designed, which enabled the identification of 15 groups of barriers to the development of multimodal transport. Based on the obtained data, reachability and structural interaction matrices are constructed, allowing the determination of the influence levels of individual barriers on the functioning of logistics chains. It is established that the key barrier is the negative perception of multimodal transport by cargo owners, while significant constraints are also related to the inefficiency of multimodal solutions for short distances, small shipment volumes, and time-sensitive deliveries.

User-oriented measures to support multimodal transport are proposed using a bottom-up approach. It is determined that improving economic efficiency, enhancing information support, and training qualified personnel are key directions for stimulating the development of multimodal transport.

multimodal transport, freight transport, barrier, interpretive structural modeling, transport and logistics system

Одержано (Received) 24.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 656.1 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).398-407

К. В. Доля, доц., д-р техн. наук
Національний аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: k.v.dolia@gmail.com

Збільшення привабливості транспорту загального користування

Статтю присвячено проблемі підвищення привабливості транспорту загального користування як ключового інструмента забезпечення сталої міської мобільності. Актуальність теми зумовлена зростанням автомобілізації, перевантаженням вулично-дорожньої мережі, погіршенням екологічних показників і зниженням якості транспортного обслуговування в містах. Метою роботи є систематизація чинників, що формують сприйняту якість поїздки, та обґрунтування комплексу заходів, здатних підвищити конкурентоспроможність громадського транспорту порівняно з приватним автомобілем. У межах огляду літератури узагальнено підходи до планування мережі, організації перевезень, упровадження BRT, стандартів якості обслуговування, економічного оцінювання вигід і транспортного моделювання, що дозволило виділити домінуючі блоки впливу: надійність і регулярність руху, швидкість сполучення та пріоритет на перехрестях, комфорт і безбар'єрність, інформаційні сервіси реального часу, тарифна інтеграція та якість пересадок. Запропоновано метод «коридору надійності» на базі інтервального керування рухом (headway-based control) з підтримкою пріоритету на світлофорних об'єктах і цифрового інформування пасажирів, який спрямований на зменшення нерівномірності інтервалів і ризику запізнення. Для формалізації ефектів наведено приклади показників і розрахункових залежностей (узагальнений час поїздки, індекс регулярності, точність прогнозу прибуття), а також приклад порівняння «до/після» у вигляді таблиці та графіка. Практична цінність результатів полягає у можливості використання запропонованої структури чинників і показників для підготовки міських програм розвитку транспорту, обґрунтування інвестицій у пріоритетні коридори та моніторингу якості послуг.

транспорт загального користування, привабливість, якість обслуговування, надійність, інтервал руху, пріоритет руху, BRT, тарифна інтеграція, пересадки, міська мобільність

Постановка проблеми. Транспорт загального користування є базовим елементом міської мобільності, що забезпечує доступність робочих місць, освіти та послуг, а також знижує навантаження на вулично-дорожню мережу. Водночас у багатьох містах спостерігається зниження привабливості громадського транспорту через низьку надійність, значну варіативність часу поїздки, недостатній комфорт та інформаційну невизначеність для пасажирів. За цих умов населення частіше обирає приватний автомобіль, що підсилює затори, погіршує екологічний стан і збільшує витрати міського простору на паркування.

Проблема підвищення привабливості громадського транспорту має як науковий, так і практичний вимір. Науковий аспект полягає у визначенні чинників, які формують сприйняту якість поїздки та впливають на транспортний вибір, а також у побудові підходів до їхнього вимірювання. Практичний аспект пов'язаний із розробленням і впровадженням заходів, що забезпечують конкурентоспроможність громадського транспорту порівняно з автомобілем: пріоритет на перехрестях, виділені смуги, оновлення рухомого складу, підвищення доступності для маломобільних груп, інтегровані тарифи та цифрові сервіси.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формування дієвих інструментів підвищення якості перевезень і стабілізації попиту на транспорт загального користування. Очікуваним результатом є зменшення негативних ефектів автомобілізації (затори, шум, викиди), підвищення безпеки руху та забезпечення соціальної справедливості доступу до міських можливостей для різних груп населення.

© К. В. Доля, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові та прикладні джерела, присвячені розвитку громадського транспорту, можна згрупувати за тим, які саме механізми вони розглядають як визначальні для підвищення привабливості сервісу: системне планування мережі та технології перевезень, організація автобусних перевезень і BRT, стандарти якості обслуговування, економічне обґрунтування інвестицій, транспортне моделювання та ширший контекст сталої мобільності.

Класичний підручник з міських транзитних систем В. Вучика описує громадський транспорт як інженерно-організаційну систему, де якість обслуговування визначається конфігурацією мережі, провізною здатністю, регулярністю та узгодженням технологічних параметрів з попитом [1]. Праця Дж. Вокера фокусується на «зрозумілості» мережі та ролі частоти руху; автор аргументує, що простіша структура маршрутів і прогнозована частота часто підвищують сприйняту доступність сильніше, ніж дрібні оптимізації розкладів [2]. У контексті стратегічного планування сталих транспортних систем Дж. Тумлін пропонує набір інструментів (політики землекористування, street design, пріоритизація мод) для створення умов, у яких громадський транспорт стає логічним вибором для більшості поїздок [3].

Практико-орієнтований посібник В. Джарретта розглядає підвищення якості автобусного сервісу через оптимізацію маршрутної мережі, інтервальне планування, зменшення дублювання та операційний контроль, що прямо впливає на надійність і сприйняту зручність поїздки [4]. Суміжно, підхід А. Цедера в рамках планування й експлуатації громадського транспорту поєднує моделювання та поведінкові аспекти, підкреслюючи важливість управління інтервалами, координації пересадок і контролю варіативності часу руху [5].

Керівництво з планування BRT від ITDP систематизує «компоненти якості» BRT: виділені смуги, станції, пріоритет на перехрестях, передплатна оплата, чітка навігація, що в комплексі забезпечує різке підвищення швидкості сполучення та регулярності руху [6]. Монографія Г. Каррі з проєктування та впровадження BRT розглядає практичні сценарії реалізації, у т. ч. взаємодію інфраструктури та експлуатаційних параметрів, що важливо для досягнення очікуваного ефекту привабливості [7].

Підхід до вимірювання привабливості через показники обслуговування (час у дорозі, очікування, надійність, заповненість, доступність зупинок, умови пересадок) системно подано у *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (TCQSM), що є одним із найуживаніших методичних документів для кількісної оцінки якості [8]. Саме ця методологія дозволяє порівнювати альтернативи та обґрунтовувати заходи пріоритету або зміну мережі не лише на рівні «відчуттів», а на основі метричних індикаторів.

З точки зору економіки міської мобільності Т. Літман пропонує розширене трактування вигід громадського транспорту, включно з зовнішніми ефектами (екологія, безпека, простір, доступність), що підтримує аргументацію щодо інвестицій у пріоритетні коридори та сервісні покращення [9]. Питання впливу транспортної політики на сталість мобільності також пов’язане з переходом до «парадигми сталої мобільності», яку у своїй статті описує Д. Баністер, підкреслюючи необхідність зміни пріоритетів від автомобіля до колективних та активних видів пересування [10].

Для формалізації ефектів підвищення якості сервісу застосовують транспортні моделі попиту. Класична праця Ж. де Д. Ортузара та Л. Дж. Віллумсена описує інструментарій моделювання (у т. ч. дискретний вибір), який дозволяє кількісно пов’язувати атрибути поїздки (час, вартість, надійність, комфорт) із імовірністю вибору громадського транспорту [11]. У прикладному контексті ці підходи доповнюються методами планування й експлуатації, які описує А. Цедер, де поведінкові фактори інтегруються з операційними рішеннями [5].

Посібник EPOMM з mobility management наголошує на «м’яких» заходах (інформаційні кампанії, робота з роботодавцями, планування поїздок), які підсилюють

ефект інфраструктурних змін та можуть збільшувати користування громадським транспортом через зміну поведінки [12]. Документ UNECE щодо сталої міської мобільності й громадського транспорту підкреслює роль інституційної спроможності, інтегрованого планування та координації політик (транспорт—довкілля—соціальна сфера) для досягнення стабільного результату [13]. Нарешті, рекомендації ВООЗ щодо інструментів економічної оцінки вигід ходьби та велоруху підкреслюють важливість інтеграції громадського транспорту з активною мобільністю як «першої/останньої милі», що також впливає на привабливість системи в цілому [14].

Мета роботи. Метою статті є визначення основних чинників, що формують привабливість транспорту загального користування, та систематизація напрямів підвищення якості послуг. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- ✓ виокремити ключові параметри, важливі для пасажира (надійність, швидкість, комфорт, доступність, інформування, тарифна інтеграція);
- ✓ узагальнити типові заходи підвищення привабливості на рівні інфраструктури та організації руху;

окреслити перспективні напрями подальших досліджень щодо оцінювання ефективності впроваджених заходів.

Об’єктом дослідження є функціонування системи перевезень пасажирів транспортом загального користування в умовах міської мобільності.

Предметом дослідження є чинники та заходи, що визначають привабливість транспорту загального користування для користувачів (надійність, швидкість, комфорт, доступність, інформування, тарифна інтеграція) і впливають на транспортний вибір.

Основний матеріал дослідження. Підвищення привабливості транспорту загального користування доцільно розглядати як керовану зміну сприйнятої якості поїздки та пов’язаних із нею витрат часу, грошей і зусиль пасажира. Практично це означає, що набір заходів має одночасно впливати на ключові етапи «ланцюга поїздки»: підхід до зупинки, очікування, поїздку в салоні, пересадку (за потреби) та завершення маршруту. У цьому розділі систематизовано інструменти підвищення привабливості за групами та наведено логіку їх застосування в міських умовах.

Надійність є одним із найважливіших параметрів якості, оскільки пасажир оцінює не лише середній час поїздки, а й ризик запізнення. Для підвищення регулярності доцільно: (1) перейти від «жорстких» розкладів до інтервального планування на магістральних маршрутах у години пік; (2) запровадити диспетчеризацію з контролем інтервалів та коригуванням випуску; (3) оптимізувати час стоянки на зупинках через організацію посадки/висадки та зменшення «конфліктів» із приватним транспортом. Практичним індикатором результату може бути частка рейсів, що прибувають у межах допустимого відхилення, а також показники варіативності інтервалів (наприклад, коефіцієнт варіації).

Коефіцієнт варіації інтервалів визначимо як (1):

$$CV_h = \frac{\sigma_h}{\bar{h}} \quad (1)$$

де CV_h (коефіцієнт варіації): показує відношення стандартного відхилення до середнього значення. Він часто виражається у відсотках; σ_h (стандартне відхилення): характеризує ступінь розсіювання значень навколо їхнього середнього арифметичного; $\bar{h}$ (середнє значення): середнє арифметичне значення досліджуваної величини (h).

Конкурентоспроможність громадського транспорту щодо автомобіля визначається, насамперед, швидкістю «від дверей до дверей». Підвищення швидкості сполучення забезпечують заходи пріоритету: виділені смуги на найбільш завантажених ділянках, пріоритетні фази світлофорного регулювання, зменшення кількості «зайвих» зупинок (за рахунок стандартизації відстані між ними) та перегляд маршрутної мережі з

фокусом на прямі зв'язки й зручні пересадки. Ефективність таких рішень оцінюють через зростання середньої швидкості сполучення, зменшення часу в дорозі та підвищення стабільності виконання рейсів.

Середню швидкість сполучення можна розрахувати як (2):

$$v_c = \frac{L}{T_{iv}}, \qquad (2)$$

де L – довжина ділянки/маршруту, T_{iv} – час у салоні.

Комфорт охоплює як фізичні умови в салоні (температурний режим, рівень шуму, чистота, плавність руху), так і просторові характеристики (щільність заповнення, організація місць для стояння/сидіння). Доступність передбачає безбар'єрність: низькопідлоговий рухомий склад, підняті платформи/бордюри на зупинках, тактильні елементи та зрозумілу навігацію. На практиці це підвищує привабливість не лише для маломобільних груп, а й для пасажирів із багажем, батьків із дитячими візками та людей похилого віку. Важливою є також безпека на зупинках і в салоні (освітлення, оглядовість, організація пішохідних переходів до зупинок).

Рівень заповнення салону можна оцінити коефіцієнтом (3):

$$k_{occ} = \frac{N}{C}, \qquad (3)$$

де N – фактична кількість пасажирів у салоні; C – місткість рухомого складу.

Інформаційні сервіси та цифровізація взаємодії з пасажиром

Інформаційна підтримка зменшує невизначеність і психологічні «витрати» користування системою. Пріоритетними інструментами є відображення прогнозу прибуття в реальному часі, інтегровані карти/схеми маршрутів, повідомлення про відхилення від графіка та зміни руху. Додатково підвищують привабливість сервіси планування поїздок із урахуванням пересадок, інформування про заповненість (за наявності даних) і єдина довідкова система. Для оцінювання результату використовують показники доступності інформації (частка зупинок із табло, точність прогнозів прибуття) і користувацькі опитування. Точність прогнозу прибуття можна подати через середню абсолютну похибку (MAE) (4):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|t_i^{pred} - t_i^{obs}\right|, \qquad (4)$$

Вартість поїздки має значення не лише як рівень тарифу, а і як «складність оплати» та відсутність штрафу за пересадки. Підвищенню привабливості сприяють: єдиний квиток на різні види транспорту, часова (зональна) тарифікація, проїзні різної тривалості, пільгові та соціальні продукти, а також безконтактні способи оплати. Важливо, щоб тарифна модель підтримувала потрібну структуру поїздок (зручні пересадки) і була зрозумілою для пасажи Ефект тарифної інтеграції для пасажира можна інтерпретувати як зменшення додаткових витрат на пересадку: (5):

$$\Delta C_t = C_{sep} - C_{int}, \qquad (5)$$

де C_{sep} – вартість поїздки при оплаті кожної ділянки окремо, C_{int} – вартість поїздки за інтегрованим тари

Навіть за добре спроєктованої мережі частина поїздок потребує пересадки, тому якість пересадкового вузла безпосередньо впливає на сприйняття системи. Ключовими є мінімальна відстань між платформами/зупинками, захист від негоди, узгодження інтервалів, безпечні пішохідні зв'язки та зрозумілі вказівники. Для підвищення охоплення території важливо інтегрувати громадський транспорт з активною мобільністю: якісні тротуари, велоінфраструктура, паркування велосипедів біля станцій, а також зручні підходи до зупинок.

«Штраф пересадки» за часом можна описати як (6):

$$P_t = T_{walk} + T_{wait} + T_{aux}, \quad (6)$$

де T_{walk} — час переходу, T_{wait} — час очікування стикування, T_{aux} — додатковий час (навігація, контроль оплати тощо).

Для обґрунтування управлінських рішень доцільно використовувати систему показників, що охоплює: швидкість сполучення, регулярність (варіативність інтервалів), заповненість, доступність зупинок, якість пересадок і задоволеність пасажирів. Логіка впровадження заходів може бути поетапною: спочатку «швидкі» операційні покращення (диспетчеризація, оптимізація інтервалів), далі — пріоритет на вуличній мережі та модернізація зупинок, після чого — тарифна інтеграція й розвиток цифрових сервісів. Така послідовність дозволяє отримати помітний ефект для пасажира вже на ранніх етапах і підвищує підтримку подальших інвестицій.

Інтегральний індекс якості (у нормованому вигляді) можна задати як зважену суму (7):

$$Q = \sum(j = 1)^m w_j x_j \,, \sum(j = 1)^m w_j = 1, \quad (7)$$

де x_j – нормовані показники (надійність, швидкість, доступність тощо); w_j – їхні ваги. цій.

4.8 Формалізація впливу заходів: приклад показників, формул і візуалізацій

Для ілюстрації підходу наведемо спрощену систему метрик, яка відображає зміну часу поїздки та надійності після впровадження пріоритету.

Формули. Середній узагальнений час поїздки пасажира (без урахування вартості) подамо як(8):

$$T_g = T_a + \frac{h}{2} + T_{iv} + n_t T_t, \quad (8)$$

де T_a – час підходу до зупинки, h – інтервал руху (headway), T_{iv} – час у салоні, n_t – кількість пересадок, T_t – середній час однієї пересадки.

Для оцінювання регулярності використаємо індекс надійності інтервалів (9):

$$R_h = 1 - \frac{\sigma_h}{\bar{h}}, \quad (9)$$

де $\bar{h}$ – середній інтервал, σ_h – середньоквадратичне відхилення інтервалів (чим ближче R_h до 1, тим вища регулярність).

Запропоновано метод збільшення привабливості полягає у впровадженні в пріоритетному транспортному коридорі режиму інтервального керування рухом (headway-based control) з підтримкою інфраструктурного пріоритету на перехрестях і стандартизованих зупинок. На відміну від підходу, орієнтованого лише на дотримання розкладу, інтервальне керування фокусується на підтриманні заданого інтервалу між транспортними засобами, що безпосередньо зменшує нерівномірність подачі та «скупчення» (bunching) у потоці. Метод складається з таких елементів:

1. Вибір коридору з найбільшим пасажиропотоком і потенціалом перетоку з автомобіля (центральні магістралі, під'їзди до вузлів тяжіння).
2. Задання цільового інтервалу h для годин пік та міжпікового періоду.
3. Операційний контур керування (диспетчер/АСУ): вимірювання фактичних інтервалів h_i та застосування коригувальних дій – короткочасного утримання на зупинці, обмеження надмірної стоянки, підсилення випуску з кінцевих.
4. Пріоритет на перехрестях для зменшення випадкових затримок (зсув/подовження зеленої фази при наближенні ТЗ).
5. Пасажирські сервіси (реальний час прибуття, прозоре інформування), які підсилюють ефект від стабілізації інтервалів.

Як критерій якості роботи коридору запропоновано мінімізувати відхилення фактичних інтервалів від цільового (10):

$$J = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(h_i - h)^2 \to \min, \quad (10)$$

Практичним результатом упровадження методу має бути одночасне зменшення часу очікування (через менший інтервал та вищу регулярність) і зниження ризику запізнення, що підвищує привабливість транспорту загального користування без обов'язкового суттєвого збільшення кількості рухомого складу. Для демонстрації практичного застосування запропонованого підходу виконано анкетне опитування користувачів міського громадського транспорту в межах України. Загальний обсяг вибірки становив (n = 223) респонденти. Для інтерпретації результатів використано логіку оцінювання якості послуг громадського пасажирського транспорту: доступність, часові характеристики, надійність та орієнтація на потреби пасажира.

Структура вибірки свідчить про репрезентативне охоплення активних користувачів міської мобільності: 161 респондент (72.2%) належить до вікових груп 25–60 років; 136 осіб (61.0%) мають легковий автомобіль у домогосподарстві, але продовжують користуватися громадським транспортом; 143 респонденти (64.1%) здійснюють поїздки щодня або 2–3 рази на тиждень. Це підтверджує практичну значущість заходів підвищення привабливості саме для груп, які мають реальну альтернативу у вигляді приватного авто.

За валідними відповідями щодо часових параметрів (n = 194) встановлено: 145 осіб (74.7%) витрачають на поїздку в один бік до однієї години, а 154 особи (79.4%) мають пішохідну доступність зупинки до 10 хвилин. Серед цілей поїздок (множинний вибір) домінують трудові/навчальні (164 вибори; 73.5%), далі побутові (90; 40.4%) та культурно-дозвільні (61; 27.4%). Отримані значення вказують, що ключовими напрямами практичного вдосконалення мають бути регулярність руху у пікові періоди, зменшення часу очікування та підвищення надійності пересадок.

Узагальнення бажань пасажирів за результатами опитування. Аналіз анкет показав, що попит концентрується навколо трьох домінуючих очікувань: скорочення часу поїздки, передбачуваність графіка та краща маршрутна зв'язність без зайвих пересадок. Серед критеріїв вибору маршруту найчастіше фіксується орієнтація на найкоротший шлях (70 виборів), далі — чутливість до вартості проїзду (64) та готовність платити більше за швидкий безпересадковий сервіс (60). Ключовими бар'єрами в користуванні громадським транспортом респонденти назвали запізнення і нерегулярність руху (65), відсутність зручних прямих маршрутів (49), а також невідповідність ціни та фактичної якості послуг (41). На рисунку 1 наведено частоту користування міським громадським транспортом за результатами опитування у вигляді діаграми.

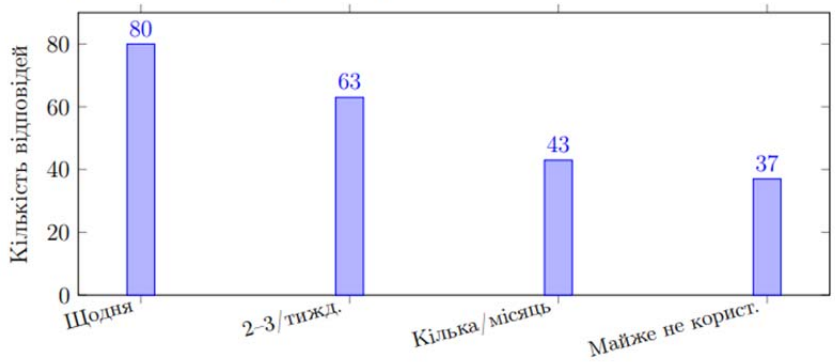


Рисунок 1 – Частота користування міським громадським транспортом за результатами опитування (n = 223)

Джерело: розроблено автором.

Методика проведеного оцінювання передбачає послідовність етапів, узгоджених із підходом стандартів:

1. Визначення доменів якості (доступність, часові характеристики, надійність/регулярність, комфорт, інформаційна зрозумілість).
2. Відбір вимірюваних індикаторів для кожного домену на основі анкетних даних і операційних метрик.
3. Нормування показників у шкалі [0;1] за принципом "більше – краще" або "менше – краще".
4. Агрегація у зведений індекс з використанням ваг, погоджених з цілями транспортної політики міста.
5. Порівняння "до/після" для обраного коридору та інтерпретація змін у термінах якості послуг для пасажира.

Для показників типу "більше – краще" використано нормування (11):

$$x_j = \frac{y_j - y_j^{min}}{y_j^{max} - y_j^{min}}, \tag{11}$$

де x_j – нове (нормалізоване) значення, y_j – поточне фактичне значення, y_j^{min} – мінімальне значення в даному наборі даних, y_j^{max} – максимальне значення в даному наборі даних.

а для показників "менше – краще" – (12):

$$x_j = \frac{y_j^{max} - y_j}{y_j^{max} - y_j^{min}}, \tag{12}$$

Таблиця 1 наводить базовий набір індикаторів оцінювання якості за логікою ДСТУ EN 13816:2022 та EN 15140:2022.

Таблиця 1 – Базовий набір індикаторів оцінювання якості за логікою

Домен якості	Індикатор	Метод обчислення	Цільовий орієнтир
Доступність	A_w (пішохідна доступність зупинок)	Частка респондентів із часом підходу до зупинки ≤ 10 хв	≥ 0.75
Часові характеристики	A_t (доступність часу поїздки)	Частка респондентів із тривалістю поїздки в один бік ≤ 60 хв	≥ 0.70
Надійність	R_h (регулярність інтервалів)	$Rh = 1 - \sigma h/\bar{h}$ (за даними диспетчеризації/моніторингу)	≥ 0.80
Орієнтація на пасажира	C_s (задоволеність сервісом)	Нормована середня оцінка задоволеності / частка позитивних відповідей	≥ 0.70

Джерело: розроблено авторами

У межах цього дослідження з анкетних даних безпосередньо оцінено A_t та A_w, а показник R_h рекомендовано визначати за фактичними інтервалами руху на коридорі (GNSS/AVL або диспетчерські журнали). Така конфігурація забезпечує відтворювану процедуру моніторингу та придатність результатів для управлінських рішень відповідно до вимог ДСТУ.

Для прикладного моніторингу рекомендовано інтегральний індекс якості обслуговування (13):

$$Iq = 0.35Rh + 0.30At + 0.20Aw + 0.15Cs, \tag{13}$$

де R_h – нормований показник регулярності інтервалів; A_t – часової доступності поїздки; Aw – пішохідної доступності зупинок; C_s – задоволеності сервісом (за анкетними оцінками). Така форма дає змогу виконувати порівняння «до/після» впровадження пріоритету руху, інтервального керування та цифрового інформування пасажирів у межах вимог стандартів якості.

Практичний висновок полягає в тому, що навіть за високої автомобілізації значна частина населення регулярно користується громадським транспортом, а отже кероване покращення параметрів надійності, часу поїздки та доступності має безпосередній прикладний ефект. Запропонований підхід може бути використаний транспортними органами міст для пріоритезації інвестицій у коридори з найбільшим соціально-економічним ефектом та для звітного контролю якості послуг за принципом "до/після". В таблицю 2 зведено ключові результати опитування як приклад практичного застосування.

Рекомендації органам місцевого самоврядування (на основі опитування) на основі отриманих результатів опитування (n = 223). Доцільно запропонувати такий пакет пріоритетних рішень для органів місцевого самоврядування:

Таблиця 2 – Ключові результати опитування як приклад практичного застосування.

Показник	Значення	Частка, %
Загальна кількість респондентів	223	100.0
Вікові групи 25–60 років	161	72.2
Наявність авто в домогосподарстві ("Так")	136	61.0
Інтенсивне користування ГТ (щодня + 2–3 рази/тиждень)	143	64.1
Поїздка в один бік до 1 години (n = 194)	145	74.7
Піша доступність зупинки до 10 хв (n = 194)	154	79.4
Трудові/навчальні цілі поїздок (множинний вибір)	164	73.5

Джерело: розроблено авторами

1. Пріоритезувати надійність руху в пікові періоди. Оскільки нерегулярність і запізнення визначені як ключовий бар'єр, першочергово впроваджувати інтервальне керування, диспетчерський контроль та пріоритет громадського транспорту на світлофорних об'єктах.

2. Оптимізувати маршрутну мережу під прямі сполучення. З урахуванням високої чутливості пасажирів до тривалості поїздки та пересадок, доцільно скорочувати надлишкові пересадки на масових трудових/навчальних напрямках.

3. Поетапно узгодити тариф і якість сервісу. Зафіксована чутливість до співвідношення "ціна/якість" обґрунтовує перехід до прозорої тарифної політики: підвищення тарифів.

4. Сформувати муніципальну систему моніторингу якості. Рекомендовано закріпити регулярний збір показників R_h, A_t, A_w, C_s та публічну звітність у форматі "до/після" для коридорів, де впроваджуються зміни.

5. Спрямувати інвестиції на коридори найбільшого соціально-економічного ефекту. З огляду на високу частку регулярних користувачів (64.1%) і наявність альтернативи у вигляді авто (61.0%), найбільший ефект очікується від точкових інвестицій у магістральні напрямки з високим пасажиропотоком.

Запропоновані рекомендації можуть бути інтегровані у місцеві програми розвитку транспорту як управлінський модуль прийняття рішень, що поєднує

стандартизовані KPI якості, пріоритезацію заходів і контроль фактичного результату для пасажира.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Підвищення привабливості транспорту загального користування досягається комплексом взаємопов'язаних рішень: забезпеченням надійності та регулярності руху, впровадженням пріоритету на вулично-дорожній мережі, підвищенням комфорту й доступності зупинок і рухомого складу, розвитком інформаційних сервісів реального часу та тарифною інтеграцією. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням системи показників і моделей попиту, що дозволять кількісно оцінювати вплив окремих заходів на вибір пасажира та обґрунтовувати пріоритетність інвестицій.

Список літератури

1. A comparative study on hybrid linear and nonlinear modeling framework for air passenger traffic forecasting / Y. Bao et al. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*. 2011. Vol. 3, iss. 5. P. 243–254. DOI: 10.4156/aiss.vol3.issue5.28.
2. Rodríguez-Doncel V., Santos C., Casanovas P. A model of air transport passenger incidents and rights. 2014. DOI: 10.3233/978-1-61499-468-8-55.
3. Marie-Sainte S. L., Saba T., Alotaibi S. Air passenger demand forecasting using particle swarm optimization and firefly algorithm. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2019. Vol. 16, iss. 9. P. 3735–3743. DOI: 10.1166/jctn.2019.8242.
4. Dang Y.-., Li W.-. Air passenger flow structure analysis with network view. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2010. Vol. 10, iss. 5. P. 167–174.
5. Air passengers' purchasing behavior of specialty products at airport: An empirical study / J. Jing He et al. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2021. P. 13–17. DOI: 10.1145/3503491.3503494.
6. An analysis and decomposition ensemble prediction model for air passenger demand based on singular spectrum analysis / X. Liang et al. *System Engineering Theory and Practice*. 2020. Vol. 40, iss. 7. P. 1844–1855. DOI: 10.12011/1000-6788-2019-1010-12.
7. Huang F.-., Peng J., You M.-. Analyses of charactetristics of air passenger group mobility behaviors. *Acta Physica Sinica*. 2016. Vol. 65, iss. 22. DOI: 10.7498/aps.65.228901.
8. Ida Y. Changes of air passenger distribution patterns in japan. *Japanese Journal of Human Geography*. 1993. Vol. 45, iss. 3. P. 221–243. DOI: 10.4200/jjhg1948.45.221.
9. Reyna O. S. S., De La Mota I. F. Complex networks of the air passenger traffic in Culiacan´s airport. *30th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2018*. 2018. P. 123–128.
10. COVID-19: Transforming air passengers' behaviour and reshaping their expectations towards the airline industry / A. Afaq et al. *Tourism Recreation Research*. 2021. DOI: 10.1080/02508281.2021.200821.
11. Development of 8 kW charging generator for railway air-conditioned passenger car / P. Zuo et al. *China Railway Science*. 2010. Vol. 31, iss. 2. P. 137–140.
12. Niu W. Intelligent air passenger transportation system utilizing integrated space-ground information network. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*. 2019. Vol. 40, iss. 1. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22415.
13. Dang Y.-., Song S.-. Invulnerability analysis of chinese air passenger flow network based on centrality. *Complex Systems and Complexity Science*. 2013. Vol. 10, iss. 1. P. 75–82.
14. Sharma H. K., Kumari K., Kar S. Short-term forecasting of air passengers based on the hybrid rough set and the double exponential formatting model. *Intelligent Automation and Soft Computing*. 2019. Vol. 25, iss. 1. P. 1–14. DOI: 10.31209/2018.100000036.

References

1. Bao, Y., Yi, D., Xiong, T., Hu, Z., & Zheng, S. (2011). A comparative study on hybrid linear and nonlinear modeling framework for air passenger traffic forecasting. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 3(5), 243-254. doi:10.4156/aiss.vol3.issue5.28.
2. Rodríguez-Doncel, V., Santos, C., & Casanovas, P. (2014). A model of air transport passenger incidents and rights doi:10.3233/978-1-61499-468-8-55
3. Marie-Sainte, S. L., Saba, T., & Alotaibi, S. (2019). Air passenger demand forecasting using particle swarm optimization and firefly algorithm. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 16(9), 3735-3743. doi:10.1166/jctn.2019.8242
4. Dang, Y. -., & Li, W. -. (2010). Air passenger flow structure analysis with network view. Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxi/Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 10(5), 167-174.

5. Jing He, J., Xu, L., Ning Guo, X., & Hu, Y. (2021). Air passengers' purchasing behavior of specialty products at airport: An empirical study. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series, 13-17. doi:10.1145/3503491.3503494
6. Liang, X., Guo, Z., Zhang, Q., Yang, M., & Wang, S. (2020). An analysis and decomposition ensemble prediction model for air passenger demand based on singular spectrum analysis. Xitong Gongcheng Lilun Yu Shijian/System Engineering Theory and Practice, 40(7), 1844-1855. doi:10.12011/1000-6788-2019-1010-12
7. Huang, F. -., Peng, J., & You, M. -. (2016). Analyses of characetristics of air passenger group mobility behaviors. Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica, 65(22) doi:10.7498/aps.65.228901.
8. Ida, Y. (1993). Changes of air passenger distribution patterns in japan. Japanese Journal of Human Geography, 45(3), 221-243. doi:10.4200/jjhg1948.45.221.
9. Reyna, O. S. S., & De La Mota, I. F. (2018). Complex networks of the air passenger traffic in Culiacan´s airport. Paper presented at the 30th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2018, 123-128.
10. Afaq, A., Gaur, L., Singh, G., & Dhir, A. (2021). COVID-19: Transforming air passengers' behaviour and reshaping their expectations towards the airline industry. Tourism Recreation Research, doi:10.1080/02508281.2021.200821.
11. Zuo, P., Li, H., Liu, W., & Liu, D. (2010). Development of 8 kW charging generator for railway air-conditioned passenger car. Zhongguo Tiedao Kexue/China Railway Science, 31(2), 137-140.
12. Niu, W. (2019). Intelligent air passenger transportation system utilizing integrated space-ground information network. [基于天地一体化信息网络的智能航空客运系统] Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 40(1) doi:10.7527/S1000-6893.2018.22415.
13. Dang, Y. -., & Song, S. -. (2013). Invulnerability analysis of chinese air passenger flow network based on centrality. Complex Systems and Complexity Science, 10(1), 75-82.
14. Sharma, H. K., Kumari, K., & Kar, S. (2019). Short-term forecasting of air passengers based on the hybrid rough set and the double exponential smoothing model. Intelligent Automation and Soft Computing, 25(1), 1-14. doi:10.31209/2018.100000036.

Kostiantyn Dolia, Assoc. Prof., DSc.
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

Increasing the Attractiveness of Public Transport

The article is devoted to the problem of increasing the attractiveness of public transport as a key tool for ensuring sustainable urban mobility. The relevance of the topic is due to the growth of motorization, congestion of the street and road network, deterioration of environmental indicators and a decrease in the quality of transport services in cities. The aim of the work is to systematize the factors that shape the perceived quality of the trip and justify a set of measures that can increase the competitiveness of public transport compared to a private car. Within the framework of the literature review, approaches to network planning, transportation organization, BRT implementation, service quality standards, economic assessment of benefits and transport modeling are summarized, which allowed us to identify the dominant blocks of influence: reliability and regularity of traffic, connection speed and priority at intersections, comfort and barrier-free travel, real-time information services, tariff integration and quality of transfers. A method of "reliability corridor" based on interval traffic control (headway-based control) with priority support at traffic lights and digital passenger information is proposed, which is aimed at reducing the unevenness of intervals and the risk of being late. To formalize the effects, examples of indicators and calculated dependencies (generalized travel time, regularity index, arrival forecast accuracy) are provided, as well as an example of a "before/after" comparison in the form of a table and graph. The practical value of the results lies in the possibility of using the proposed structure of factors and indicators for preparing urban transport development programs, justifying investments in priority corridors and monitoring the quality of services.

public transport, attractiveness, quality of service, reliability. travel interval, travel priority, BRT, tariff integration, transfers. urban mobility

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 06.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 656.1:614.86 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).408-415

А.В. Йовченко, канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua

Дослідження пристрою пасивної безпеки, що використовується для безпеки транспортних процесів під час логістичних перевезень

У статті розглянуто пристрій пасивної безпеки для вантажного транспортного засобу та причепа, що забезпечує візуальний контроль обертання коліс причепа з кабіни водія. Запропоноване рішення дозволяє своєчасно виявляти блокування коліс, покращує сприйняття габаритів причепа та підвищує безпеку маневрування, зокрема під час руху заднім ходом. Проведено розрахунок основного елемента конструкції на міцність і жорсткість з урахуванням експлуатаційних навантажень. Отримані результати підтверджують надійність і працездатність пристрою в умовах реальної експлуатації.
пасивна безпека, вантажний транспортний засіб, причіп, діагностування обертання коліс, міцність

Постановка проблеми. Сучасні логістичні системи відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного функціонування економіки, оскільки забезпечують безперервність руху матеріальних потоків між виробниками, складами та споживачами. Зростання обсягів міжнародних і внутрішніх автомобільних вантажних перевезень супроводжується підвищенням вимог до безпеки та надійності транспортних процесів, особливо під час експлуатації вантажних транспортних засобів (ТЗ) із причепами та напівпричепами [1-3].

Однією з важливих проблем під час руху вантажного автомобіля з причепом є обмежена можливість оперативного контролю технічного стану коліс причепа безпосередньо під час руху. У ряді випадків водій не має можливості своєчасно виявити блокування колеса, пошкодження шини або інші відхилення у роботі колісного вузла. Це може призводити до підвищеного зносу елементів ходової частини, втрати керованості ТЗ, збільшення ризику дорожньо-транспортних пригод та зниження ефективності транспортних процесів.

Існуючі технічні рішення, що застосовуються для контролю стану коліс ТЗ, переважно базуються на електронних системах моніторингу, датчиках тиску, системах телеметрії, комплексах активної безпеки та ін. Однак, використання таких систем пов’язано з підвищеною вартістю ТЗ, необхідністю електроживлення, складністю обслуговування та зниженням надійності в умовах складної експлуатації.

У зв’язку з цим постає задача розроблення простих, надійних і автономних технічних засобів пасивної безпеки, які дозволяють водієві здійснювати візуальний контроль обертання коліс причепа під час руху ТЗ. Використання таких пристроїв може сприяти підвищенню надійності транспортних процесів у вантажній логістиці, своєчасному виявленню несправностей та зниженню ризиків аварійних ситуацій [4-6].

За несприятливих погодних умов, зокрема за низьких температур, можливе заклинювання гальмівних механізмів, що призводить до блокування коліс. У разі руху ТЗ заблоковане колесо ковзає по дорожньому покриттю, викликаючи інтенсивне зношення шин та їх швидке руйнування. Уламки покришки створюють небезпеку для водія та інших учасників руху, а її пошкодження може спричинити аварійні ситуації або затримки, пов’язані із заміною колеса [7-8].

© А. В. Йовченко, 2026

Таким чином, розробка та дослідження пристрою пасивної безпеки для контролю роботи коліс ТЗ, причепа є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення безпеки та ефективності транспортних процесів у системах вантажних логістичних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експлуатація вантажних ТЗ у складних умовах (пил, волога, низькі температури) сприяє поступовій деградації колісних вузлів. Традиційні методи діагностики передбачають зупинку ТЗ та залучення обслуговуючого персоналу, що обмежує оперативність контролю. Альтернативою є візуальні системи моніторингу, які дозволяють здійснювати діагностику під час руху.

Найпростішими рішеннями є використання контрастних або рефлективних маркерів на шині чи диску, що забезпечують візуальну індикацію обертання колеса. Однак такі засоби мають обмежений ресурс і чутливі до зовнішніх впливів. Поширеним підходом також є застосування індикаторів положення кріпильних елементів (стрілкових ковпаків), які дозволяють швидко виявляти послаблення різьбових з'єднань під час огляду. Водночас ці засоби не забезпечують контролю обертання коліс при русі, зокрема у випадках їх блокування або заклинювання [4-6].

Порушення технології затягування кріплень (недостатній або надмірний момент, неправильна послідовність) може призводити до втрати затискного зусилля, пошкодження різьбових з'єднань і потенційного відокремлення колеса. Відсутність регулярного контролю технічного стану коліс підвищує ризик розвитку прихованих дефектів і аварійних ситуацій [5].

Сучасні пристрої візуального контролю обертання коліс (наприклад, індикатори типу Skiddd) забезпечують оперативне виявлення блокування коліс під час руху шляхом спостереження у дзеркалах заднього виду. Вони відзначаються простотою конструкції та працездатністю при різних умовах експлуатації, однак можуть бути чутливими до вібрацій (оскільки вони повторюють контур диска), забруднення та обмерзання, що знижує їх ефективність [6]. Аналогічно, системи типу Wheel Watcher, засновані на візуальних мітках, характеризуються простотою та низькою вартістю, але залежать від умов освітлення та стану поверхні [9].

Більш складні телематичні рішення забезпечують дистанційний моніторинг стану ТЗ, включаючи параметри шин і гальмівних систем у реальному часі. Вони підвищують рівень безпеки та ефективності експлуатації, однак потребують значних витрат і залежать від стабільності живлення та зв'язку [10].

Незважаючи на розвиток сучасних технічних засобів, повністю усунути всі експлуатаційні ризики, з якими стикаються водії, залишається неможливим. У процесі експлуатації ТЗ можливі відмови окремих вузлів і систем, що призводить до простоїв, порушення логістичних процесів і, у окремих випадках, до виникнення аварійних ситуацій.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження міцності стержня пристрою пасивної безпеки руху вантажного ТЗ з причепом, який забезпечує візуальний контроль обертання коліс причепа з кабіни водія. Як ключовий елемент конструкції, стержень піддано розрахунку на міцність і жорсткість з урахуванням експлуатаційних навантажень, зокрема вібраційних та аеродинамічних впливів, з метою оцінки його працездатності та забезпечення надійності пристрою під час руху ТЗ.

Виклад основного матеріалу. Неелектричні (пасивні) рішення залишаються актуальними в сучасних транспортних системах завдяки автономності, надійності та простоті реалізації. Вони не залежать від джерел живлення, електронних компонентів чи програмного забезпечення. Це забезпечує їх працездатність у разі відмови електроніки або в складних експлуатаційних умовах. Крім того, такі системи характеризуються нижчою вартістю виготовлення та обслуговування і можуть застосовуватися на ТЗ без розвинених електронних систем моніторингу. Важливою перевагою є можливість отримання водієм миттєвого візуального зворотного зв'язку

без інтеграції з бортовими системами. Пристрій відзначається простотою конструкції, економічністю, автономністю (без підключення до електросистеми) та сприяє підвищенню безпеки руху шляхом своєчасного виявлення потенційних несправностей.

Конструктивні особливості пристрою визначаються параметрами колісного вузла. Важливим параметром для пристрою є виліт диска. Обов'язковою умовою є недопущення виходу елементів пристрою за габарити ТЗ. Типові значення допустимого виступу становлять близько 20 см для дисків із негативним вильотом, 13 см — із нульовим та 10 см — із позитивним [8].

Для підвищення візуальної ефективності кінцева частина стержня виконана у сигнальному (жовтому) кольорі, що забезпечує високу помітність і контрастність відносно елементів дорожнього середовища. Під час обертання стержень створює чіткий візуальний ефект, який дозволяє оперативно оцінювати обертання колеса. Кількість і розташування пристроїв на осях причепа визначаються водієм залежно від умов експлуатації [8].

При русі вантажівки на колесо діють різні сили, що можуть впливати і на стержень, тому їх необхідно розглянути. При розрахунку приймаємо причіп KRONE SDP 27, габаритні розміри якого 2.48х2.75 м, площа лобового перерізу причепа 6.82 м^2, вага причепа 6750 кг, максимальна вага 27000 кг. з розмірами шини: діаметр колеса ∅1007 мм; маса колеса 72 кг; кількість коліс 6. Визначення параметрів контакту колеса ТЗ з дорогою включає вимірювання лінійної швидкості автомобіля, кутової швидкості колеса, крутного моменту на колесі та нормального навантаження на колесо [11, 12]. На колесо при русі діють декілька сил (рис. 1).

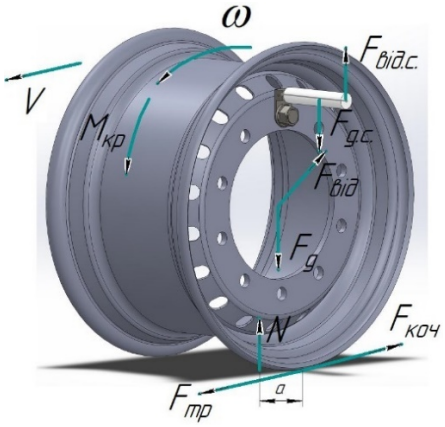


Рисунок 1 – Основні сили, що діють на колесо при русі

Джерело: розроблено автором

Під час руху вантажівки, обертання колеса може відбутися деформація стержня розробленого пристрою. Була поставлена задача обрати діаметр стержня, який буде видно у дзеркала заднього виду, та матеріал, з якого він може бути виготовлений. Попередньо було прийнято ∅40 мм стержня та матеріал для виготовлення – пластик. Довжина стержня, як було описано вище, залежить від вильоту диска. Було взято максимально можливу довжину стержня 160 мм, щоб дослідити максимальні деформації стержня розробленого пристрою.

Сила тяжіння Fg діє на колесо вниз (точка прикладання сили центр маси колеса) та дорівнює вазі колеса:

$$Fg = m \cdot g, \tag{1}$$

де m – маса колеса, кг; g – прискорення вільного падіння, 9.8 м/с^2.

Реакція опори $N = Fg$. Сила пружності підвіски передає навантаження від маси автомобіля через підвіску на колесо, не враховуємо.

Сила тертя Fтр виникає при взаємодії колеса з поверхнею та забезпечує зчеплення з дорогою, необхідне для руху, гальмування і поворотів (під час розгону спрямовано вперед, при гальмуванні направлено назад вздовж поверхні дороги):

$$F\text{тр} = \mu \cdot N = \mu \cdot Fg, \quad (2)$$

де μ - коефіцієнт тертя, $\mu = 0.7$ при сухому асфальті.

При обертанні колеса виникає:

– відцентрова сила Fвід , яка збільшується зі зростанням швидкості (спрямована назовні від осі обертання):

$$F\text{від} = m \cdot \omega^2 \cdot R\ , \quad (3)$$

де ω – кутова швидкість обертання колеса, об/с; R – радіус колеса, м;

– сила опору кочення Fкоч через деформацію колеса та дорожнього покриття:

$$F\text{коч} = f \cdot m \cdot g\ , \quad (4)$$

де f – коефіцієнт опору кочення; m – маса причепа та вантажу, m=27000 кг.

Опір коченню є ключовим для забезпечення безпеки водіння та зменшення кількості ДТП. При розрахунку опору кочення приймаємо, що вантаж розподілений рівномірно. Для забезпечення руху колеса по недеформованій поверхні необхідно подолати опір коченню, який визначається через коефіцієнт опору коченню f [13, 14]:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{V^2}{1500}\right),$$

де f_0 – коефіцієнт при русі автомобіля з малою швидкістю, приймаємо $f_0 = 0.015$ (вантажівка з причепом рухаються по асфальтобетону); V – швидкість, м/с.

Аеродинамічний опір F_a:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^2, \quad (5)$$

де ρ – густина повітря, 1.225 кг/м^3; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору причепа; A – площа лобового перерізу причепа, м^2; V – швидкість причепа, м/с.

Сила опору причепа Ft складається з двох основних компонентів:

$$Ft = F_a + F\text{коч}, \quad (6)$$

де F_a – аеродинамічний опір причепа.

Коефіцієнт аеродинамічного опору вантажних ТЗ залежить від форми, шорсткості кузова, характеристик та геометричних особливостей ТЗ, наявності дефлекторів, спойлерів та інших елементів, направлених на покращення аеродинаміки. У сучасних вантажних ТЗ, в яких враховано аеродинамічні характеристики, коефіцієнт опору може бути зменшений до 0.5-0.6. Для вантажних ТЗ з причепом коефіцієнт опору збільшується, оскільки причеп створює додаткові опори та становить близько 0.7-0.9. Типові значення C_d для причепів: простий прямокутний причіп (вантажний) C_d=0.6-0.9; аеродинамічний причіп (з обтічниками) C_d=0.4-0.5. Для коліс вантажівки вводиться виправлення залежно від їх розташування щодо кузова: передні колеса ≈0.8 (максимальний опір); задні колеса ≈0.4−0.6 (зменшений опір). Якщо вантажівка має аеродинамічні екрани або обтічники, опір коліс може бути знижений на 20-40%, що враховується через зменшення ефективної площі колеса. Приймаємо C_d=0.5.

Приймаємо габаритні розміри колеса: *D=1.007* м, *w=0.385 м.* Площу обтікання колеса визначаємо за формулою:

$$A = h \cdot w = 1.007 \cdot 0.385 = 0.388 \text{ м}^2, \quad (7)$$

де h - висота колеса (дорівнює діаметру колеса D, м), w - ширина протектора колеса, м.

В якості матеріалу стержня використано поліамід PA6-GF30, границя міцності матеріалу σ_B=90 MPa. Для розрахунку допустимого напруження прийнято коефіцієнт запасу міцності S_F=3, допустиме нормальне напруження $[\sigma]=\sigma_B/S_F$=30 MPa, граничне зсувне напруження $\tau_в = 0{,}6\sigma_в = 54MPa$, допустиме зсувне напруження $[\tau] = \tau_в/S_F =$ 18 МПа, межа витривалості: $\sigma_{витрив} \approx 0{,}2\ \sigma_в = 18MPa$, допустиме втомне напруження $[\sigma]_{витрив} = \frac{\sigma_{витрив}}{SF} = \frac{18}{3} = 6MPa$.

Площа поперечного перерізу стержня визначається за формулою:

$$\text{А}_{\text{попер.}} = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{0.04^2}{4} = 1.256 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad (8)$$

його момент інерції:

$$\text{I} = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 0.04^4}{64} = 1.256 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^4 \quad (9)$$

Момент опору для згину круглого перерізу:

$$W = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 0.04^3}{32} = 6.28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4. \quad (10)$$

На стержень при русі колеса діють наступні сили:

– вага стержня $F_\text{с}$:

$$F_\text{с} = m_\text{с} \cdot g = 0.268 \cdot 9.81 = 2.62 \text{ Н} \quad (11)$$

– відцентрова сила $F_{\text{від.с.}}$ діє на стержень через обертання колеса:

$$F_{\text{від.с.}} = m_\text{с} \cdot \omega^2 \cdot r \quad (12)$$

де $m_\text{с}$ – маса стержня, кг; ω – кутова швидкість обертання колеса, об/с; r – відстань від вісі обертання колеса до центра мас стержня;

– сила інерції $F_\text{і}$ (при русі автомобіля стержень може зазнати інерційні навантаження через прискорення чи гальмування):

$$F_\text{і} = m_\text{с} \cdot \text{а}, \quad (13)$$
$$F_{\text{і}max} = 0.268 \cdot 0.5 = 0.134 \text{ Н}, F_{\text{і}min} = 0.268 \cdot 0.23 = 0.062 \text{ Н}.$$

де а – лінійне прискорення автомобіля, м/с^2.

Силу тяжіння ми не враховуємо, оскільки при обертанні вона врівноважується та дорівнює нулю. Відцентрова сила стержня та сила інерції прикладена в центрі мас та спрямована радіально назовні. Центр мас стержня знаходиться посередині, тобто на відстані $L/2$ по дотичній від точки закріплення. Лінія дії сили $F_{\text{від.}c}$ проходить через центр мас і йде по радіусу.

Прискорення 0.5 м/с² узгоджується з динамічними характеристиками сучасних тягачів потужністю 350–500 к.с. Лінійне прискорення 0.23 м/с² характеризує нормований, енергоощадний режим руху, який відповідає звичайному набору швидкості у міських та міжміських умовах, економічному стилю водіння, руху на частковому навантаженні двигуна. Загальне значення сил, що впливають на стержень при обертанні колеса визначається за формулою:

$$\Sigma F = F_\text{і} + F_{\text{від.с.}} \quad (14)$$

Тоді згинальний момент у защемленні:

$$M = F_{\text{від.}c} \cdot e = m_c\, \omega^2 r \cdot \frac{L}{2}. \quad (15)$$

Момент інерції:

$$I_O = m\left(r^2 + \frac{L^2}{3}\right) = 0.013 \text{ кг·м}^2, \quad (16)$$

Інерційний момент:

$$M_{\text{інерц}} = I_O\alpha = 0{,}013 \cdot 2{,}41 = 0{,}033 \text{ Нм, при а=0,5 м/с}^2, \quad (17)$$
$$M_{\text{інерц}} = I_O\alpha = 0{,}013 \cdot 1{,}11 = 0{,}015 \text{ Нм, при а=0,23 м/с}^2,$$

де кутове прискорення $\alpha = a/R$.

Загальний момент стержня визначається за формулою:

$$\Sigma\text{M} = M_{\text{інерц}} + \text{M}_{F\text{від.с.}}. \quad (18)$$

Максимальне згинальне (нормальне) напруження:

$$\sigma_{\text{зг}} = \frac{\Sigma\text{M}}{W} = \frac{\Sigma\text{M}\cdot 32}{\pi \cdot d^3} \quad (19)$$

де M – згинальний момент, Н·м; W – момент опору для круглого перерізу, м^3.

Максимальне зсувне напруження для круглого перерізу:

$$\tau = \frac{4\Sigma F}{3A}. \quad (20)$$

Результати розрахунку наведемо в табл. 1. Розрахунки виконано при прискоренні 0.5 м/с^2.

Таблиця 1 – Результати розрахунку основних реакцій та крутного моменту колеса причепа

V, км/год.	n=V/2πR, об/с	ω=2πn, рад/с	f	Fкоч, Н	Fа, Н	Ft, Н	$F_{\text{від.с.}}$, Н	ΣF, Н	$\text{M}_{F\text{від.с.}}$, Н	ΣM, Н·м	$\sigma_{\text{зг}}$, Па	τ, Па
20	1.76	11.03	0.02	837.9	3.66	841.56	6.76	6.89	0.51	0.539	83101	7317
40	3.51	22.07	0.03	1367.1	14.66	1381.76	27.03	27.17	2.03	2.060	325240	28840
60	5.27	33.10	0.05	2249.1	32.98	2282.08	60.83	60.96	4.56	4.595	728807	64713
80	7.03	44.14	0.08	3483.9	58.63	3542.53	108.13	108.27	8.11	8.143	1293800	114934
100	8.78	55.17	0.12	5071.5	91.61	5163.11	168.96	169.09	12.67	12.71	2020219	179505
120	10.54	66.20	0.16	7011.9	131.9	7143.82	243.30	243.44	18.25	18.28	2908065	258425
140	12.30	77.24	0.21	9305.1	179.6	9484.66	331.16	331.29	24.84	24.87	3957338	351693

Джерело: розроблено автором

Оскільки $\sigma_{\text{зг}} > [\sigma]_{\text{витрив}} = 6\text{MPa}$, $\tau > [\tau] = 18MPa$ – обраний матеріал та габарити стержня забезпечують довговічність при циклічних навантаженнях.

Висновки. Розроблений пристрій пасивної безпеки забезпечує ефективний візуальний контроль обертання коліс причепа безпосередньо з кабіни водія, що дозволяє своєчасно виявляти їх блокування або інші несправності. Додатковою перевагою є покращення сприйняття габаритів причепа, що спрощує маневрування, зокрема під час руху заднім ходом, та підвищує безпеку гальмування.

Проведені розрахунки на міцність і жорсткість показали, що обраний матеріал і геометричні параметри стержня забезпечують його працездатність в умовах експлуатаційних навантажень. Значення напружень не перевищують допустимих, що підтверджує достатній запас міцності та витривалості при дії циклічних, вібраційних і

аеродинамічних навантажень. Це свідчить про надійність конструкції та її здатність зберігати функціональні властивості під час руху транспортного засобу.

Список літератури

1. Про затвердження Порядку проведення обов'язкового технічного контролю транспортних засобів: постанова Кабінету Міністрів України від 30 січ. 2012 р. № 137.
2. Про затвердження Правил технічної експлуатації коліс і пневматичних шин транспортних засобів: наказ Міністерства інфраструктури України від 26 лип. 2013 р. № 549.
3. Про затвердження методів перевірки технічного стану колісних транспортних засобів: наказ Міністерства інфраструктури України від 24 груд. 2013 р. № 710.
4. Checkpoint. Офіційний сайт. URL: https://checkpoint-safety.com (дата звернення: 06.04.2026).
5. Redcat Industries. Офіційний сайт. URL: https://redcatindustries.com (дата звернення: 06.04.2026).
6. Skiddd. Офіційний сайт. URL: https://skiddd.com (дата звернення: 06.04.2026).
7. Йовченко А.В. Підвищення контролю безпеки переміщення вантажного транспорту з причепами. *Молодь: наука та інновації 2024*: зб. матеріалів конф. XII-ї Міжнар. наук.-техн. конф. студ., аспір. та мол. вчених; 13–15 лист. 2024 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. Том 1. С. 155-156.
8. Йовченко А.В. Розробка пристрою для контролю безпеки руху вантажного транспорту з причепами. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. №11(42) ч.1. С. 230–235. https:doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42)1.230-235.
9. Maxa Group. Офіційний сайт. URL: https://www.maxa-group.com (дата звернення: 06.04.2026).
10. Samsara. Trailer tracking. URL: https://www.samsara.com/products/equipment-tracking/trailer-tracking (дата звернення: 06.04.2026).
11. Nussupbek Zh. T., Bekenov T. N., Sattinova Z. K., Beisenbi M. A., Tassybekov Zh. T. Substantiation of methods for calculation of traction forces redistribution indicators on modular front and rear wheels of the vehicle (4X4). *Transportation Engineering*. 2023. Vol. 13, 100193. DOI: https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100193.
12. Спосіб визначення параметрів контакту колеса автомобіля з дорогою: пат. 102155 Україна: МПК (2015.01) B60B 15/00, G01M 17/02 (2006.01), G01N 19/02 (2006.01). № 2014 13703; заявл. 22.12.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. №20.
13. Mateichyk V., Soltus A., Klimov E., Kostian N., Smieszek M., Kovbasenko S. Regularities of Changes in the Motion Resistance of Wheeled Vehicles along a Curvilinear Trajectory. *Machines*. 2023. Vol. 11, 570, 11050570. DOI: https://doi.org/10.3390/machines11050570.
14. Guo F., Pei J., Zhang J., Li R., Zhou B., Chen Z. Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 303, 124411. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124411.
15. Beshun O. A., Melanchenko Ya. V. Analysis of factors that influence the force and rolling resistance coefficient of a wheel. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2018. Vol. 9, №4, P. 123-131.

References

1. On approval of the Procedure for mandatory technical inspection of vehicles. (2012, January 30). *Kabinet Ministriv Ukrayiny*, № 137.
2. On approval of the Rules for technical operation of wheels and pneumatic tires of vehicles. (2013, July 26). *Ministerstvo Infrastrukturi Ukrayiny*, № 549.
3. On approval of methods for checking the technical condition of wheeled vehicles. (2013, December 24). *Ministerstvo Infrastrukturi Ukrayiny*, № 710.
4. Checkpoint. Website. URL: https://checkpoint-safety.com (date of application: 06.04.2026).
5. Redcat Industries. Website. URL: https://redcatindustries.com (date of application: 06.04.2026).
6. Skiddd. Website. URL: https://skiddd.com (date of application: 06.04.2026).
7. Yovchenko, A.V. (2024). Improving the safety control of the movement of freight transport with trailers. *Molod: nauka ta innovatsii*: materialy mizhnarodnoyi naukovo-technychnoyi konferentsiyi studentiv, aspirantiv ta molodich vchenih (pp. 155-156). Dnipro: Astroprint [in Ukrainian].
8. Yovchenko, A.V. (2025). Development of a device for monitoring the safety of freight transport with trailers. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 11(42), 230–235 [in Ukrainian]. https:doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42)1.230-235.
9. Maxa Group. Website. URL: https://www.maxa-group.com (date of application: 06.04.2026).

10. Samsara. Trailer tracking. Website. URL: https://www.samsara.com/products/equipment-tracking/trailer-tracking (date of application: 06.04.2026).
11. Nussupbek, Zh. T., Bekenov, T. N., Sattinova, Z. K., Beisenbi ,M. A., Tassybekov, Zh. T. Substantiation of methods for calculation of traction forces redistribution indicators on modular front and rear wheels of the vehicle (4X4). *Transportation Engineering*, 13 (2023), 100193. https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100193.
12. Sposib vyznachennia parametriv kontaktu kolesa avtomobilia z dorohoiu: Patent UA 102155, IPC B60B 15/00, G01M 17/02, G01N 19/02 (published 26.10.2015).
13. Mateichyk, V., Soltus, A., Klimov, E., Kostian, N., Smieszek, M., Kovbasenko, S. Regularities of Changes in the Motion Resistance of Wheeled Vehicles along a Curvilinear Trajectory. *Machines*. 11 (2023), 570, 11050570. DOI: https://doi.org/10.3390/machines11050570.
14. Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Li, R., Zhou, B., Chen, Z. Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective. *Construction and Building Materials*. 303 (2021), 124411. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124411.
15. Beshun, O. A., Melanchenko, Ya. V. Analysis of factors that influence the force and rolling resistance coefficient of a wheel. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 9 (2018), 4, 123-131.

Alla Yovchenko, PhD tech. sci.
Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Research of a Passive Safety Device to Increase the Reliability and Safety of Transport Processes During Logistics Transportation

The current problem of increasing the safety of operation of freight vehicles and trailers is considered, associated with the need for timely detection of wheel malfunctions during movement. In particular, a particular danger is the blocking or jamming of trailer wheels, which can lead to deterioration of vehicle controllability, increased braking distance, intensive tire wear, increased fuel consumption and the occurrence of emergency situations. In the conditions of modern transport, where reliability, efficiency and safety are important, the issue of monitoring the technical condition of the chassis becomes particularly relevant.

A description of the device design and the principle of its operation are given. The proposed design allows you to quickly determine the fact of rotation or locking of the wheels, and also contributes to a better perception of the dimensions of the trailer, which is especially important when maneuvering in limited conditions and reversing. The device provides the ability to visually monitor the condition of the wheels during braking, which allows you to respond in a timely manner to the occurrence of dangerous situations. The main attention is paid to the study of the strength and stiffness of the key element - the rod, which operates under conditions of variable and cyclic loads. Calculations were made taking into account operational factors, in particular vibration, shock and aerodynamic effects. The analysis showed that the equivalent stresses and tangential stresses do not exceed the permissible values, which indicates a sufficient margin of strength, stiffness and durability of the structure during long-term operation.

Thus, the developed device is an effective, simple and economically feasible means of increasing the safety of freight vehicles and trailers. Its implementation allows to reduce the risk of dangerous situations on the road, increase the driver's awareness of the technical condition of the wheels, improve the conditions for driving the vehicle and reduce operating costs.

passive safety, cargo vehicle, trailer, diagnostics of wheel rotation, strength

Одержано (Received) 02.04.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 06.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 711.4 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).416-424

К. М. Березька, доц., канд. техн. наук, **О. С. Шевчук,** доц., канд. техн. наук,
П. В. Панасюк, проф., д-р техн. наук
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна
І. С. Мурований, доц., канд. техн. наук
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
e-mail: k.berezka@wunu.edu.ua, oksana_shevchuk84@ukr.net, tina.panasjuk@gmail.com, igor_lntu@ukr.net

Математичне моделювання транспортної конфліктності для оцінювання небезпеки для проектних рішень на вулично-дорожній мережі міст

Метою статті є розроблення підходу до оцінювання безпеки дорожнього руху на основі математичного моделювання транспортної конфліктності на міських перехрестях. Дослідження спрямоване на встановлення залежності між показником конфліктності та інтенсивністю транспортних потоків, а також обґрунтування можливості його використання для виявлення небезпечних транспортних вузлів.

У роботі використано методи аналізу інтенсивності транспортних потоків та розрахунок показника конфліктності *m*, який враховує кількість і тип конфліктних точок на перехрестях. Дослідження проведено для ключових транспортних вузлів м. Тернопіль у ранковий та вечірній пікові періоди. Виконано кореляційний аналіз, за результатами якого встановлено помірний прямий зв'язок між показником конфліктності та інтенсивністю руху (коефіцієнти кореляції r=0,611 та r=0,600). Побудовано лінійну регресійну модель, яка описує залежність інтенсивності руху від показника конфліктності та показує, що зі зростанням складності транспортного вузла збільшується його завантаження. Отримані результати узгоджуються з сучасними підходами до оцінювання безпеки дорожнього руху на основі аналізу конфліктних ситуацій. Також встановлено вплив просторової структури міста та розподілу транспортних потоків на формування зон підвищеного ризику.

Результати дослідження підтверджують, що математичне моделювання транспортної конфліктності є ефективним інструментом оцінювання складності локальних перехресть та подальших проектних рішень на вулично-дорожній мережі. Показник конфліктності може використовуватися для раннього виявлення потенційно небезпечних транспортних вузлів. Розроблена модель дозволяє оцінювати рівень транспортного навантаження залежно від складності перехрестя та може бути використана при прийнятті управлінських та проектних рішень у сфері організації дорожнього руху. Запропонований підхід доцільно застосовувати при розробці схем організації дорожнього руху та плануванні розвитку міської транспортної інфраструктури. Отримані результати сприяють підвищенню рівня безпеки дорожнього руху та ефективності функціонування міських транспортних систем.

безпека дорожнього руху, транспортна конфліктність, математичне моделювання, інтенсивність руху, транспортні вузли

Постановка проблеми. Сучасний стан вулично-дорожньої мережі міст України характеризується суттєвим дисбалансом між рівнем автомобілізації та пропускною здатністю інфраструктури. У містах середнього розміру, зокрема в м. Тернопіль, спостерігається концентрація транспортних потоків у центральній частині міст, що призводить до зростання аварійності та транспортних заторів.

Аналіз статистичних даних свідчить про зростання кількості дорожньо-транспортних пригод із потерпілими, що пов'язано не лише з інтенсивністю руху, а й зі складністю транспортних вузлів. У таких умовах традиційні підходи до організації дорожнього руху виявляються недостатньо ефективними.

© К. М. Березька, О. С. Шевчук, П.В. Панасюк, І. С. Мурований, 2026

Одним із перспективних напрямів підвищення безпеки є використання методів математичного моделювання, які дозволяють здійснювати превентивний аналіз небезпечних ситуацій на основі оцінки конфліктності транспортних потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних закордонних дослідженнях безпеки дорожнього руху домінують два підходи: аналіз впливу швидкості на ймовірність і тяжкість наслідків ДТП та оцінювання небезпеки на основі конфліктних ситуацій. У межах моделі потужності доведено нелінійний зв’язок між зміною середньої швидкості та наслідками ДТП: зростання швидкості значно сильніше впливає на тяжкі та смертельні пригоди, ніж на загальну аварійність [1 – 2]. Водночас у роботі [4] експериментально доведено, що контроль середньої швидкості є ефективним інструментом зниження як швидкості транспортного потоку, так і кількості ДТП. Паралельно активно розвиваються методи непрямого оцінювання безпеки дорожнього руху та метод аналізу транспортних конфліктів, які дозволяють оцінювати небезпеку транспортних вузлів за такими непрямими показниками, як час до зіткнення та час після звільнення конфліктної зони та параметри зближення транспортних засобів [5, 6]. Сучасні оглядові дослідження підтверджують, що такі методи є ефективним інструментом проактивного виявлення небезпечних ділянок, особливо на перехрестях і в умовах складної міської мережі [5, 6].

У вітчизняних дослідженнях значна увага приділяється оцінюванню безпеки дорожнього руху та аналізу причин ДТП. Зокрема, у роботі [7] показано, що оцінювання безпеки дорожнього руху має базуватися на комплексному аналізі показників аварійності та характеристик транспортних потоків, що є важливим підґрунтям для дослідження конфліктності транспортних вузлів, тоді як у дослідженні [8] встановлено, що порушення правил використання засобів регулювання дорожнього руху є однією з вагомих причин аварійності. У роботі [9] показано, що аналіз інтенсивності транспортних потоків є ефективним інструментом виявлення проблемних транспортних вузлів та обґрунтування заходів щодо підвищення безпеки дорожнього руху. У роботі [10] досліджено конфліктні точки на складних міських перехрестях та запропоновано заходи щодо підвищення їхньої ефективності. Доцільність застосування математичних і аналітичних підходів у транспортній галузі розглянуто у роботах [11–12], зокрема в [11] розглянуто питання модернізації транспортних систем середніх міст в роботі [12] – використання математичних методів у транспортній логістиці.

Разом із тим недостатньо дослідженим залишається питання узгодження показників конфліктності транспортних вузлів з інтенсивністю руху в пікові періоди, що й визначає актуальність цього дослідження.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка підходу до оцінювання безпеки транспортних вузлів на основі математичного моделювання конфліктності транспортних потоків.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- проаналізувати інтенсивність транспортних потоків;
- визначити показник конфліктності транспортних вузлів;
- встановити залежність між інтенсивністю руху та показником конфліктності;
- обґрунтувати напрями підвищення безпеки дорожнього руху.

Виклад основного матеріалу. Вплив інтенсивності транспортних потоків на безпеку дорожнього руху в Тернополі є визначальним чинником, оскільки радіальна структура міста змушує основні маси автомобілів концентруватися в центральній частині та на кількох ключових розв'язках. Аналіз наявної картограми дозволяє простежити чітку залежність між рівнем завантаженості доріг та рівнем небезпеки окремого перехрестя. На ділянках із максимальною інтенсивністю, таких як Дамба або вулиця Руська, висока щільність потоку призводить до зниження середньої швидкості,

що мінімізує кількість фатальних випадків, проте провокує масові дрібні зіткнення через недотримання безпечної дистанції.

Водночас зони середньої інтенсивності, зокрема Об'їзна дорога та вулиця Микулинецька, виявляються найбільш небезпечними з точки зору тяжкості наслідків. Наявність вільного простору при достатньо щільному потоці спонукає водіїв до перевищення швидкісного режиму, що стає причиною кожної другої аварії в регіоні та часто призводить до перекидань або лобових зіткнень. Особливу загрозу становлять перевантажені вузли, а саме район Ватри або розв'язка на проспекті Злуки, де надмірне скупчення транспорту змушує водіїв здійснювати ризиковані маневри обгону та перестроювання, намагаючись подолати затори.

Висока інтенсивність руху на магістральних вулицях також створює критичні ризики для вразливих учасників дорожнього руху, формуючи так званий ефект бар'єра. Коли щільність потоку перевищує пропускну здатність смуг, безпечний перехід дороги стає майже неможливим, що штовхає пішоходів на порушення правил і перехід у невстановлених місцях. Це безпосередньо корелює з піковими годинами травматизму, коли різке зростання кількості авто в поєднанні з нервозністю водіїв призводить до сплеску аварійності. Для виправлення ситуації необхідно впроваджувати адаптивне світлофорне регулювання та фізичне розділення потоків у найбільш завантажених точках міста.

Результати визначення інтенсивності руху транспортних потоків для представлено на Рисунку 1, 2 у вигляді картограми.

Слід звернути увагу на розподіл значень інтенсивності транспортних потоків на південній ділянці об'їзної дороги. Збільшення значень інтенсивності відбувається в місцях, де наявна придорожня забудова, а не в точках примикання транзитних потоків. Це дозволяє з'ясувати принцип розподілу транзиту в місті.

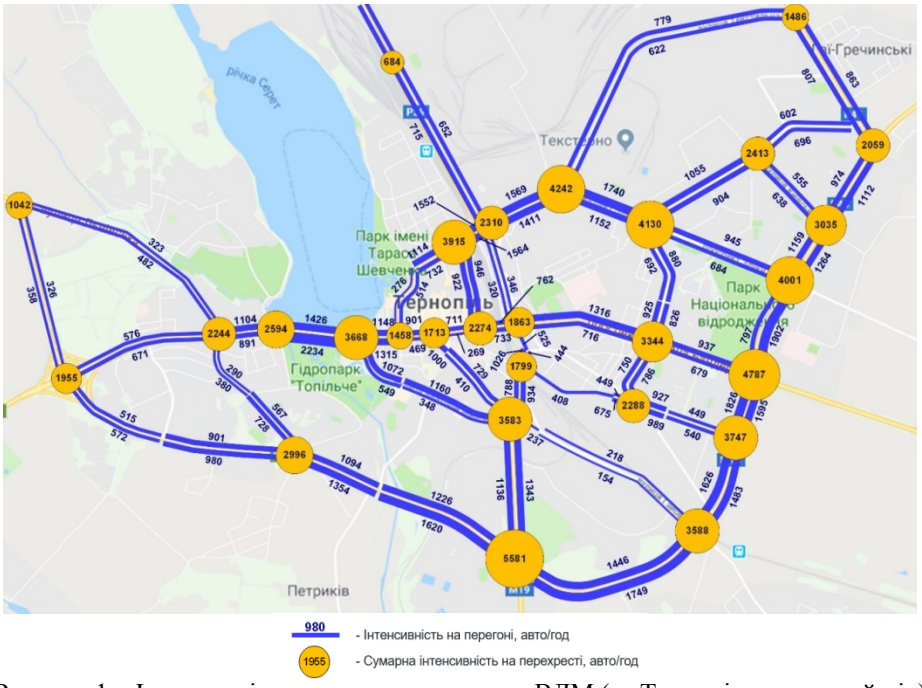


Рисунок 1 – Інтенсивність дорожнього руху на ВДМ (м. Тернопіль, ранковий пік)
Джерело: розроблено авторами

Картограми для ранкового та вечірнього пікового періодів розроблено на основі натурних досліджень та створено для візуалізації інтенсивності руху транспортних потоків.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найвища інтенсивність руху транспортних потоків спостерігається на вулицях Руська в межах гідропарку Топільче,

Живова в напрямку від центру, Збаразька, Злуки, між перехрестями з вулицями Текстильною та Тарнавською і на автошляху Е85.

Найбільш завантаженим також є перехрестя вулиць Микулинецька, Степана Будного, дороги Е85. За годину його перетинає 5432 одиниці транспорних засобів, значення інтенсивності приведене до легкового автомобіля.



Рисунок 2 – Інтенсивність дорожнього руху на ВДМ (м. Тернопіль, вечірній пік)
Джерело: розроблено авторами

За ключовими перехрестями в м. Тернопіль у різних мікрорайонах міста визначимо небезпеку пересічення транспортних потоків і складність заданого перехрестя за показником конфліктності m. Результати досліджень зводимо в Таблицю 1. Даний показник базується на кількості та типі конфліктних точок відхилення, злиття та перетину, що виникають при взаємодії транспортних потоків.

Обчислення показника конфліктності проведемо за формулою:

$$m = N_d + 3N_m + 5N_c,$$

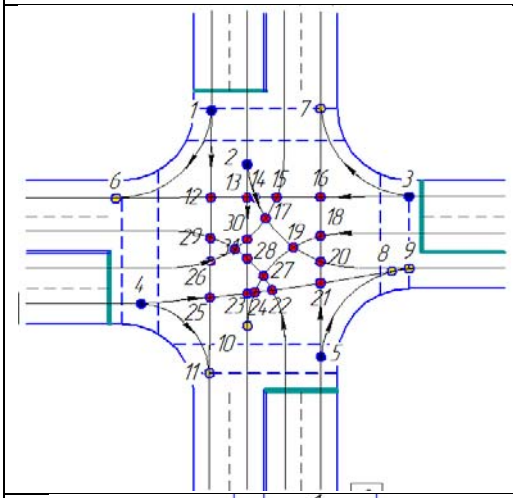
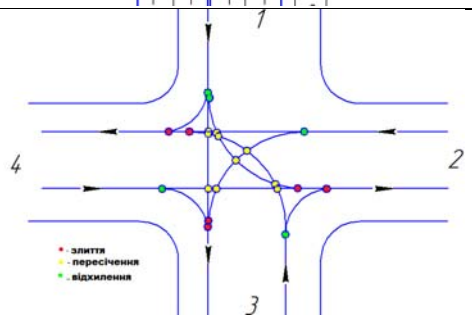
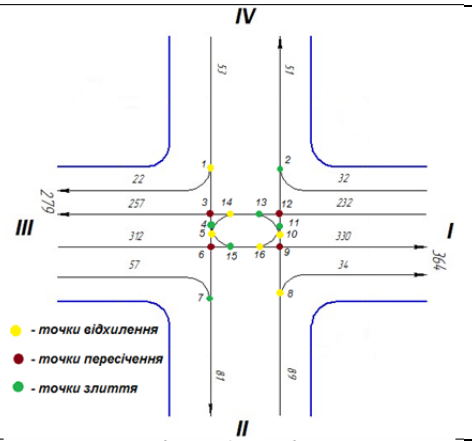
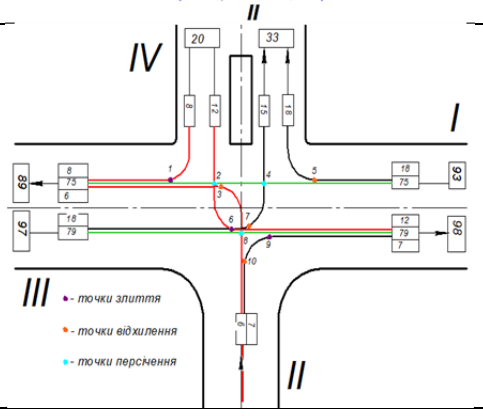
де N_d – кількість точок відхилення; N_m – кількість точок злиття; N_c – кількість точок перетину.

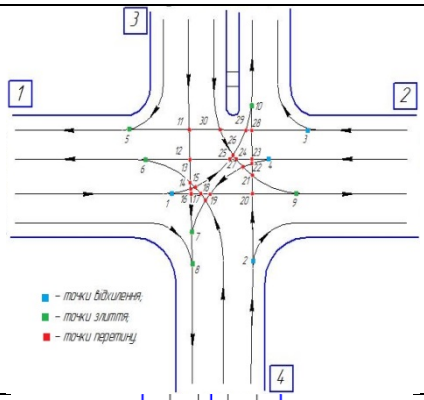
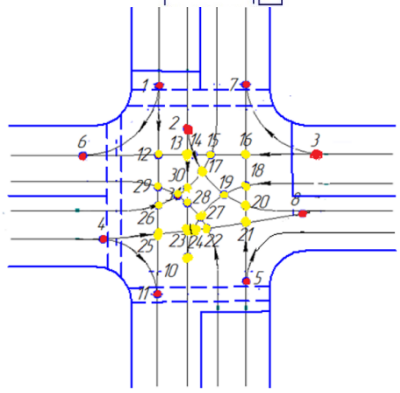
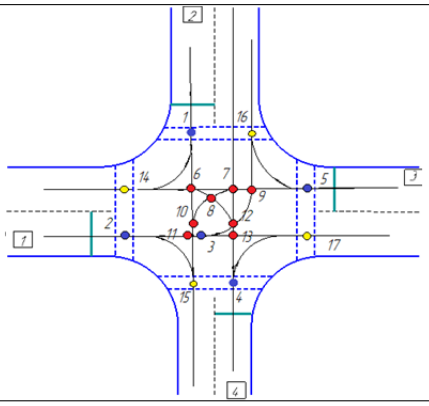
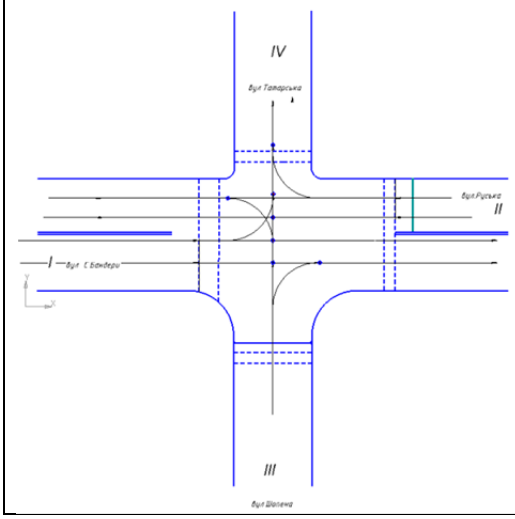
Відповідно до класифікації, вузли поділяються за складністю на: прості ($m < 40$), середні ($40 \leq m < 80$) та складні ($m > 80$).

Методика оцінки складності транспортних вузлів Тернополя через розрахунок показника конфліктності m дає можливість визначити складність перехрестя, для подальших інженерно-технічних заходів покращення дорожнього руху.

У Таблиці 1 наведено результати оцінювання конфліктності ключових транспортних вузлів м. Тернопіль на основі схеми утворення конфліктних точок. Для кожного перехрестя подано розрахунок показника конфліктності m, назву перетину вулиць та відповідну категорію складності. Значення показника m визначено з урахуванням кількості конфліктних точок різних типів, що дає змогу кількісно оцінити потенційну небезпеку транспортного вузла. На основі одержаних результатів перехрестя класифіковано на прості, середньої складності та складні. Такий підхід дозволяє виявити найбільш проблемні вузли вулично-дорожньої мережі міста та обґрунтувати доцільність подальших інженерно-організаційних заходів та проектних рішень, щодо підвищення безпеки дорожнього руху та покращення дорожньої ситуації.

Таблиця 1 – Розрахунок показника конфліктності та визначення категорій складності транспортних вузлів м. Тернопіль

Схема конфліктних точок	Розрахунок показника конфліктності	Транспортний вузол	Категорія складності
	$m = 5 + 3 \square 6 + 5 \square 24 = 143$	вул.15 Квітня – вул. Купчинського	Складний
	$m = 5 + 3 \square 6 + 5 \square 10 = 73$	вул. Торговиця – вул. Шашкевича	Середньої складності
	$m = 6 + 3 \square 6 + 5 \square 4 = 44$	вул. С. Будного – В. Винниченка	Середньої складності
	$m = 4 + 3 \square 2 + 5 \square 3 = 25$	В. Чорновола – Б.Хмельницького	Простий

	$m = 4 + 3 \square 6 + 5 \square 20 = 122$	вул.С. Бандери – вул. Є. Коновальця	Складний
	$m = 5 + 3 \square 6 + 5 \square 24 = 143$	вул. М. Кривоноса – вул. Львівська	Складний
	$m = 5 + 3 \square 4 + 5 \square 8 = 57$	вул. О. Теліги – вул. За Рудкою	Середньої складності
	$m = 0 + 3 \square 4 + 5 \square 4 = 32$	вул. Шопена – вул. С. Бандери	Простий

Джерело: розроблено авторами

У таблиці 2 подано значення показника конфліктності m та інтенсивності транспортних потоків на ключових перехрестях м. Тернопіль у пікові періоди. Це дозволяє оцінити залежність між складністю транспортного вузла та рівнем його завантаження.

Таблиця 2 – Показники конфліктності та інтенсивності транспортних потоків на ключових перехрестях м. Тернопіль у пікові періоди

Транспортний вузол	Показник m	Інтенсивність ранковий пік	Інтенсивність вечірній пік
вул. 15 Квітня – вул. Купчинського	143	4001	3821
вул. Торговиця – вул. Шашкевича	73	3583	3548
вул. С. Будного – вул. В. Винниченка	44	2996	2896
вул. В. Чорновола – вул. Б.Хмельницького	25	935	770
вул. С. Бандери – вул. Є. Коновальця	122	3344	3093
вул. М. Кривоноса – вул. Львівська	143	2244	2155
вул. О. Теліги – вул. За Рудкою	57	1543	1657
вул. Шопена – вул. С. Бандери	32	1863	1693

Для встановлення взаємозв’язку між показником конфліктності транспортних вузлів та інтенсивністю руху проведено кореляційний аналіз. За результатами розрахунків отримано коефіцієнти кореляції:

$r = 0{,}611$ (ранковий пік), $r = 0{,}600$ (вечірній пік).

Отримані результати кореляційного аналізу підтверджують гіпотезу про існування статистично значущого зв’язку між показником конфліктності та інтенсивністю транспортних потоків. Значення коефіцієнтів кореляції вказують на помірну залежність, що свідчить про вплив конфігурації транспортного вузла на рівень його завантаження.

Для кількісного опису залежності між показником конфліктності та інтенсивністю транспортних потоків побудовано лінійні регресійні моделі для ранкового та вечірнього пікових періодів.

Для ранкового піку отримано рівняння:

$$I_{\text{ранок}} = 1491 + 13{,}4\, m$$

Для вечірнього піку:

$$I_{\text{вечір}} = 1400 + 12{,}5\, m$$

Отримані моделі свідчать, що зі збільшенням показника конфліктності на одиницю інтенсивність транспортного потоку зростає в середньому на 12–13 авт/год. Це підтверджує, що складні транспортні вузли характеризуються вищим рівнем завантаження.

Коефіцієнти кореляції $r = 0{,}611$ (ранковий пік), $r = 0{,}600$ (вечірній пік), які свідчать про помірний прямий зв’язок між змінними, підтверджують адекватність побудованих моделей.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що між показником конфліктності транспортних вузлів та інтенсивністю руху існує помірний прямий зв’язок: коефіцієнт кореляції становить r=0,611 для ранкового піку та r=0,600 для вечірнього піку. Побудовані регресійні моделі підтвердили, що зі зростанням показника

конфліктності *m* підвищується інтенсивність транспортних потоків, що свідчить про більший рівень завантаження складних транспортних вузлів. Отримані результати доводять доцільність використання математичного моделювання транспортної конфліктності для раннього виявлення потенційно небезпечних перехресть та обґрунтування заходів з удосконалення організації дорожнього руху. Практичне значення дослідження полягає в можливості застосування запропонованого підходу при розробці схем організації дорожнього руху та проектних рішень щодо стратегій розвитку міської транспортної інфраструктури.

Список літератури

1. World Health Organization. (2023). Speed management: A road safety manual for decision-makers and practitioners (2nd ed.). WHO.
2. Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. H. (2004). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Transportøkonomisk Institutt.
3. Elvik, R. (2009). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Institute of Transport Economics.
4. Lahrmann, H., Brasso, B., Johansen, J. V., & Madsen, J. C. O. (2016). Safety impact of average speed control in the UK. Journal of Transportation Technologies, 6(5). https://doi.org/10.4236/jtts.2016.65028
5. Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: Open questions and some insights. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(7). https://doi.org/10.1139/cjce-2013-055
6. Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., & Sayed, T. (2021). A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques. Accident Analysis & Prevention, 153, Article 106016. https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106016
7. Абрамова, Л. С., Наглюк, І. С., & Левченко, Є. С. (2016). Аналіз методів проведення камеральних та польових досліджень аудиту безпеки дорожнього руху. Вісник ХНАДУ, 75, 182–187.
8. Ільченко, А., & Шумляківський, В. (2021). Порушення правил використання засобів регулювання дорожнього руху як можлива причина дорожньо-транспортної пригоди. Вісник машинобудування та транспорту, 2(14), 26–32. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-26-32
9. Линник, І. Є., Завальний, О. В., Вакуленко, К. Є., & Бурко, Д. Л. (2023). Дослідження інтенсивності транспортних потоків на вулицях міста Харкова. Вісник ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. https://doi.org/10.31713/vt2202330
10. Вознюк, К. А., & Бауман, К. В. (2020). Аналіз складних перехрещень вулиць біля Кумбар та пропозиції щодо підвищення їх ефективності. https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28913
11. Шевчук, О. С., Захарчук, О. П., Фалович, Н. М., Березька, К. М., & Сіран, Р. В. (2024). Концептуальні основи модернизації транспортної інфраструктури середніх міст в Україні. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 1(22), 369–377. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1380
12. Березька, К. М., Шевчук, О. С., Фалович, Н. М., & Бубняк, Ю. Р. (2024). Аналіз проблем і математичних методів для їх вирішення в транспортній логістиці. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 9(40), Part 2, 174–181. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.174-181

References

1. World Health Organization. (2023). Speed management: A road safety manual for decision-makers and practitioners (2nd ed.). WHO.
2. Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. H. (2004). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Transportøkonomisk Institutt.
3. Elvik, R. (2009). Speed and road accidents: An evaluation of the power model. Institute of Transport Economics.
4. Lahrmann, H., Brasso, B., Johansen, J. V., & Madsen, J. C. O. (2016). Safety impact of average speed control in the UK. Journal of Transportation Technologies, 6(5). https://doi.org/10.4236/jtts.2016.65028
5. Zheng, L., Ismail, K., & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: Open questions and some insights. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(7). https://doi.org/10.1139/cjce-2013-055
6. Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., & Sayed, T. (2021). A systematic mapping review of surrogate safety assessment using traffic conflict techniques. Accident Analysis & Prevention, 153, Article 106016. https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106016

7. Abramova, L. S., Nahliuk, I. S., & Levchenko, Ye. S. (2016). Analiz metodiv provedennia kameralnykh ta polovykh doslidzhen audytu bezpeky dorozhnoho rukhu. Visnyk KhNADU, 75, 182–187 [in Ukrainian].
8. Ilchenko, A., & Shumliakivskyi, V. (2021). Porushennia pravyl vykorystannia zasobiv rehuliuvannia dorozhnoho rukhu yak mozhlyva prychyna dorozhno-transportnoi pryhody. Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, 2(14), 26–32 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-26-32
9. Lynnyk, I. Ye., Zavalnyi, O. V., Vakulenko, K. Ye., & Burko, D. L. (2023). Doslidzhennia intensyvnosti transportnykh potokiv na vulytsiakh mista Kharkova. Visnyk KhNUMH im. O. M. Beketova [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31713/vt2202330
10. Vozniuk, K. A., & Bauman, K. V. (2020). Analiz skladnykh perekhreshchen vulyts bilia Kumbar ta propozytsii shchodo pidvyshchennia yikh efektyvnosti [in Ukrainian]. https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28913
11. Shevchuk O., Zakharchuk O., Falovych N., Berezka K., Siran R. (2024). Conceptual basis of modernization of transport infrastructure of medium cities in Ukraine. Advances in mechanical engineering and transport, 1(22), 369–377. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1380
12. Berezka K., Shevchuk O., Falovych N., Bubnyak Y. (2024). Analysis of problems and mathematical methods for their solution in transport logistics, 9(40), Part 2, 174–181. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.174-181.

Kateryna Berezka, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oksana Shevchuk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyna Panasyuk,** Prof., DSc., **Igor Murovanyi,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Mathematical Modeling of Traffic Conflicts for Assessing the Risk of Design Decisions on the Street and Road Network of Cities

The purpose of this study is to develop a mathematical approach to assessing road safety based on the modeling of traffic conflicts at urban intersections. The research aims to identify the relationship between the traffic conflict index and traffic flow intensity and to justify its use for detecting hazardous transport nodes.

The study is based on the analysis of traffic flow intensity and the calculation of a traffic conflict index mmm, which reflects the number and type of conflict points at intersections. Data for key transport nodes of Ternopil were collected for morning and evening peak periods. A correlation analysis was conducted to determine the relationship between traffic conflict and traffic intensity, resulting in correlation coefficients of r=0.611 and r=0.600, respectively. A linear regression model was developed to describe this relationship, demonstrating that an increase in the conflict index leads to a corresponding growth in traffic intensity. The results confirm that complex intersections with higher conflict levels tend to experience greater traffic load. The obtained findings are consistent with modern approaches to proactive road safety assessment based on indirect indicators such as traffic conflicts. The study also highlights the influence of urban structure and traffic distribution on the formation of hazardous zones.

The results of the study confirm that mathematical modeling of traffic conflicts is an effective tool for road safety assessment. The traffic conflict index can be used as an indicator for early detection of potentially dangerous transport nodes. The developed model allows for estimating traffic load depending on intersection complexity and supports decision-making in traffic management. The proposed approach can be applied in urban transport planning and in the development of traffic organization schemes. The findings contribute to improving road safety and optimizing the functioning of urban transport systems.

road safety, traffic conflicts, mathematical modeling, traffic flow intensity, transport nodes

Одержано (Received) 26.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 03.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026

УДК 656.078 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).425-435

С. В. Цимбал, доц., канд. техн. наук, **В. С. Глиняний**
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна
e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net, victorglin9@gmail.com

Сучасні методи покращення організації пасажирського транспорту на міських та приміських маршрутах

У статті досліджуються підходи до підвищення ефективності інтеграції пасажирських транспортних систем, зокрема міжміського та місцевого сполучення. Проаналізовано ключові проблеми, пов'язані з недостатнім розвитком інфраструктури, неузгодженістю транспортних послуг і складністю організації пересадок між різними видами транспорту. Розглянуто рішення щодо розвитку транспортних вузлів, оптимізації маршрутної мережі та покращення взаємодії між різними видами транспорту. Особливу увагу приділено підвищенню якості місцевих транспортних послуг, зокрема через інтегроване планування розкладів, збільшення частоти руху та впровадження прямих сполучень. Висвітлено заходи щодо вдосконалення пересадкових пунктів, включаючи розвиток інфраструктури, підвищення рівня комфорту та забезпечення доступності для всіх категорій пасажирів. Досліджено сучасні підходи до організації квиткування та тарифної політики, зокрема впровадження інтегрованих квитків, смарт-карток і цифрових сервісів. Значну увагу приділено інформаційному забезпеченню, маркетинговим стратегіям і створенню єдиного інформаційного простору для користувачів транспортних послуг. Також розглянуто організаційні та регуляторні заходи, спрямовані на координацію діяльності різних транспортних операторів, розвиток партнерства та удосконалення системи управління галуззю. Визначено, що комплексне впровадження інфраструктурних, технологічних та управлінських рішень сприяє підвищенню ефективності транспортної системи, скороченню часу подорожі, зниженню витрат і покращенню комфорту та безпеки пасажирів.

пасажирські перевезення, транспортна інтеграція, міський транспорт, приміський транспорт, мультимодальний транспорт, транспортна інфраструктура, пересадочні вузли, системи продажу квитків, розумна мобільність, транспортні послуги

Постановка проблеми. Сучасний розвиток міських та міжміських пасажирських перевезень характеризується зростанням мобільності населення та ускладненням транспортних зв'язків, що обумовлює необхідність формування ефективно інтегрованих транспортних систем. Водночас існуючі підходи до організації пасажирських перевезень залишаються фрагментованими, орієнтованими переважно на окремі види транспорту або локальні ринки послуг, що призводить до низького рівня узгодженості між різними елементами транспортної мережі.

Однією з ключових проблем є недостатня інтеграція міжміських та місцевих транспортних систем, зокрема відсутність ефективних сполучень між пересадковими вузлами (аеропортами, залізничними вокзалами, портами) та центрами міст. Це проявляється у невідповідності пропускної спроможності інфраструктури, недостатній кількості або якості транспортних послуг, а також у значних часових витратах пасажирів при здійсненні пересадок. Додатково ускладнюють ситуацію транспортні затори, обмеженість інвестиційних ресурсів та високі витрати на створення нової інфраструктури.

Суттєвою проблемою є також низький рівень координації між перевізниками та органами влади, що зумовлює неузгодженість розкладів руху, тарифної політики та інформаційного забезпечення. Відсутність інтегрованих систем квиткування, єдиних стандартів інформування та спільних маркетингових підходів знижує привабливість громадського транспорту та ускладнює реалізацію мультимодальних перевезень.

© С. В. Цимбал, В. С. Глиняний, 2026

Окремим аспектом проблеми є недосконаліть організації пересадкових процесів, що включає недостатній рівень комфорту, доступності та безпеки на транспортних вузлах, а також складність процедур, пов'язаних із перевезенням багажу та отриманням транспортних послуг. Це призводить до збільшення загального часу подорожі «від дверей до дверей» та зниження якості обслуговування пасажирів.

Крім того, існують інституційні та регуляторні бар'єри, які обмежують ефективну взаємодію між учасниками транспортного ринку, зокрема через недосконаліть механізмів розподілу доходів, відсутність єдиного стратегічного управління та недостатній розвиток партнерських моделей.

Таким чином, проблема полягає у необхідності розроблення комплексного підходу до інтеграції пасажирських транспортних систем, який би забезпечував узгодженість інфраструктурних рішень, транспортних послуг, тарифної політики, інформаційного забезпечення та управлінських механізмів з метою підвищення ефективності, доступності та якості транспортного обслуговування населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання інтеграції пасажирських транспортних систем, розвитку мультимодальних перевезень та підвищення ефективності транспортного обслуговування активно досліджуються як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями. Сучасні дослідження можна умовно згрупувати за кількома ключовими напрямами.

По-перше, значна увага приділяється розвитку мультимодальних перевезень як основи інтеграції транспортних систем. У роботах українських дослідників підкреслюється, що ефективне функціонування транспортної системи неможливе без створення транспортно-логістичних хабів та інтеграції різних видів транспорту в єдину мережу. Зокрема, зазначається необхідність формування єдиних логістичних платформ та цифровізації транспортних процесів для підвищення їх ефективності [1]. Водночас дослідження показують, що розвиток мультимодальних перевезень в Україні стримується інфраструктурними обмеженнями, недосконалістю нормативно-правової бази та низьким рівнем координації між учасниками ринку [2].

По-друге, окремий напрям досліджень пов'язаний з організацією пересадкових процесів та функціонуванням транспортно-пересадочних вузлів. Науковці наголошують, що ключовими умовами ефективної мультимодальної системи є узгодженість розкладів руху, скорочення часу пересадки та інтеграція інформаційних технологій у процес обслуговування пасажирів. Це дозволяє оптимізувати використання транспортних засобів і зменшити загальні витрати часу пасажирів [3].

По-третє, у сучасних дослідженнях активно розвиваються економіко-математичні та мережеві підходи до аналізу транспортних систем. Зокрема, мультимодальні транспортні системи розглядаються як багаторівневі (multilayer) мережі, де різні види транспорту функціонують як взаємопов'язані підсистеми. Такий підхід дозволяє більш точно моделювати поведінку пасажирів, оцінювати ефективність маршрутної мережі та визначати вузькі місця транспортної інфраструктури [4]. Крім того, сучасні моделі враховують інтеграцію громадського транспорту з новими формами мобільності (каршеринг, спільні поїздки), що впливає на розподіл пасажиропотоків і транспортну рівновагу [5].

По-четверте, важливим напрямом є дослідження ефективності функціонування пасажирського транспортного комплексу. Встановлено, що якість транспортного обслуговування визначається не лише технічними характеристиками транспорту, а й рівнем взаємодії між його видами, що вимагає комплексного підходу до управління транспортною системою [6].

Окрему увагу приділено питанням сталого розвитку та екологізації транспортних систем. Дослідження доводять необхідність переходу до екологічно

орієнтованих мультимодальних рішень, що дозволяють зменшити негативний вплив транспорту на довкілля та підвищити енергоефективність перевезень [7].

Крім того, сучасні роботи акцентують увагу на управлінні ризиками та адаптації транспортних систем до зовнішніх викликів (економічних, геополітичних, інфраструктурних). Зокрема, підкреслюється необхідність підвищення стійкості транспортних систем через диверсифікацію маршрутів та інтеграцію різних видів транспорту [8].

Таким чином, аналіз останніх досліджень свідчить про значний науковий інтерес до проблем інтеграції пасажирських транспортних систем. Водночас більшість наукових праць зосереджена або на окремих видах транспорту, або на вантажних перевезеннях, тоді як питання комплексної інтеграції пасажирських перевезень, з урахуванням поведінкових факторів пасажирів, цифровізації та організаційних аспектів взаємодії операторів, залишаються недостатньо дослідженими. Це обумовлює необхідність подальших наукових розробок у даному напрямі.

Постановка завдання. З урахуванням виявлених проблем та результатів аналізу сучасних досліджень, основним науково-практичним завданням є розробка комплексного підходу до інтеграції пасажирських транспортних систем, спрямованого на підвищення ефективності функціонування міських і міжміських перевезень та покращення якості обслуговування пасажирів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі взаємопов’язані завдання:

- проаналізувати існуючий стан організації пасажирських перевезень та рівень інтеграції різних видів транспорту в межах транспортної системи;
- визначити ключові фактори, що впливають на ефективність мультимодальних перевезень, зокрема часові, економічні, організаційні та інформаційні;
- розробити модель інтегрованої транспортної системи, яка враховує взаємодію різних видів транспорту, особливості пересадкових процесів та поведінку пасажирів;
- сформувати підходи до оптимізації маршрутної мережі та узгодження розкладів руху з урахуванням принципів «безшовності» перевезень;
- обґрунтувати доцільність впровадження інтегрованих тарифних систем і єдиного квитка для різних видів транспорту;
- розробити рекомендації щодо вдосконалення інфраструктури транспортно-пересадочних вузлів та підвищення їх функціональної ефективності;

Таким чином, постановка завдання полягає у створенні науково обґрунтованої моделі інтегрованої пасажирської транспортної системи та розробці практичних рекомендацій щодо її впровадження, що забезпечить підвищення конкурентоспроможності громадського транспорту та задоволення потреб населення у якісних транспортних послугах.

Виклад основного матеріалу. Ефективна інтеграція систем пасажирського транспорту вимагає хорошого міжміського сполучення, яке не може бути гарантоване без забезпечення інтегрованих мереж і послуг, які є привабливими для потенційних користувачів. Це вимагатиме співпраці між рядом органів влади та постачальників у державному та приватному секторах і може потребувати ширшого бачення, ніж те, що наразі переважає в цій галузі (мінімізації витрат і максимізації прибутків у найкоротшій перспективі). Більше того, створення ефективного міжміського сполучення іноді може конфліктувати з пріоритетами органів влади та постачальників, які до цього часу займались обслуговуванням лише обмеженої місцевої громади.

Розглянемо питання чи може сполучення бути покращене шляхом додавання нових маршрутів або оптимізації існуючих маршрутів між транспортними вузлами для

одного й того ж режиму або для кращого поєднання різних режимів. У цій групі налічується 18 рішень, які наведені на рисунку 1.



Рисунок 1 – Транспортні вузли при пасажирських перевезеннях

Джерело: розроблено авторами

Проблеми, які можуть бути вирішені в цьому випадку, стосуються, по-перше, нестачі (або недостатньої ємності) з'єднувальних ланок (залізничних, автомобільних, тощо) або відсутності (недостатності) місцевих/регіональних послуг сполучення. Основні обмеження, які притаманні цьому виду рішень, пов’язані з витратами на будівництво, обслуговування та ремонт інфраструктури, а також витратами на надання послуг. В якості прикладу можна навести поїзди на магнітній подушці: для сполучення основних пересадкових вузлів з центрами міст поїзди на магнітній подушці швидші, тихіші і плавніші, ніж поїзди на колесах, але вартість будівництва системи для руху поїздів на магнітній подушці надзвичайно висока.

У випадках, коли рух автобусів або електротранспорту між центром міста та пересадковим вузлом ускладнений, або зазнає перешкод через затори, пропонується будівництво трамвайного сполучення (колія на дорозі, поєднана з рухом іншого транспорту, або на відокремлених коліях) від основного пересадкового вузла до центру міста. Вартість трамвайних проєктів також є високою.

Таке ж бачення використовується у випадку комбінації стандартної залізничної колії та міської трамвайної колії, щоб дозволити трамваям з'єднувати основні пересадкові вузли з центрами міст. Операція TramTrain передбачає як спільне використання колії легкого колійного та важкого залізничного транспорту, так і дво- або багатофункціональну експлуатацію (напруга залізничної колії / напруга легкого колійного транспорту). Секції спільного використання колії можуть також включати інфраструктуру звичайної залізниці.

Покращені місцеві громадські транспортні послуги. Багато з наведених рішень передбачають значний рівень місцевої координації і можуть вимагати допоміжних заходів (рис. 2). Деякі з цих рішень мають особливо високий потенціал для покращення взаємозв'язку. Особливо можна відзначити інтегроване планування розкладів, яке є системним рішенням, заснованим на чітких і послідовних правилах. Це рішення застосовується, коли необхідно забезпечити мережу взаємопов'язаних транспортних

послуг (не так актуально, коли акцент робиться виключно на поїздках з одного пункту до іншого). Також збільшення частоти або обсягів обслуговування має велике значення, оскільки це означає збільшення частоти курсування або місткості будь-якого автобуса, трамвая, поїзда, порома або авіаслужби, яка забезпечує місцеве сполучення в довгостроковій подорожі. Це рішення застосовується, коли час очікування довгий, а очікувана кількість пасажирів виправдовує підвищений рівень обслуговування.



Рисунок 2 – Рішення організації місцевих транспортних послуг
Джерело: розроблено авторами

На додачу, послуги прямого сполучення залізницею або автобусом (надання прямих автобусних або залізничних послуг між портом або аеропортом і основними напрямками – зазвичай центром міста) ймовірно принесуть найвищі співвідношення вигоди до витрат.

Покращення на пересадках. Загалом ці інструменти служать досягненню основної мети – зробити пересадку якомога меншою незручністю для мандрівників. При детальнішому розгляді, рішення на пункті пересадки можна розділити на такі, що покращують інфраструктуру, такі, що спрямовані на покращення послуг, і такі, метою яких є полегшення доступу до повної інформації.

Перша група має на меті забезпечити більше комфорту для мандрівників і простіші прямі пішохідні маршрути для досягнення видів транспорту, до яких мандрівник переходить на пересадці.

Друга група складається з дій, необхідних для того, щоб продовження подорожі було менш клопітким. Вона включає збільшення кількості квиткових кас, квиткових автоматів/кіосків, яких легше дістатись, видимі пункти відправлення та дії, спрямовані на те, щоб час очікування був максимально комфортним (як-от додаткові послуги, магазини, місця очікування, їжі та відпочинку тощо) [17].

Третя група орієнтована на те, щоб зміна одного виду транспорту на інший була легкою, з наданням повної інформації, необхідної для продовження подорожі (час та пункти відправлення, візуалізація маршрутів тощо).

Рішення, спрямовані на покращення пересадок у вузьких місцях, розроблені для полегшення безперервних подорожей при сполучення різних видів транспорту (на залізничних станціях, в аеропортах і портах). Рішення, визначені як практичні інструменти для покращення пересадок (рис. 3).



Рисунок 3 – Рішення для покращення пересадок у вузьких місцях

Джерело: розроблено авторами

Однією з основних перешкод для швидкої зміни видів транспорту є процедура отримання багажу та процедури реєстрації. Найчастіше це зустрічається у проміжних з'єднаннях між авіаційним та іншими видами транспорту, які забезпечують доступ до аеропорту. Рішення, спрямовані на оптимізацію процедур у цих двох сферах, перераховані на рисунку 4.

Зазначені рішення є переважно процедурними, але, окрім необхідних організаційних змін, вони вимагатимуть певних інвестицій в інфраструктуру та інформаційні технології. Як залізнична станція, так і реєстрація (пасажирів та багажу) для авіарейсу розроблені для зменшення часу очікування в аеропорту. Велика перевага цього рішення також полягає в тому, що воно вимагає угоди про співпрацю між авіакомпанією та оператором поїздів, яка повинна включати положення про запізнення поїзда. Інше рішення – повністю звільнити пасажирів від турботи про багаж. Аеропорт може забрати багаж мандрівника вдома (або на визначеній станції) за день до від'їзду мандрівника та доставити його до місця призначення до прибуття мандрівника.

Рішення щодо ціноутворення та квиткування. Рішення спрямовані на покращення доступності квитків та зменшення часу і зусиль, необхідних для отримання квитків на другий етап подорожі. Дії, що полегшують купівлю квитків:

- попередньо оплачені квитки або картки, що дозволяють необмежені місцеві поїздки,
- проста тарифна структура для місцевих транспортних послуг,



Рисунок 4 – Рішення щодо прямої доставки багажу

Джерело: розроблено авторами

- надання інтегрованих квитків для місцевих поїздок,
- конкурентоспроможне ціноутворення інтегрованих квитків,
- інтегроване квиткування для авіа- та залізничного транспорту, а також у межах одного виду транспорту,
- попередньо заброньований квиток на паркування та громадський транспорт,
- інтегроване квиткування для далекого залізничного та місцевого громадського транспорту,
- включення місцевих таксі у квитки на поїздки залізницею або літаком,
- смарт-картки,
- оплата через текстові повідомлення на мобільному телефоні,
- віртуальні квитки на смартфонах.

Деякі з рішень, орієнтованих на квиткування, є технічними за своєю природою, інші вимагають системних змін, які відображаються в політичних документах ЄС. Наприклад, можливість попередньої оплати квитків або карток повинна бути доступною через інтернет-сервіси, оскільки це необхідно для мандрівників, які прибувають до місця призначення з далекої відстані і бажають скористатися громадським транспортом на місці. Альтернативна можливість купити інтегрований квиток (для всього місцевого громадського транспорту), можливо, на кілька днів, повинна бути доступною в касах на пунктах прибуття. Інтегрований квиток може бути у формі традиційного квитка або електронної смарт-картки – остання полегшує багаторазове використання, оскільки квиток може бути перевірений у різних транспортних засобах шляхом безконтактного зчитування картки. Також аналогом даної картки може бути додаток на смартфоні, який згенерує електромагнітний код.

Висновки. У результаті проведеного дослідження, спрямованого на вирішення поставлених завдань щодо інтеграції пасажирських транспортних систем, отримано

низку теоретичних і практичних результатів, що дозволяють сформувати комплексне бачення підвищення ефективності транспортного обслуговування населення.

По-перше, встановлено, що сучасний стан організації пасажирських перевезень характеризується недостатнім рівнем інтеграції між різними видами транспорту, фрагментованістю маршрутних мереж та неузгодженістю розкладів руху. Це призводить до збільшення часу поїздки «від дверей до дверей», зниження привабливості громадського транспорту та зростання частки індивідуальних перевезень.

По-друге, визначено ключові фактори, що впливають на ефективність мультимодальних перевезень. До них віднесено: вартість поїздки, час очікування та пересадки, тривалість поїздки, частоту руху, рівень інформаційного забезпечення, комфортність пересадкових вузлів та доступність транспортної інфраструктури. Доведено, що саме сукупний вплив цих факторів формує транспортну поведінку пасажирів і визначає їх вибір виду транспорту.

По-третє, обґрунтовано доцільність використання економіко-математичного моделювання для опису процесу вибору пасажиром виду транспорту. Запропоновано підхід, який враховує стохастичний характер оцінки вартості часу пасажира та дозволяє визначати ймовірнісний розподіл пасажиропотоків між альтернативними видами транспорту. Це створює основу для більш точного прогнозування попиту та оптимізації транспортної системи.

По-четверте, розроблено концептуальні підходи до формування інтегрованої транспортної системи, що передбачають: узгодження розкладів руху різних видів транспорту за принципом синхронізації; оптимізацію маршрутної мережі з урахуванням транспортних коридорів і пересадкових вузлів; розвиток транспортно-пересадочної інфраструктури з орієнтацією на мінімізацію часу та зручність пересадок; впровадження принципів «безшовних» перевезень.

По-п’яте, доведено ефективність впровадження інтегрованих тарифних систем та єдиного квитка, що дозволяє суттєво спростити процес користування транспортом, зменшити транзакційні витрати пасажирів та підвищити конкурентоспроможність громадського транспорту. Водночас встановлено, що реалізація таких рішень потребує створення механізмів справедливого розподілу доходів між перевізниками.

По-шосте, визначено, що важливим напрямом підвищення ефективності транспортної системи є розвиток цифрових технологій, зокрема впровадження інтегрованих інформаційних платформ, систем планування маршрутів, електронного квиткування та інтелектуальних транспортних систем. Це забезпечує підвищення рівня інформованості пасажирів, спрощує планування поїздок і сприяє більш раціональному використанню транспортних ресурсів.

Таким чином, отримані результати підтверджують, що комплексна інтеграція пасажирських транспортних систем є ключовою умовою підвищення ефективності функціонування міського та міжміського транспорту. Запропоновані підходи та рекомендації можуть бути використані органами державного управління, транспортними операторами та проєктними організаціями при розробці стратегій розвитку транспортної інфраструктури та вдосконаленні системи пасажирських перевезень.

Список літератури

1. Ситнік В.В., Пікуліна О.В. (2025). Розвиток мультимодальних перевезень в Україні: економічний та інфраструктурний виміри. *Review of transport economics and management,* 12(28), 90–100. https://doi.org/10.15802/rtem2024/327135
2. Bielova A., Novalska N., Orlovska A. (2019). Актуальні питання розвитку мультимодальних перевезень в Україні. *Review of transport economics and management*, 2(18). https://doi.org/10.15802/rtem.v18i2.191243

3. Ломотько Д.В., Листопад М.С., Воскобойников Д.Г., Сірадчук А.Д. Шляхи удосконалення технології мультимодальних швидкісних пасажирських перевезень. Транспортні системи та технології перевезень. 2017. N 13. С. 59-66.
4. Alessandretti L., Orozco L., Battiston F., Szell M., Saberi M. Multimodal urban mobility and multilayer transport networks. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. Volume 50, Issue 8. https://doi.org/10.1177/23998083221108190
5. Khadidja Kadem, Mostafa Ameli, Mahdi Zargayouna, Latifa Oukhellou. Multimodal urban transportation network equilibrium including intermodality and shared mobility services. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00735
6. Яновський П.О. (2016). Шляхи підвищення ефективності функціонування пасажирського комплексу України. Транспортні системи та технології перевезень, (11), 73–79. https://doi.org/10.15802/tstt2016/76839
7. Зеленько Ю.В., Черкудінов В.Е., Левицька С.І. (2023). Концепція екологізації мультимодальних перевезень. Транспортні системи та технології перевезень, (24), 58–62. https://doi.org/10.15802/tstt2022/272065
8. Жищинський Ю., Шарко О. (2025). Моделювання ризиків мультимодальних перевезень в Україні. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (52), 244–254. https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351136
9. Ковальчук О. Організація міських пасажирських перевезень . Львів: ЛТІ, 2019. 184 с.
10. Cfts.org.ua. Аналіз стану міського транспорту в Україні. URL: https://cfts.org.ua/news
11. World Bank. Urban Transport and Mobility: Global Trends. Washington, DC: World Bank, 2021.
12. Пасажирські перевезення: теорія та практика / за ред. І. Петрова. Київ: Транспорт, 2018. 312 с.
13. Сидоренко В. Транспортна інфраструктура України: стан та перспективи. Харків: Наука, 2020. 256 с.
14. Cavallaro F., Nocera S. Integration of passenger and freight transport: A concept-centric literature review // Research in Transportation Business & Management. 2022. Vol. 43.
15. El Amrani A. M., Fri M., Benmoussa O., Rouky N. The Integration of Urban Freight in Public Transportation: A Systematic Literature Review . *Sustainability*. 2024. Vol. 16(13).
16. Barrera-Jiménez H., Pineda-Jaramillo J. A Framework for Integrating Freight Transport, Urban Land Planning, and Infrastructure Management . *Urban Science.* 2024. Vol. 8(2).
17. World Conference on Transport Research Society. Overview of the practices in the integration of passenger mobility and freight deliveries in urban areas . *Case Studies on Transport Policy.* 2023.
18. He Z., Haasis H.-D. Integration of Urban Freight Innovations: Sustainable Inner-Urban Intermodal Transportation . *Sustainability*. 2019. Vol. 11(6).
19. International Transport Forum. ITF Transport Outlook 2021. Paris: OECD Publishing, 2021.
20. Oliveira L. K., et al. Key factors for developing freight and passenger integrated transportation systems . *Research in Transportation Economics*. 2024.
21. Цимбал С.В., Глиняний В.С. Використання сучасних технологій для вдосконалення системи пасажирських перевезень. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції *«Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 483-485. https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/ 926/1614/2935-1
22. Цимбал С.В., Глиняний В.С. Світовий досвід удосконалення системи перевезення пасажирів автомобільним транспортом на приміських маршрутах. *Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи*: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Полтава, 20-21 березня 2025 року). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2025. С. 372-375
23. Глиняний В.С., Цимбал С.В. Проблемні аспекти та напрями вдосконалення пасажирських перевезень. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. Луцьк: ЛНТУ, 2025. №1(24). С. 180-187. DOI https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1722
24. Цимбал С.В., Глиняний В.С., Якименко М.Р. Вдосконалення системи управління і контролю перевезень. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців *«Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи»*, Вінниця: ВНТУ, 2025, Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/23089/19115
25. Цимбал С. В., Глиняний В. С. Аналіз сучасного стану перевезень пасажирів на приміських маршрутах. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця, 2024. № 2(20). С. 177-181. DOI https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.177

References

1. Sytnik, V.V., & Pikulina, O.V. (2025). Development of multimodal transportation in Ukraine: economic and infrastructure dimensions. *Review of transport economics and management*, 12(28), 90–100. https://doi.org/10.15802/rtem2024/327135

2. Bielova, A., Novalska, N., & Orlovska, A. (2019). Current issues of multimodal transportation development in Ukraine. *Review of transport economics and management*, 2(18). https://doi.org/10.15802/rtem.v18i2.191243
3. Lomotko, D.V., Listopad, M.S., Voskoboynikov, D.G., & Siradchuk, A.D. (2017). Ways to improve the technology of multimodal high-speed passenger transportation. *Transport systems and transportation technologies,* 13, P. 59-66.
4. Alessandretti, L., Orozco, L., Battiston, F., Szell, M., & Saberi, M. (2022). Multimodal urban mobility and multilayer transport networks. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. Vol. 50, Issue 8. https://doi.org/10.1177/23998083221108190
5. Khadidja Kadem, Mostafa Ameli, Mahdi Zargayouna, Latifa Oukhellou. (2024). Multimodal urban transportation network equilibrium including intermodality and shared mobility services. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00735
6. Yanovsky, P.O. (2016). Ways to improve the efficiency of the passenger complex of Ukraine. *Transport systems and transportation technologies*, 11, 73–79. https://doi.org/10.15802/tstt2016/76839
7. Zelenko, Yu.V., Cherkudinov, V.E., & Levitska, S.I. (2023). Concept of greening multimodal transportation. *Transport systems and transportation technologies,* 24, 58–62. https://doi.org/10.15802/tstt2022/272065
8. Zhyshchynskyi, Y., & Sharko, O. (2025). Modeling the risks of multimodal transportation in Ukraine. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences,* 52, 244–254. https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351136
9. Kovalchuk, O. (2019). Organization of urban passenger transportation . Lviv: LTI
10. Cfts.org.ua. Analysis of the state of urban transport in Ukraine. URL: https://cfts.org.ua/news
11. World Bank. Urban Transport and Mobility: Global Trends. Washington, DC: World Bank, 2021.
12. Passenger Transportation: Theory and Practice / ed. I. Petrov. Kyiv: Transport, 2018. 312 p.
13. Sydorenko V. Transport Infrastructure of Ukraine: Status and Prospects. Kharkiv: Nauka, 2020. 256 p.
14. Cavallaro, F., & Nocera, S. (2022). Integration of Passenger and Freight Transport: A Concept-Centric Literature Review . *Research in Transportation Business & Management.* Vol. 43.
15. El Amrani, A. M., Fri, M., Benmoussa, O., & Rouky, N. (2024). The Integration of Urban Freight in Public Transportation: A Systematic Literature Review . *Sustainability*. Vol. 16(13).
16. Barrera-Jiménez, H., & Pineda-Jaramillo, J. A (2024). Framework for Integrating Freight Transport, Urban Land Planning, and Infrastructure Management . *Urban Science.* Vol. 8(2).
17. World Conference on Transport Research Society. Overview of the practices in the integration of passenger mobility and freight deliveries in urban areas // Case Studies on Transport Policy. 2023.
18. He, Z., & Haasis, H.-D. (2019). Integration of Urban Freight Innovations: Sustainable Inner-Urban Intermodal Transportation . *Sustainability,* Vol. 11(6).
19. International Transport Forum. ITF Transport Outlook 2021. Paris: OECD Publishing, 2021.
20. Oliveira, L. K., et al. (2024). Key factors for developing freight and passenger integrated transportation systems . *Research in Transportation Economics.*
21. Tsymbal, S.V., & Glinyanyi, V.S. (2025). Using modern technologies to improve the passenger transportation system. Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference "*Modern Technologies and prospects for the development of road transport*", October 20-22, 2025: collection of scientific papers [Electronic resource] / Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia National Technical University [and others]. Vinnytsia: VNTU, P. 483-485. https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/ 926/1614/2935-1
22. Tsymbal, S.V., & Hlynyany, V.S. (2025). World experience in improving the system of passenger transportation by road transport on suburban routes. Modern science and education: state, problems, prospects: materials of the IV International scientific and practical Internet conference (Poltava, March 20-21, 2025). Poltava: Publishing House "LNU named after Taras Shevchenko", P. 372-375
23. Hlynyany, V.S., & Tsymbal, S.V. (2025). Problem aspects and directions of improvement of passenger transportation. *Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal.* Lutsk: LNTU, No. 1(24). P. 180-187. DOI https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1722
24. Tsymbal, S.V., Glynyany, V.S., & Yakymenko, M.R. (2025). Improvement of transportation management and control system. International scientific and practical internet conference of students, postgraduates and young scientists "Youth in science: research, problems, prospects", Vinnytsia: VNTU, URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/23089/19115
25. Tsymbal, S. V., & Glynyany, V. S. (2024). Analysis of the current state of passenger transportation on suburban routes. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport.* Vinnytsia, No. 2(20). P. 177-181. DOI https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.177

Serhii Tsymbal, Assoc. Prof., Candidate of Technical Sciences, **Viktor Glynianyi**
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

Modern Methods of Improving the Organization of Passenger Transport on Urban and subuRban Routes

The article examines approaches to increasing the efficiency of the integration of passenger transport systems, in particular intercity and local connections. The key problems associated with the insufficient development of infrastructure, inconsistency of transport services and the complexity of organizing transfers between different modes of transport are analyzed. Solutions for the development of transport nodes, optimization of the route network and improvement of interaction between different modes of transport are considered. Particular attention is paid to improving the quality of local transport services, in particular through integrated schedule planning, increasing the frequency of traffic and introducing direct connections. Measures to improve transfer points are highlighted, including infrastructure development, increasing the level of comfort and ensuring accessibility for all categories of passengers. Modern approaches to organizing ticketing and tariff policy are studied, in particular the introduction of integrated tickets, smart cards and digital services. Considerable attention is paid to information support, marketing strategies and the creation of a single information space for users of transport services. Organizational and regulatory measures aimed at coordinating the activities of various transport operators, developing partnerships and improving the industry management system are also considered. It is determined that the comprehensive implementation of infrastructure, technological and management solutions contributes to increasing the efficiency of the transport system, reducing travel time, reducing costs and improving passenger comfort and safety.

passenger transportation, transport integration, urban transport, suburban transport, multimodal transport, transport infrastructure, transfer hubs, ticketing systems, smart mobility, transport services

Одержано (Received) 04.04.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 06.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 08.04.2026

УДК 65.012.34;004.42;631.2 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).435-451

О. А. Кислун, доц., канд. техн. наук, **В. В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,
Ю. М. Пархоменко, доц., канд. техн. наук, **С. В. Лисенко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kyslun@gmail.com

Підвищення ефективності використання площ технологічних зон та оптимізація процесів і характеристик складської логістики сільськогосподарських підприємств

В роботі розглядається проблема оптимізації матеріальних потоків у сільськогосподарській сфері, зокрема в межах сортувально-складських технологічних зон простору. Обґрунтовано, що ефективне використання обмеженого простору складів, токів та елеваторів дозволяє зменшити витрати на їх утримання та суттєво знизити загальну собівартість кінцевої продукції. Для вирішення цієї багатокритеріальної логістичної задачі за допомогою обчислювальної техніки запропоновано синтез алгоритмів, що стануть основою програмного застосунку для генерації організаційних рекомендацій. Розроблений комплекс складається з трьох взаємопов'язаних алгоритмів: пошуку оптимального поділу зони (з урахуванням непередбаченого резервування), визначення порядку завантаження та побудови послідовності доступу до об'єктів зберігання. Математична формалізація просторової задачі базується на застосуванні детермінованого матричного апарату (зокрема матриць M, Z, V, W, U), що дозволяє моделювати мапи зон, вільні проходи та розраховувати кроки шляху. Основна увага приділена алгоритму розбиття, який шляхом ітеративного перебору та розрахунку мап мінімальних відстаней до точок виходу і меж зони формує області постійного розміщення для різних сукупностей. Унікальною

© О. А. Кислун, В. В. Аулін, Ю. М. Пархоменко, С. В. Лисенко, 2026

особливістю алгоритму є механізм автоматичної генерації додаткових мереж обов'язкових проходів через визначення найвіддаленіших полюсів. Застосування запропонованої методології забезпечує максимальну завантаженість технологічної зони за рахунок економічно доцільного балансу між об'ємами постійних та змінних місць розташування.

складська логістика, сільськогосподарські технологічні зони, оптимізація розміщення, матрична модель простору, алгоритми завантаження, поділ зон зберігання

Постановка проблеми. Технологічний процес виробництва у сільськогосподарській сфері зумовлює необхідність формування певних матеріальних потоків. На практиці це реалізується через роботи сортувально-складського призначення на технологічних зонах, що зводяться до комплексної логістичної задачі: приймання, розміщення, зберігання та видачі об'єктів у зонах з обмеженим простором. Витрати на утримання технологічних зон (складів, токів, елеваторів) безпосередньо формують собівартість кінцевої продукції. З огляду на це, підвищення ефективності використання площ технологічних зон та оптимізація логістичний процесів є критично важливими, оскільки це прямо призводить до зменшення собівартості [1,2]. Актуальність цього дослідження зумовлена тим, що для вирішення багатовимірних логістичних задач вкрай доцільно застосовувати потужну обчислювальну техніку та новітні інформаційні технології. В той час, однак сучасний розвиток сільського господарства в контексті практичного впровадження відповідного програмного забезпечення все ще гостро потребує ґрунтовних методологічних розробок [3,4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема вдосконалення логістичних процесів та раціонального управління запасами в агропромисловому комплексі активно вивчається в сучасному науковому просторі [5]. Зокрема, у працях Величка О.П. [6] ґрунтовно розглядається необхідність переходу від ізольованих методів управління площами до інтегрованих логістичних систем в агробізнесі, що дозволяє виявити значні резерви для економії витрат. Вагомий внесок в дослідження інфраструктури зберігання сільськогосподарської продукції, зокрема функціонування технологічних зон та ефективності їх використання, здійснив Ніценко В.С. [7]. Сучасні аспекти створення гнучких логістичних мереж постачання в агросекторі, мінімізації витрат на просторове переміщення та використання інформаційних систем для відстеження логістичних потоків досліджуються у роботі Волощука М.В. [8].

Незважаючи на ґрунтовну теоретичну базу щодо логістичного управління процесами виробничих і транспортних підприємств, сучасний розвиток сільського господарства гостро потребує специфічних методологічних розробок для практичного впровадження програмного забезпечення. Більшість наявних рішень не враховують багатовимірність задачі динамічного поділу виробничого простору. Для визначення актуальних проблем у розв'язанні задачі синтезу алгоритмів розміщення, завантаження та доступу до об'єктів зберігання, доцільно детально проаналізувати питання оптимізації складського простору.

Проблеми багатоцільової оптимізації топології логістичного центру (зокрема ланцюга постачання) відображені в роботах [9, 10]. В цих роботах розглядалася мінімізація загальних витрат на внутрішньоскладські переміщення та максимізації суміжності споріднених робочих зон. В роботі [11] використовує удосконалений стохастичний евристичний алгоритм ройового інтелекту.

Завдяки розробленій математичній моделі [10] дослідникам вдалося теоретично знизити загальні логістичні витрати на 25,54% порівняно з початковим плануванням та покращити просторову кореляцію зон на 30%. Але недоліком запропонованої моделі є те, що такий метод оптимізації має імовірнісну (стохастичну) природу і призначений для макрозон із заздалегідь визначеною фізичною архітектурою, тобто жорстко регламентованими межами та стаціонарними коридорами. Алгоритм реалізації моделі є складно відтворюваним в умовах суцільного (неперервного) простору підлогового

зберігання на сільськогосподарських токах. В моделі повністю відсутній детермінований матричний апарат для динамічного розбиття площі, а також не передбачена генерація точок доступу для автоматичної розбудови мережі проходів у процесі завантаження.

Waubert P.C. [12] в своєму дослідженні пропонує підхід до розв'язання динамічної задачі розподілу місць зберігання (DSLAP) за допомогою глибокого навчання з підкріпленням (DRL). Алгоритм штучного інтелекту (ШІ) тренувався на масиві ретроспективних даних щодо операцій завантаження та вивантаження на складі протягом 14 місяців. Впровадження навченого DRL-агенту дозволило знизити транспортні витрати всередині складської зони на 6,3% порівняно з класичним ручним ABC-аналізом.

Недоліком запропонованого способу є критична залежить від наявності великих масивів валідної ретроспективної інформації, що в мінливих агропромислових реаліях (змінна врожайність, непередбачувані затримки логістики з поля) робить його неефективним. Модель ШІ працює як чорна скринька в межах дискретної стелажної системи і не оперує поняттям запланованого резервування для непередбаченого випадку. Крім того, підхід ігнорує розрахунок точних мап найкоротших відстаней до змінних меж зони розміщення на базі матриць (M, Z), пропонуючи натомість імовірнісне прогнозування.

Benaglia M.F. та інші роботі [13], досліджує мінімізацію часу доступу до продукції з метою збереження її температурних характеристик. Автори обґрунтовують багатокритеріальну стратегію кластеризації об'єктів, що базується на об'ємах партії, частоті запитів та фізичній відстані до фіксованих зон комплектації. Отримані результати підтвердили, що такі стратегії розміщення зменшують час на збирання замовлень на 8% та скорочують час перебування персоналу у технологічних зонах із жорстким мікрокліматом до 22%.

Недоліком запропонованого способу є спрямоване на просторову кластеризацію вже наявних, жорстко стандартизованих одиниць (наприклад, палет), відстань для яких розраховується лише до фіксованих стаціонарних точок видачі. Алгоритм не здатен добудовувати мережу шляхів динамічно. Такий підхід не відповідає потребі формування логістичних маршрутів (алгоритм доступу) у технологічних зонах з гнучкими проходами, де мережа шляхів та точки доступу до масивів продукції змінюються під час поділу самої зони.

Fontana M.E. та інші [14], розглядають задачу призначення місць (SLAP) у технологічних зонах (складах) як багатовимірну NP-складну оптимізаційну проблему. Для її вирішення створено гібридний метод, що поєднує багатокритеріальний генетичний алгоритм (MOGA) із методами багатокритеріального прийняття рішень (MCDM). Розроблена модель ітеративно перебирає популяції потенційних рішень, формуючи оптимальний фронт Парето, що дозволяє операторам приймати кінцеві логістичні рішення з мінімальними витратами часу на розрахунки.

В той час генетичні алгоритми є обчислювально надлишковими для задач топологічного планування і генерують наближені рішення замість точного математичного синтезу. Алгоритм розраховує координати в дискретних комірках, не застосовуючи матричні мапи простору та не генеруючи векторні вимоги до постійних чи змінних локацій. В ньому повністю відсутня логіка прямого перерахунку ємностей областей під час поділу суцільної зони, що унеможливлює його використання для оптимізації вільного об'єму (наприклад, складів підлогового типу).

Zarinchang A. та інші [15], описують розв'язання нелінійної задачі адаптивного розміщення товарів у великих логістичних центрах. Для пошуку балансу між швидкістю збору товару та безпекою переміщень застосовуються спеціалізовані евристики (метод імітації відпалу та алгоритм basin-hopping). Метод адаптивно

перепризначає місця зберігання під час поточної роботи складу, уникаючи заторів та максимізуючи загальну пропускну здатність технологічної зони.

При цьому застосування методу евристик локального пошуку є дієвим виключно для переміщення індивідуальних об'єктів в складній системі стелажів, але є принципово хибним шляхом для задачі розбиття порожньої площі на багатокутні області. Також даний метод ігнорує необхідність побудови обов'язкових проходів мережі на базі полюсів. Таким чином, проблема генерації шляхів для техніки у безперервному середовищі залишається невирішеною.

Наведений аналіз підтверджує, що сучасні наукові підходи переважно зосереджені на імовірнісних та евристичних методах для дискретних стелажних систем зберігання. Жоден з актуальних методів не пропонує детермінованого комплексу алгоритмів (поділу, завантаження та доступу) на основі матричного апарату, здатного оперувати генерацією полюсів, мережею змінних проходів та об'ємами непередбаченого резервування в умовах безперервних технологічних зон.

Постановка завдання. Метою роботи є синтез алгоритмів для створення програмного забезпечення, здатного генерувати інформаційні рекомендації для покращення роботи сортувально-складської технологічної зони в сільськогосподарській сфері. Кінцевою економічною метою є зменшення собівартості продукціїза рахунок ефективної організації складської логістики.

Завдання дослідження:

- генерування алгоритму поділу технологічної зони розміщення між різними сукупностями вмісту, виходячи з їх кількості та необхідного об'єму для непередбаченого резервування;
- розробка алгоритму пошуку оптимального порядку завантаження елементів;
- синтез алгоритму побудови ефективної послідовності доступу до об'єктів зберігання;
- математична формалізація задачі з використанням матричного апарату (зокрема матриць M, Z, V, W, U) для побудови мапи зони, розрахунку найкоротших відстаней, шляхів завантаження та видачі;
- розробка логіки визначення постійних та змінних місць розташування для різних об'ємів сукупностей для досягнення максимальної завантаженості зони.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до поставленої мети зазначимо, що постає задача генерації трьох окремих алгоритмів, що пов'язані спільними даними: алгоритм пошуку оптимального розміщення, алгоритм завантаження та алгоритм доступу до об'єктів зберігання. Для задачі синтезу алгоритмів - наявна технологічна зона, що має деяку форму, опис якої представляється у вигляді матриці M. Вона інтерпретує мапу технологічної зони. Елемент з значенням не менше нуля позначає взяту до розгляду мінімально-значущу окрему область зони. Одиницею позначено першу від входу область, n - кількість областей для вмісту сукупностей, P - вектор розмірністю n, в якому вказані замовлені об'єми областей розбиття зони (вектор NAME – їх назви). Матриця Z в результаті відпрацювання алгоритму вміщує номер області поділу, нуль - при необхідному вільному проході.

Аналогічно для задачі синтезу алгоритму пошуку порядку завантаження - технологічна зона, що має деяку форм, також описана у вигляді матриці M, що інтерпретує її мапу.Нульовим елементом матриці вмісту V позначено вільну область зони, d позначає приналежність елемент, що прибуває до відповідної сукупності або вказує область розміщення відповідно до розбиття зони. Матриця W в результаті відпрацювання алгоритму вміщує номери кроків шляху до кінцевого розташування елемента в області розміщення. У випадку внутрішньої перестановки використовується матриця U.

Для задачі синтезу алгоритму побудови послідовності доступу до об’єктів зберігання технологічна зона, що має деяку форму, також описана у вигляді матриці M, що інтерпретує її мапу. Все наступні позначення попередніх алгоритмів чинні

Розробимо алгоритм поділу технологічної зони розташування на області для окремих сукупностей. Спираючись на безумовні витрати на зміну місця розташування під час зберігання, зауважимо, що економічно доцільніше постійне місце розташування, проте загальна ефективність технологічної зони досягається за умов її максимальної завантаженості. Виходячи з цього неможливо забезпечити постійне місце розташування всього наявного об’єму, то виникає задача визначенням місць постійного розташування для окремих сукупностей та їх об’ємів, що можуть бути розміщенні в зоні з умовою можливого переміщення. Укрупнений алгоритм при цьому представлено блок-схемою (рис. 1).

Можна бачити що вектор p рівний вектору P, завантажується як вимога незмінного розташування запланованого вмісту сукупностей для подальшої оптимізації розподілу елементів вказаних сукупностей технологічних зон, з позиції алгоритму розбиття зони заданих параметрів на відповідні області сукупностей для їх постійного розміщення, паралельно в вектор mane завантажується вектор назв сукупностей NAME. Для співставлення оригінальних назв з об’ємами їхнього вмісту, для стиснення опису алгоритму в подальшому опускаються супроводжувальні перестановками вектора name, які ув’язуються до перестановки при суворому впорядкуванні вектора p.

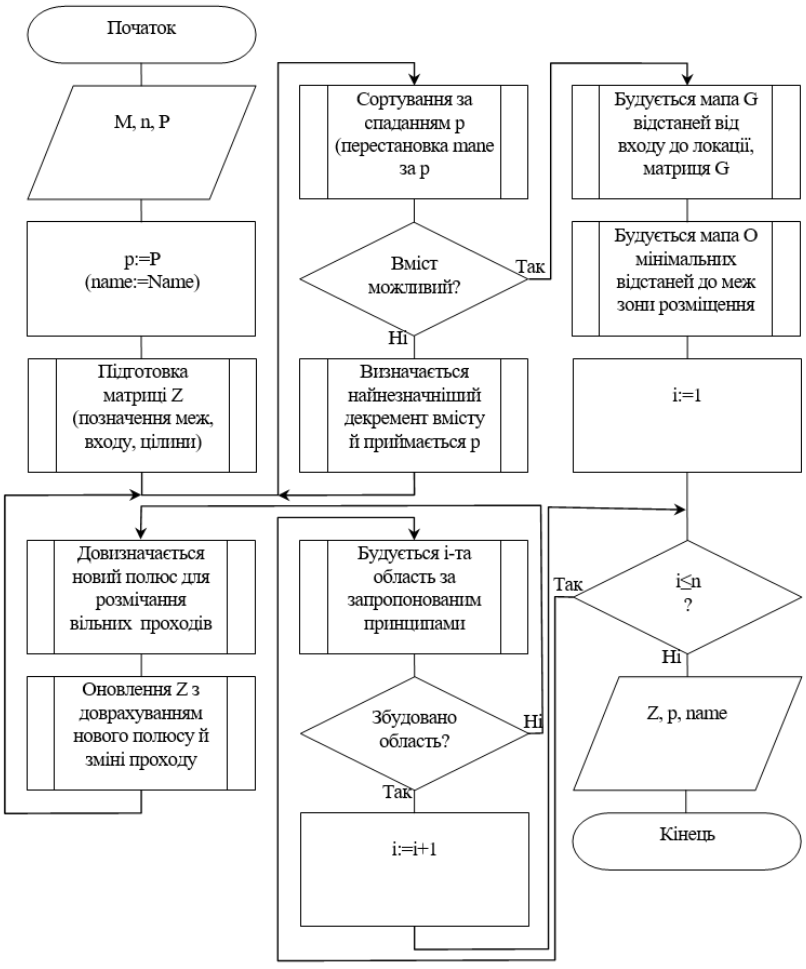


Рисунок 1 – Блок-схема укрупненого алгоритму поділу зони розташування на області постійного розміщення окремих сукупностей

Джерело: розроблено авторами

Початковою підготовкою є визначення матриці Z, якою було представлена мапа розбиття зони на області. Межі позначаються «-1» (в матриці M відповідно теж значення «-1»), нерозмічені мінімальні об'єми областей розбиття зони «-3» (в матриці M відповідно значення «0»). Нулем визначається елемент матриці Z, яким інтерпретовано першу від входу область (відповідно значення «1» в матриці M),

Упорядковується вектор p. Для узгодження розподілених даних перестановка елементів вектор p супроводжується переміщення відповідних елементи векторів назв N та вимог до вмісту сукупностей P. Це відбувається в порядку спадання по максимальній можливій величині вмісту області наявних для розміщення сукупностей вмісту. Також визначається загальний об'єм вмісту всіх сукупностей.

Визначається можливість вмісту намічених об'ємів сукупностей в наявний вільний простір для постійного розміщення. При неможливості вмісту, зменшується на один намічений об'єм сукупності (елемент вектора p_i), для якого в відсотковому відношенні зменшення об'єму від заданого буде мінімальною ($\min(((P_i-p_i)/P_i)\cdot 100\%)$). Після чого пошук розбиття проводиться з підготовки мапи розбиття.

Далі визначається найкоротша відстань до кожної точки технологічної зони від точки виходу - точок входу або наявного проходу. Будується мапа відстаней до конкретної точки ймовірного розміщення.

Будується мапа O мінімальних відстаней до меж зони розміщення.

Почергово перебираються впорядковані сукупності від найбільшої за об'ємом до найменшої. Для кожної вибраної знаходиться найдальша до виходу вільна (для якої не вказана належність до якої небудь іншої сукупності, раніше перебраної) точка (довільна з декількох рівновіддалених) й позначається, як область сукупності, що розглядається. По мапі відстаней до виходу в напрямку зменшення на 1 за мапою відстаней до меж (при наявній альтернативі - максимальне значення) з вільних точок позначається область сукупності, шо розглядається. У випадку коли прохід області до виходу визначається, для об'єму сукупності що не вміщається в побудовану область, вона добудовується включенням суміжних точок до області в порядку найбільш віддалених по розміщенні до виходу (значення за відповідною мапою). Після вмісту сукупності в розмічену область, проходить вибір наступної для розміщення сукупності. У випадку коли не проходить приєднання області до виходу або розміщення об'єму, то проходить розрахунок розміщення додаткового обов'язкового проходу по зоні, для чого визначаються полюси найбільш віддалені від меж. Загалом їх може бути декілька рівноцінних за відстанню та ще й до того ж полюс може займати декілька теж рівноцінних точок, проте добудовується лише прохід до найближчої точки яка й приймається в якості кінця дуги мережі проходів. При додаванні нового полюса вже до наявної мережі, то всі проходи до полюсів перебудовуються при умові приєднання лише одного нового, а всі раніше визначені полюси зостаються й розглядаються при розрахунку як межі зони. При розбитті зони на області для розрахунків мап обов'язкові проходи мережі позначаються як точка виходу та розглядаються як межа зони для розрахунку мапи мінімальних відстаней до меж зони розміщення. Мережа проходів позначається в мапі розбиття нулем, вибраний полюс «-2».

Після відпрацювання перебору матриця Z, що являє собою мапу областей для розміщення елементів сукупностей з позиції оптимальності постійного розташування. В векторі p розміщено вимога до об'єму сукупностей, що ставилися на останньому етапі відпрацювання алгоритмом, проте загалом досягнутий розподіл, який представлено матрицею Z, вміщує вимогу тобто не менше, а отже може й перевищувати місткість областей, тож доцільно її відкоригувати шляхом прямого перерахунку наявних елементів матриці Z, що містять номерів цих областей. Різниця вимоги до результату P-p - визначає об'єми сукупностей (кількість елементів відповідних сукупностей), що можуть вимагатися при максимальному запланованому

вмісту сукупностей і матимуть розміщення в місця змінного розташування, тобто, протягом терміну зберігання в певних випадках можливе їхнє переміщення.

Представимо алгоритм пошуку порядку завантаження для окремо взятого елементу визначеної сукупності. Спираючись на те, що зона розміщення вже може щось містити, то задача буде полягати в пошуку місця оптимальної дислокації а при необхідності ще й місця для переміщення його вмісту та шляхів переміщення. Укрупнений алгоритм завантаження представлено блок-схемою, (рис. 2).

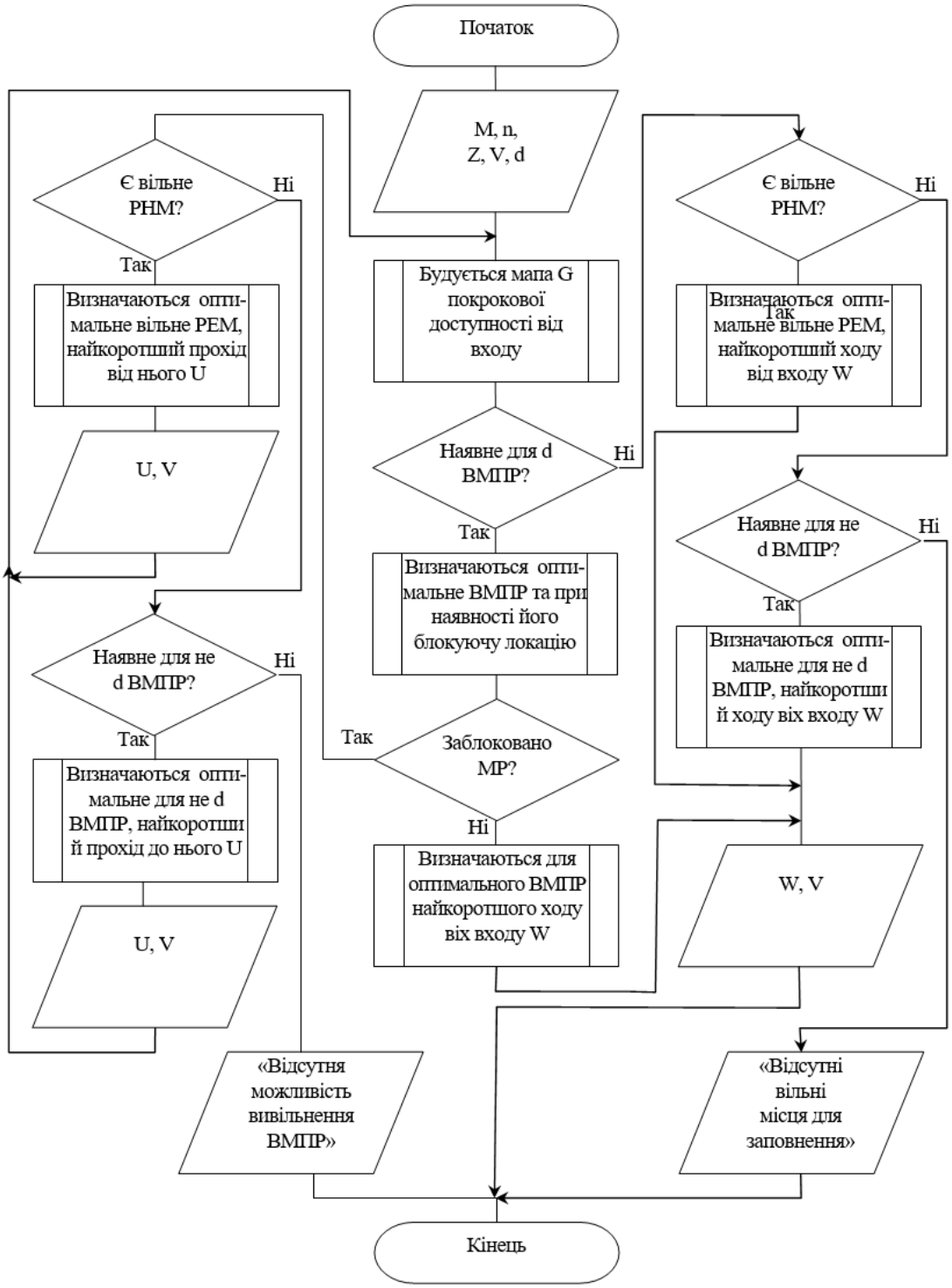


Рисунок 2 – Блок-схема укрупненого алгоритму завантаження

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо більш детально побудову і реалізацію цього алгоритму.

Будується мапа покрокової доступності G для кожної з областей від входу та обов'язкового проходу для чого всі елементи матриці G початково визначаються «-1» - нерозмічені. Наступним кроком елемент матриці G, що відображає вхід перевизначається у нуль, в матриці M це позначення – один. Після чого по нульовим значенням матриці Z, якими позначаються вільні доступні проходи, в матриці G теж вони позначаються нулями. Побудова мапи - це лише перерахунок елементів матриці G, що вміщують значення «-1» по сусіднім до них, які вміщують найменші значення більші від «-1». Вони належать до однієї області (однакові значення номерів областей визначаються по елементам матриці Z) й визначаються як найменше сусіднє значення плюс один. Це інтерпретація послідовності крокування доступності по області з місця запланованого входу до області.

Наявність вільного місця визначеної області постійного розташування (ВМПР) перевіряється для прибулого елемента сукупності. Вільним місцем вважається й локація зайнята невідповідним для розташування об'єктом тимчасового розташування. При перебиранні елементарних локацій розміщення елемент матриці вмісту V не відповідає номеру розміщеної області, а елемент матриці номерів областей Z - номеру зони прибулого об'єкта. Це визначає або перевизначає по мапі покрокову доступність, та максимально можливу глибина розташування по області точки локації від точки доступності. У випадку наявності хоч би однієї локації (інтерпретація умові наявності постійного місця розміщення прибулого), будується мапа покрокового доступу від входу по незайнятим місцям L для кожної локації зони в цілому (без розмежувань на області виділені під сукупності). Якщо після її побудови існує така вільна локація області постійного розміщення прибулого об'єкта, що має визначену максимальну глибину (відповідне значення матриці G при значені матриці вмісту V відповідному номеру області). Місце розміщення (МР) визначається по мапах L та G (мінімальне значення L та максимальне значення G) для невідповідного або вільного вмісту V. Мапа покрокового доступу будується матрицею W, в якій всі елементи спочатку визначаються нулем. Потім відшукана локація в матриці W визначається відповідним значенням матриці L, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці W позначаються сусідні локації за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці W, що рівні матриці L, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першого кроку в зоні. В матриці W покрокова мапа найкоротшого шляху до місця розміщення, що і є завершенням алгоритму завантаження. Після розміщення змінюється мапа вмісту V.

У випадку коли найоптимальніша локація для розміщення недоступна через тимчасове розташування інших об'єктів, умова відсутності доступу до постійної локації області розміщення прибулого об'єкта встановленої глибини визначається по мапах L та G (невизначених значень L більше одного, що розташовані по місцях максимального значення G для невідповідного або вільного вмісту V), визначається локація підлягає звільненню та шлях переміщення вмісту. Для вибору локації при звільненні визначаємо мапу кроків від локацій ймовірного розташування по області постійного розташування прибулого об'єкьа представивши матрицею Q. Позначимо мінус одиницею всі елементи матриці Q, як не розмічені. Переберемо елементи матриці Q й для вільних та тимчасово занятих локацій в області розташування прибулого об'єкта позначимо одиницею знайдені локації по відшуканій глибині розміщення в області. Після чого будуємо мапу доступу від цих локацій по вільній або тимчасово занятій області постійного розміщення, перемітивши для кожного існуючого більшого від нуля Q переходу на вільну або тимчасово заняту локації по області тимчасового розміщення (по матрицям Vта Z) на значення на один більше і так до тих пір поки є зміни. Після чого нулями перемічається матриця Q для елементів області постійного

розміщення прибулого об’єкта для елементів, що розмішені в досяжності переміщення, біля входу або вільного проходу (значення матриці Z нуль та мінус два) та доступу досяжності по області розміщення (нульове значення матриці Q). Локація для переміщення обирається за найменшим значенням матриці Q, що суміжне за можливим переміщенням до нульового значення цієї ж матриці Q. Локація кінцевого переміщення вибирається спочатку з області резервного нерозміченого для постійного розміщення (РНМ), перевіряється наявність хоч би одного значення «-3» матриці Z при нульовому значені вмісту V. При наявності, спочатку будується мапа глибини залягання локацій по нерозміченій області від проходів в якості матриці R, для чого спочатку, позначимо мінус одиницею всі елементи матриці R, як не розмічені. Переберемо елементи матриці R й для незайманих проходів (значення мінус два або нуль матриці Z) позначаємо нулем відповідне значення матриці R. Після чого, для кожної локації проходів та нерозміченій області в якій визначена глибина (значення Z неменше нуля) визначається глибина суміжної за доступом невизначеної локації на один більше. Після чого визначаємо найбільшу глибину розміщення вільної локації нерозміченій області. Будується мапа доступу від локації переміщення матриця T, початкове визначення «-1», як нерозмічено, одиницею позначено початкова локація переміщення, по вільним локаціям (нуль в матриці вмісту V), визначаєм для нерозмічених суміжних за доступом на одиницю більшим за значенням доступу. Місце кінцевого розташування визначається з умови найбільшої глибини розміщення в вільній локації нерозміченій області за найменшим значенням мапи переміщення T. Мапа покрокового переміщення будується матрицею U, в якій всі елементи спочатку визначаються нулем, потім відшукуються локації, які відповідають умові оптимального переміщення, що в матриці U визначається відповідним значенням матриці T, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці U позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці U, що рівні матриці T, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першого кроку в зоні. В матриці U покрокова мапа найкоротшого шляху до місць нового розміщення. Після прийнятого рішення, що до переміщення вмісту, що блокували постійного розміщення змінивши мапу вмісту V у відповідності до нових розміщень переходимо до повтору виконання алгоритму з початку (перебудову мапа покрокової доступності G можна загалом пропустити).

У випадку коли найоптимальніша локація для розміщення недоступна через тимчасового розташування інших об’єктів й відсутня вільна локація нерозміченій області. То визначається можливість переміщення в область розміщення інших сукупностей по умові наявності хоч би однієї вільної локації в інших областях розміщення (хоч би одна локація для якої існує нульовий вміст V в іншій області від області розміщення прибулого). Також, як і при переміщенні в нерозмічену область, вибирається локація для звільнення. Локація кінцевого переміщення вибирається спочатку з областей постійного розташування по максимальній глибині доступності в області. Для чого визначаємо максимальна доступна глибина по всіх областях крім області прибулого. По аналогії пошуку при переміщенні в нерозмічену область, будується мапа доступу від локації переміщення матриця T, початкове визначення «-1», як нерозмічено, одиницею позначено початкова локація переміщення, по вільним локаціям (нуль в матриці вмісту V), визначаєм для нерозмічених суміжних за доступом на одиницю більшим за значенням доступу. Місце кінцевого розташування визначається з умови найбільшої глибини розміщення в інших розмічених областях G за найменшим значенням мапи переміщення T. Мапа покрокового переміщення будується матрицею U, в якій всі елементи спочатку визначаються нулем, потім відшукуються локації, які відповідають умові оптимального переміщення, що в матриці U визначається відповідним значенням матриці T, і після цього при переборі від

наявного максимального значення в матриці U позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці U, що рівні матриці T, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першого кроку в зоні. В матриці U покрокова мапа найкоротшого шляху до місць нового розміщення. Після прийнятого рішення, що до переміщення вмісту, що блокували постійне розміщення змінивши мапу вмісту V у відповідності до нових розміщень переходимо до повтору виконання алгоритму з початку (перебудову мапа покрокової доступності G можна загалом пропустити).

У випадку коли відсутні вільні локації для переміщення - визначається стан критичного заповнення зони, що не може бути досягнуто при роботі алгоритму з вмістом, що не перевищує заповнення постійного розташування.

У випадку коли для розміщення прибулого відсутнє місце для постійного розміщення, то визначається наявність локації в області резервного нерозміченого для постійного розміщення (перевіряється наявність хоч бо однієї до якої виконується умова (наявність нуля в мапі вмісту V та наявність «-3» мати поділу областей Z - нерозмічену область). Після чого визначаємо найбільшу глибину розміщення вільної локації нерозміченій області. Будується мапа доступу від входу матриця Q, початкове визначення «-1», як нерозмічено, одиницею позначено локація входу, по вільним локаціям (нуль в матриці вмісту V), визначаєм для нерозмічених суміжних за доступом на одиницю більшим за значенням доступу. Місце кінцевого розташування визначається з умови найбільшої глибини розміщення в вільної локації нерозміченій області за найменшим значенням мапи переміщення Q. Мапа покрокового переміщення будується матрицею W, в якій всі елементи спочатку визначаються нулем, потім відшукуються локації, які відповідають умові оптимального переміщення, що в матриці W визначається відповідним значенням матриці Q, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці W позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці W, що рівні матриці Q, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першої локації від входу в зону. В матриці W покрокова мапа найкоротших шляхів до місць розміщення. Після розміщення змінюється мапа вмісту V.

У випадку коли для розміщення прибулого відсутні місця для постійного розміщення чи розміщення в області резервного нерозміченого для постійного розміщення, то визначається наявність локації для розміщення в областях постійного розміщення інших сукупностей (перевіряється наявність хоч би однієї локації для якої виконується умова наявність нуля в мапі вмісту V та наявність значення більшого від нуля для мати поділу областей Z - всі зони, можна не виключати заповнену для сукупності розміщення прибулого). Після чого визначаємо найбільшу глибину розміщення вільної локації у всій розміченій області. Будується мапа доступу від входу матриця Q, початкове визначення «-1», як нерозмічено, одиницею позначено локація входу, по вільним локаціям (нуль в матриці вмісту V), визначаєм для нерозмічених суміжних за доступом на одиницю більшим за значенням доступу. Місце кінцевого розташування визначається з умови найбільшої глибини розміщення локації в розмічених областях за найменшим значенням мапи переміщення Q. Мапа покрокового переміщення будується матрицею W, в якій всі елементи спочатку визначаються нулем, потім відшукуються локації, які відповідають умові оптимального переміщення, що в матриці W визначається відповідним значенням матриці Q, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці W позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці W, що рівні матриці Q, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першої локації від входу в зону. В матриці W покрокова мапа найкоротших шляхів до місць розміщення. Після розміщення змінюється мапа вмісту V.

В усіх інших випадках вільні локації для розміщення крім локацій проходів просто відсутні, й визначається стан повного планового заповнення зони.

Розробимо алгоритм доступу до об'єктів зберігання. Спираючись на те, що доступ можна розглядати, як вибір послідовний та випадковий відповідно сукупностей, алгоритм будуємо за умови намагання пріоритетного розміщення по областях постійного розташування. Тобто першочерговим є вивільнення локацій незапланованого розміщення, потім нерозмічений областей і в останню чергу місць постійного розташування

Блок-схема укрупненого алгоритму доступу до об'єктів зберігання (рис. 3).

Представленим нижче описом розглянемо його більш детально.

Визначається наявність об'єкта в області незапланованого розміщення (значення в карті вмісту V не відповідає області розміщення. Після чого будується мапа глибини доступу локацій до проходів по областях постійного розміщення для сукупностей H, для чого спочатку всі елементи матриці H визначаються «-1». Елементи матриці H, відповідають локаціям з пошуковим вмістом позначаються одиницею, після чого по області розміщення будується мапа кроків від елементів по областях розміщення H визначаючи по суміжному переміщенні збільшений на один до початкового. Завершення побудови визначається по відсутністю змін при повному переборі H. Далі будується мапа покрокової доступності від входу G. Визначається, локація з найменшим значенням карти кроків від елементів по областях розміщення H, де існує суміжна по переміщені в заданій області локація з більшою від 0 найменшою кількістю кроків. У випадку коли, визначена локація вміщує об'єкт запиту то в мапі покрокової доступності від входу G задається значення на одиницю більше від найменшого суміжного, і будується мапа покрокового найкоротшого переміщення W (початково всі елементи W визначаються нулем) прийнявши для визначеної локації значення W рівне відповідному G, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці W позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці W, що рівні матриці G, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першої локації від входу в зону. В матриці W покрокова мапа найкоротших шляхів до місць розміщення об'єкту. Після вивільнення змінюється мапа вмісту V.

У випадку коли безпосередній доступ до об'єкту, який вибрано на відвантаження, неможливий з тих чи інших причин, проходить спроба звільнення деякої визначеної локації під прохід для доступу до іншої локації або безпосередньо під розрахункове оптимальне за алгоритмом розміщення, при цьому можливі наступні випадки з пріоритетом їх реалізації: переміщення в область резервного нерозміченого для постійного розміщення; переміщення в область постійного розміщення для тимчасового розташування невідповідного об'єкта, як для області розміщення та виявлення неможливості звільнення локації за наявних умов завантаження зони.

У випадку коли визначена локація не вміщує потрібний об'єкт а потребує вивільнення, то першочергово, вибирається локація кінцевого переміщення з області резервного нерозміченого для постійного розміщення, перевіряється наявність хоч би одного значення «-3» матриці Z при нульовому значені вмісту V. При наявності, спочатку будується мапа глибини залягання локацій по нерозміченій області від проходів в якості матриці R, для чого спочатку, позначимо мінус одиницею всі елементи матриці R, як не розмічені. Переберемо елементи матриці R й для незайманих проходів (значення мінус два або нуль матриці Z) позначаємо нулем відповідне значення матриці R.

Після чого, для кожної локації проходів та нерозміченій області в якій визначена глибина (значення Z неменше нуля) визначається глибина суміжної за доступом невизначеної локації на один більше. Після чого визначаємо найбільшу глибину розміщення вільної локації нерозміченій області. Будується мапа доступу від локації

переміщення матриця T, початкове визначення «-1», як нерозмічено, одиницею позначено початкова локація переміщення, по вільним локаціям (нуль в матриці вмісту V), визначаєм для нерозмічених суміжних за доступом на одиницю більшим за значенням доступу.

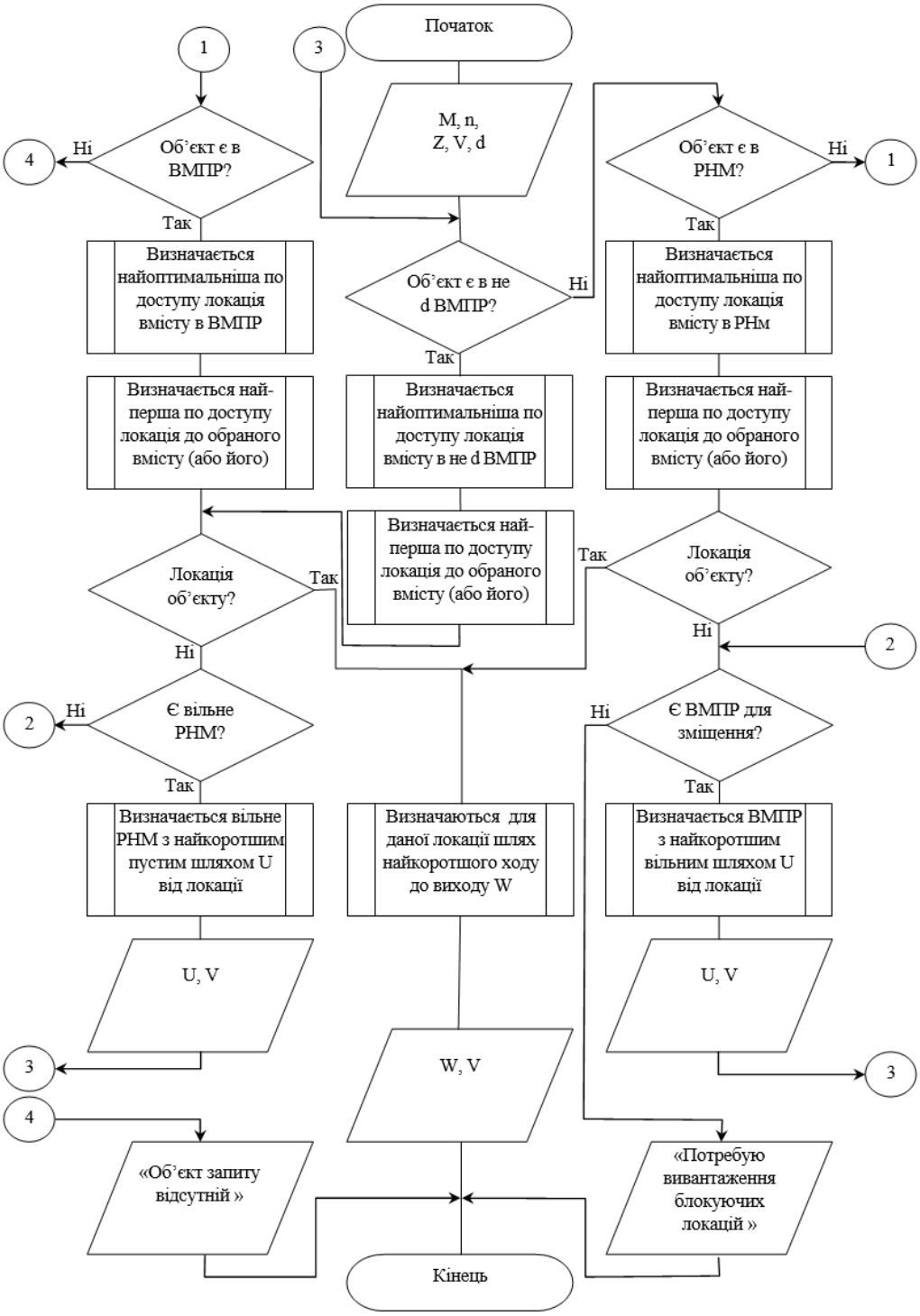


Рисунок 3 – Блок-схема укрупненого алгоритму доступ до об'єктів зберігання
Джерело: розроблено авторами

Місце кінцевого розташування визначається з умови найбільшої глибини розміщення в вільної локації нерозміченій області за найменшим значенням мапи переміщення T. Мапа покрокового переміщення будується матрицею U, в якій всі

елементи спочатку визначаються нулем, потім відшукуються локації, які відповідають умові оптимального переміщення, що в матриці U визначається відповідним значенням матриці T, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці U позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці U, що рівні матриці T, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першого кроку в зоні. В матриці U покрокова мапа найкоротшого шляху до місць нового розміщення. Після прийнятого рішення, що до переміщення вмісту, що блокував доступ до розміщення змінивши мапу вмісту V у відповідності до нових розміщень переходимо до повтору виконання алгоритму з початку. (Зауваження дана частина алгоритму, що стосується організації переміщення аналогічна при переміщенні під час завантаженні).

У випадку коли визначена локація не вміщує потрібний об’єкт а потребує вивільнення при цьому відсутні вільні локації області резервного нерозміченого місця, то визначається можливість переміщення в область розміщення інших сукупностей по умові наявності хоч би однієї вільної локації в інших областях розміщення (хоч би одна локація для якої існує нульовий вміст V в іншій області від області розміщення, що вивільнюється). Також, як і при переміщенні в нерозмічену область, вибирається локація для звільнення. Локація кінцевого переміщення вибирається спочатку з областей постійного розташування по максимальній глибині доступності в області. Для ого визначаємо максимальна доступна глибина по всіх областях крім області, що вивільнюється. По аналогії пошуку при переміщенні в нерозмічену область, будується мапа доступу від локації переміщення матриця T, початкове визначення «-1», як нерозмічена, одиницею позначено початкова локація переміщення, по вільним локаціям (нуль в матриці вмісту V), визначаєм для нерозмічених суміжних за доступом на одиницю більшим за значенням доступу. Місце кінцевого розташування визначається з умови найбільшої глибини розміщення в інших розмічених областях за найменшим значенням мапи переміщення T. Мапа покрокового переміщення будується матрицею U, в якій всі елементи спочатку визначаються нулем, потім відшукуються локації, які відповідають умові оптимального переміщення, що в матриці U визначається відповідним значенням матриці T, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці U позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці U, що рівні матриці T, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першого кроку в зоні. В матриці U покрокова мапа найкоротшого шляху до місць нового розміщення. Після прийнятого рішення, що до переміщення вмісту, що блокували постійного розміщення змінивши мапу вмісту V у відповідності до нових розміщень переходимо до повтору виконання алгоритму з початку.

У випадку потреби звільнення локації неможливе переміщення ні до області резервного нерозміченого для постійного розміщення, ні до області постійного розміщення для тимчасового розташування невідповідного об’єкта то виявляється неможливості звільнення локації й за наявних умов завантаження зони, як результат подається локація, що не може бути перенесена.

Після виявлення відсутності об’єкту, що потребує видачі, в областях постійного розміщення з невідповідним області розміщенням, пошук цього об’єкта продовжується в області резервного нерозміченого для постійного розміщення. Визначається наявність об’єкта в області резервного нерозміченого для постійного розміщення по значенню номера сукупності в мапі вмісту V та значенням «-3» в мапі розбиття Z. Після чого будується мапа H глибини доступу локацій до проходів по резервній нерозміченій області, для чого спочатку всі елементи матриці H визначаються «-1». Елементи матриці H, відповідають локаціям з пошуковим вмістом позначаються одиницею, після чого по області розміщення будується мапа кроків від елементів по резервній

нерозміченій області, визначаючи H по суміжному переміщенні збільшений на один до початкового. Завершення побудови визначається по відсутністю змін при повному переборі H. Далі будується мапа покрокової доступності від входу G. Визначається, локація з найменшим значенням карти кроків від елементів по областях розміщення H, де існує суміжна по переміщені в заданій області локація з більшою від 0 найменшою кількістю кроків. У випадку коли, визначена локація вміщує об'єкт запиту то в мапі покрокової доступності від входу G задається значення на одиницю більше від найменшого суміжного, і будується мапа покрокового найкоротшого переміщення W (початково всі елементи W визначаються нулем) прийнявши для визначеної локації значення W рівне відповідному G, і після цього при переборі від наявного максимального значення в матриці W позначаються сусідні за переміщенням зі зменшенням на одиницю позначаються значення матриці W, що рівні матриці G, за зменшенням на один перебір триває до одиниці першої локації від входу в зону. В матриці W покрокова мапа найкоротших шляхів до місць розміщення об'єкту. Після вивільнення змінюється мапа вмісту V. У випадку невідповідності вмісту відшуканої локації запиту на видачу, визначається необхідність переміщення вмісту цієї локації, по алгоритму перехід до випадку потреби вивільнення локації переміщенням в області, що призначені для постійного розміщення сукупностей (проте це тимчасове розміщення невідповідних об'єктів).

Після виявлення відсутності об'єкту, що потребує видачі, поза межами області його постійного розміщення, перевіряється його наявність в цій області і в випадку наявності відпрацьовує алгоритму аналогічне до діставання з областей постійного розміщення при незапланованому розташуванні, з тією відміною, що до розгляду береться область постійного розташування (або можна всі, бо незаплановані області все одно нічого не вміщують). Відсутність об'єкта в розглянутих областях визначає неможливість виконання запиту на видачу, що й подається як результат.

Загалом алгоритми можуть бути використані для автоматичних систем складського призначення, і при умові їх використання в режимі завантаження лише областей постійного розміщення не можуть бути загнані в стан нерозв'язувальної задачі доставки при умові заборони вивантажені з зони зберігання вмісту для доступу по запит.

Висновки.

1. Обґрунтовано потребу в алгоритмізації логістичних процесів АПК. Доведено, що управління просторовим розміщенням, зберіганням та видачею об'єктів у зонах з обмеженим простором безпосередньо впливає на формування собівартості кінцевої продукції. Відсутність ґрунтовних методологічних розробок для сучасних програмних застосунків стримує оптимізацію цих процесів, що зумовило необхідність створення спеціалізованого математичного апарату.

2. Для вирішення логістичної задачі розроблено систему з трьох взаємопов'язаних алгоритмів: поділу технологічної зони (з урахуванням максимально можливого запланованого резервування для непередбачених випадків), пошуку оптимального порядку завантаження та побудови ефективної послідовності доступу до об'єктів зберігання.

3. Розроблено детерміновану математичну модель, яка описує форму та стан технологічної зони через систему матриць (M, Z, V, W, U). Цей апарат дозволяє точно розраховувати мапи мінімальних відстаней до точок виходу та меж зони, а також фіксувати кроки шляху до кінцевого розташування елементів.

4. Створено алгоритм, який ітеративно перебирає сукупності за об'ємом і формує області постійного розміщення. Відмінною рисою методу є механізм автоматичної розбудови мережі обов'язкових проходів за допомогою визначення найвіддаленіших точок - полюсів. При цьому полюси та проходи динамічно враховуються як нові межі та точки виходу під час розрахунку подальшого розбиття площі.

5. Для забезпечення економічної доцільності розподілу алгоритм дозволяє досягти максимальної завантаженості зони шляхом прямого перерахунку наявних елементів та знаходження балансу між об'ємами сукупностей, що потребують постійного місця розташування, і тими, що можуть розміщуватися в зонах змінного (тимчасового) розташування.

6. Запропонована методологія є готовим базисом для створення програмного застосунку, який генеруватиме управлінські рекомендації. Практичне впровадження цих розробок дозволить оптимізувати складську логістику сільськогосподарських підприємств та суттєво зменшити собівартість кінцевої продукції.

Список літератури

1 Городецька Т. Е., Балюк А. В. Роль транспортних підприємств у формуванні ефективної логістики аграрного сектору. *Актуальні проблеми інноваційної економіки та права.* 2025. № 2. С. 79-84. URL: https://repo.btu.kharkiv.ua/server/api/core/bitstreams/2fff4eaa-f18d-4787-af56-07dd88478170/content

2 Нечипоренко К. В. Проблеми розвитку транспортної логістики сільськогосподарських товаровиробників. Збірник наукових праць. Луцький національний технічний університет. *Економічні науки. Серія «Облік і фінанси».* 2013. Вип. 10(37). С. 40-46.

3 Неустроєв Ю.Г. Роль інформаційних технологій у забезпеченні економічної безпеки країни. Економічна наука. *Інвестиції: практика та досвід* № 8/2021. С. 40-44. DOI: 10.32702/2306-6814.2021.8.40

4 Павлюк Т., Волонтир Л. Використання сучасних інформаційних технологій в сільському господарстві. *Формування ринкової економіки в Україні*. 2017. № 38. С. 122-127.

5 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. https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48357

6 Величко О.П. Логістичні підходи до управління запасами засобів захисту рослин . *Інвестиції: практика та досвід.* 2011. № 9. С. 39-41. URL: http://www.investplan.com.ua/pdf/9_2011/12.pdf

7 Ніценко В.С. Зернові елеватори: стан та інвестиційні горизонти . *Вісник ХНАУ [Серія «Економічні науки»]*. Харків: ХНАУ. 2012. № 10. С. 122-133.

8 Волощука М.В. Логістичні механізми забезпечення стійкості та інноваційного розвитку виробничого потенціалу підприємств. *Економіка*, №02(217)/2026. С. 28-39. DOI: 10.20998/2313-8890.2026.02.03

9 Оптимізація параметрів надійності та ефективності виробничих систем і автоматизованих ліній методами штучного інтелекту : монографія / В. В. Аулін, С. Г. Ковальов, Ю. Г. Ковальов, А. В. Гріньків ; за заг. ред. д.т.н., проф. В. В. Ауліна. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2026. 232 с.

10 Li J., Zhou Q. Cold chain logistics center layout jptimization based on improved dung beetle algorithm. Symmetry 2024, 16(7), 805. https://doi.org/10.3390/sym16070805

11 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. http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/11251

12 Waubert de Puiseau, C.; Nanfack, D.T.; Tercan, H.; Löbbert-Plattfaut, J.; Meisen, T. Dynamic storage location assignment in warehouses using deep reinforcement learning. *Technologies 2022*, 10(6), 129. https://doi.org/10.3390/technologies10060129

13 Benaglia M.F., Chen M.H., Lu Sh.H., Tsai K.M., Hung Sh.H. Improving the picking efficiency of a cold warehouse to avoid temperature abuse. *The International Journal of Logistics Management*. 2024. 35 (5): 1434–1464. https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2023-0044

14 Fontana, M., Nepomuceno, V. & Garcez, T. (2020). A hybrid approach development to solving the storage location assignment problem in a picker-to-parts system. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 17. 1-14. DOI: 10.14488/BJOPM.2020.005

15 Zarinchang A. and other. Adaptive warehouse storage location assignment with considerations to order-picking efficiency and worker safety. *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2024. Vol. 41, Issue 1. https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2263009

References

1. Horodetska, T.E., Baliuk, A.V. (2025). The role of transport enterprises in the formation of efficient logistics in the agricultural sector. *Current issues of innovative economy and law*. № 2, 79-84. [in Ukrainian]. URL: https://repo.btu.kharkiv.ua/server/api/core/bitstreams/2fff4eaa-f18d-4787-af56-07dd88478170/content
2. Nechyporenko, K.V. (2013). Problems of transport logistics development for agricultural producers. *Zbirnyk naukovykh prats. Collection of Scientific Papers. Lutsk National Technical University. Economic Sciences. Series "Accounting and Finance"*, 10(37), 40-46. [in Ukrainian].
3. Neustroiev, Yu.H. (2021). The role of information technologies in ensuring the economic security of the country. *Economic science. Investments: practice and experience*, Issue 8, 40-44. [in Ukrainian]. DOI: 10.32702/2306-6814.2021.8.40
4. Pavliuk, T., & Volontyr, L. (2017). The use of modern information technologies in agriculture. *Formation of market economy in Ukraine*, Issue 38, 122-127. [in Ukrainian].
5. Aulin, V. V., Mytnyk, M. M., Lyashuk, O. L., Hevko, I. B., Tsyon, O. P., Lysenko, S. V., Gud, V. Z. et al. (2024). Formation and functioning of logistics centers in regional transport and logistics systems of Ukraine: monograph edited by Dr. of Engineering, Prof. Aulin V. V., Dr. of Engineering, Prof. Lyashuk O. L. Ternopil: FOP Palyanytsia V. A., https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48357
6. Velychko, O. P. (2011). Logistics approaches to managing stocks of plant protection products. *Investytsii: practice and experience*, Issue 9, 39-41. [in Ukrainian]. URL: http://www.investplan.com.ua/pdf/9_2011/12.pdf
7. Nitsenko, V. S. (2012). Grain elevators: state and investment horizons. *Bulletin of KhNAU. Economic Sciences Series*, Issue 10, 122-133. [in Ukrainian].
8. Voloshchuk, M. V. (2026). Logistics mechanisms for ensuring the sustainability and innovative development of the production potential of enterprises. *Economics*, Issue 2(217), 28-39. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20998/2313-8890.2026.02.03
9. Aulin, V. V., Kovalev, S. G., Kovalev, Yu. G., & Grinkiv, A. V. (2026). Optimization of reliability and efficiency parameters of production systems and automated lines using artificial intelligence methods: monograph . V. V. Aulin (Ed.). Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V.F.
10. Li, J., & Zhou, Q. (2024). Cold chain logistics center layout jptimization based on improved dung beetle algorithm. *Symmetry*, 16(7), 805. https://doi.org/10.3390/sym16070805
11. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., Holovaty A.O., Holub D.V. Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems / monograph under the general editorship of Dr. of Engineering, Prof. Aulin V.V. – Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V.F., 2021. – 503 p. http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/11251
12. Waubert de Puiseau, C., Nanfack, D.T., Tercan, H., Löbbert-Plattfaut, J., Meisen, T. (2022). Dynamic storage location assignment in warehouses using deep reinforcement learning. *Technologies*, 10(6), 129. https://doi.org/10.3390/technologies10060129
13. Benaglia, M.F., Chen, M.H., Lu, Sh.H., Tsai, K.M., Hung, Sh.H. (2024). Improving the picking efficiency of a cold warehouse to avoid temperature abuse. *The International Journal of Logistics Management* 35 (5): 1434–1464. https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2023-0044
14. Fontana, M., Nepomuceno, V. & Garcez, T. (2020). A hybrid approach development to solving the storage location assignment problem in a picker-to-parts system. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 17. 1-14. DOI: 10.14488/BJOPM.2020.005
15. Zarinchang, A. and other. (2024). Adaptive warehouse storage location assignment with considerations to order-picking efficiency and worker safety. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol. 41, Issue 1. https://doi.org/10.1080/21681015.2023.2263009

Oleh Kyslun, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Aulin,** Prof., Doctor of tech. sci., **Yurii Parkhomenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Lysenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Efficiency of Technological zoNe Space Utilization and Optimizing the Processes and Characteristics of Agricultural Enterprise Warehouse Logistics

The presented study investigates the problem of optimizing material flows in agricultural production, where the technological process inevitably requires the effective implementation of sorting and warehousing operations. It is substantiated that the maintenance costs of such technological zones as warehouses, threshing floors, and grain elevators are a critical factor in forming the cost of the final product. Improving the efficiency of limited space utilization through the enhancement of warehouse logistics organization is considered a direct path to the economic optimization of the enterprise. The analysis of current research has shown that, despite the feasibility of using computer technology, the modern agricultural sector urgently needs thorough methodological developments for the implementation of appropriate software applications.

The central objective of the study is the synthesis of a complex of algorithms to create an information system that generates recommendations for improving the operation of technological zones. Specifically, three interconnected algorithms have been developed: dividing space among sets of objects (taking into account the volumes of contingency reservation), determining the optimal loading order, and constructing an access sequence to storage objects. The scientific novelty lies in the formalization of the spatial problem using a deterministic matrix apparatus. A system of matrices is used to describe the technological zone and model its states.

The zone division algorithm is described in detail; it is based on an iterative analysis of the requirements for the content of sets, ordered by decreasing volume. The methodology involves constructing maps of the shortest distances to exit points and maps of minimum distances to the boundaries of the placement zone. A unique element of the algorithm is the mechanism for the automatic generation of a network of mandatory passages through the identification of poles-points furthest from the boundaries. Such passages are dynamically integrated into the model as new boundaries and exit points for further calculations. The proposed approach makes it possible to achieve a balance between the need for permanent storage locations and the flexibility of variable placement zones, which ensures maximum space utilization. The results of the work serve as a theoretical and algorithmic foundation for the development of specialized software aimed at reducing logistics costs in the agro-industrial complex.

warehouse logistics, agricultural technological zones, placement optimization, matrix spatial model, loading algorithms, storage zone division

Одержано (Received) 15.03.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 23.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.22:631.363 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).452-460

Е. Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст. досл., **Р. Г. Пономаренко**
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Результати попередніх досліджень Y-подібного змішувача кормових матеріалів

Якість приготування кормових сумішей є визначальним чинником ефективності тваринництва, оскільки рівномірність розподілу компонентів безпосередньо впливає на поживну цінність і збалансованість корму. У статті представлено результати попередніх досліджень процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі з керованими режимами роботи. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему змішувача та принцип його дії. Для аналізу фізичних закономірностей процесу використано чисельне моделювання на основі поєднання методів обчислювальної гідродинаміки та дискретних елементів (CFD–DEM) у середовищі Simcenter Star-CCM+. Досліджено вплив геометричних і режимних параметрів на кінетику змішування та коефіцієнт однорідності суміші. Визначено раціональні значення основних параметрів, за яких забезпечується коефіцієнт однорідності 0,95 при мінімальній тривалості процесу. Спроєктовано та виготовлено лабораторний стенд і розроблено методику експериментальних досліджень, що створює основу для подальшої оптимізації конструкції та оцінювання енергоефективності Y-подібного змішувача кормових матеріалів.

кормові матеріали, змішувач, однорідність суміші, CFD–DEM моделювання, конструктивні параметри, експериментальні дослідження

Постановка проблеми. Якість приготування кормових сумішей є одним із ключових чинників підвищення продуктивності тваринництва, оскільки рівномірне змішування компонентів прямо впливає на поживну цінність, збалансованість та однорідність корму, що споживається тваринами. За зоотехнічними вимогами, процес змішування вважається оптимальним, якщо відхилення від рецептурного складу в готовій суміші не перевищують допустимі межі, а однорідність забезпечує відповідні зоотехнічні показники якості корму [1–2].

Традиційні конструкції змішувачів кормів – стрічково-лопатеві, барабанні чи інші типи механізмів – мають обмеження, пов’язані з недостатньою однорідністю суміші, неефективним використанням енергії, великим часом змішування та значними витратами на привід. Так, у багатофакторних дослідженнях змішувачів відзначається, що інші конструкції часто не здатні забезпечити стабільну однорідність компонентів, особливо при змішуванні сипких матеріалів з різною гранулометрією та щільністю [3–5].

Крім того, у практиці змішування кормів існують технологічні проблеми, пов’язані з ефективністю процесу та його контролем: недостатня тривалість змішування, перевантаження обладнання, знос робочих елементів і неправильно підібрана послідовність завантаження компонентів призводять до низької якості суміші та істотної варіації її складу [6].

Також важливою проблемою є неоднозначність методів оцінювання однорідності та її вплив на якість готового продукту – класичні методи випробувань часто пов’язані з операційними труднощами, впливають на матеріал та не завжди забезпечують точні результати [7–9].

У наукових дослідженнях [10–11] підкреслюється, що фізичні процеси змішування сипких матеріалів досі недостатньо вивчені, особливо у випадку складних геометрій робочих камер змішувачів, що обмежує можливості конструювання високоефективних пристроїв.

© Е. Б. Алієв, Р. Г. Пономаренко, 2026

В умовах зростання вимог до якості кормових сумішей, автоматизації процесів та підвищення енергоефективності необхідно розробляти нові конструктивні рішення змішувачів, які забезпечують більш рівномірне розподілення компонентів, зменшують витрати часу та енергії, а також дозволяють гнучко управляти режимами роботи. Це зокрема стосується інноваційних геометрій робочої камери, таких як V- та Y-подібні змішувачі [12], що потребують комплексного аналізу конструктивних і режимних параметрів як на етапі моделювання, так і під час експериментальної перевірки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасної наукової літератури показує, що питання змішування кормових матеріалів, оптимізації конструкцій змішувачів та їх режимів роботи залишаються активними об'єктами досліджень у світовій та вітчизняній науці. Зокрема, увага фахівців зосереджена на підвищенні однорідності суміші, енергоефективності процесу, конструктивному вдосконаленні робочих органів та геометрії змішувальних камер [13].

У міжнародних публікаціях [14–15] з прикладної механіки та хіміко-технічних процесів останнім часом зростає інтерес до оптимізації характеристик змішувачів із використанням математичних методів, зокрема відгукової поверхні та CFD-аналізу. Так, у роботі [13–14] досліджено вплив структури лопатей на якість змішування кормових сумішей із застосуванням експериментального планування та методів оптимізації, що дозволяє підвищити ефективність процесу при заданій конфігурації робочого органа.

В іншому напрямі розглядається чисельне моделювання потоку сипких матеріалів у змішувачах. Наприклад, моделювання руху порошків у горизонтальному змішувачі із застосуванням моделей реології та CFD дозволяє оцінювати вплив геометрії та режимів на поведінку частинок під час роботи машини [15].

Інші дослідження [15–17] стосуються застосування комплексних CFD–DEM підходів у змішувальних процесах: оцінювання взаємодії частинок та середовища (газу або рідини) у середині барабанних чи пакетних змішувачів, що дає змогу глибше розуміти механізми формування однорідної суміші та оптимізувати конструктивні параметри обладнання.

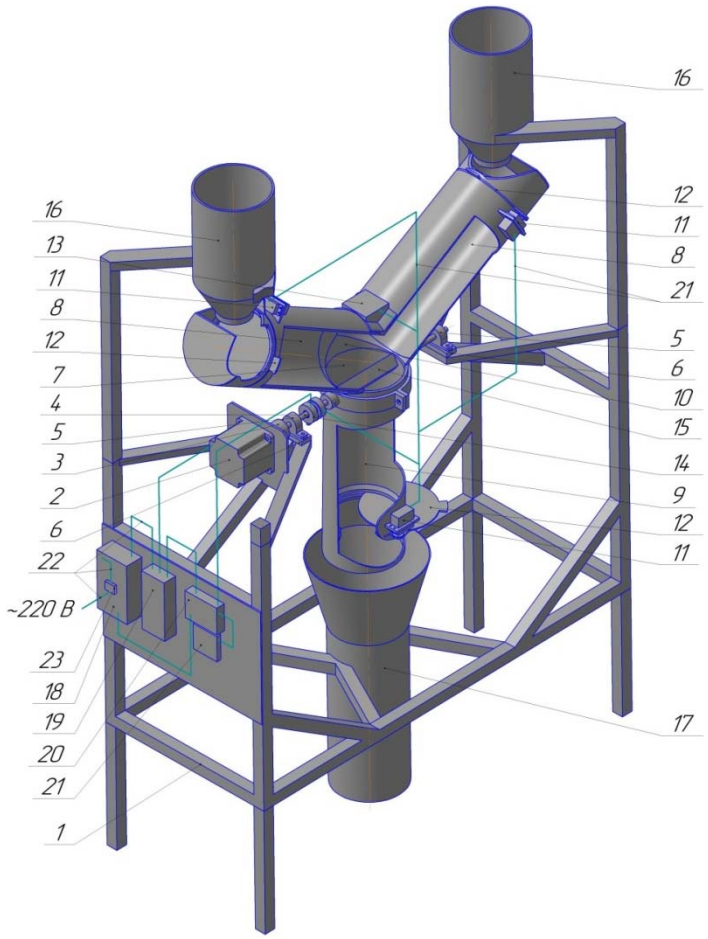
З погляду спеціалізованих аграрно-інженерних досліджень, існує значна кількість робіт, присвячених удосконаленню конструкцій кормозмішувачів та обґрунтуванню технологічних параметрів їх роботи. Так, у [18] наведено експериментальні дослідження впливу геометричних та режимних параметрів змішувача на якість приготування кормових сумішей та енергоспоживання обладнання.

Водночас існують і класичні огляди – зокрема, теоретичні дослідження [19–20] процесів змішування сипких матеріалів, де розглядаються базові механізми формування суміші, оцінювання якості та вплив конструктивних особливостей змішувачів різних типів.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та наукове обґрунтування конструкції Y-подібного змішувача кормових матеріалів, а також попередні дослідження процесу змішування з використанням сучасних методів CFD–DEM моделювання та експериментальної перевірки.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленого завдання розроблено Y-подібний змішувач кормових матеріалів, конструктивно-технологічна схема якого наведена на рис. 1.

Y-подібний змішувач кормових матеріалів працює таким чином. Перед початком роботи здійснюють подачу електроживлення від електромережі до блока живлення, який забезпечує функціонування системи керування та привода обертання. Керування режимами роботи змішувача здійснюється оператором за допомогою клавіатури, а інформація про встановлені та поточні параметри відображається на дисплеї.



1 – станина; 2 – кроковий двигун; 3 – гнучка муфта; 4 – вал; 5 – корпусні підшипники на лапах; 6 – гумові демпфери; 7 – Y-подібна ємність; 8 – нахилені патрубки; 9 – прямий патрубок; 10 – фітинг-трійник; 11 – сервоприводи; 12 – заслінки; 13 – акселерометр; 14 – струмопровідне контактне кільце; 15 – розподільник; 16 – завантажувальні патрубки; 17 – вивантажувальний патрубок; 18 – блок живлення; 19 – контролер крокового двигуна; 20 – блок керування з дисплеєм; 21 – клавіатура; 22 – електричні проводи; 23 – кнопка вмикання

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема Y-подібного змішувач кормових матеріалів
Джерело: розроблено авторами

Оператор задає основні параметри процесу, зокрема частоту обертання Y-подібної ємності, період її обертання у кожному напрямку та загальну тривалість змішування кормових матеріалів, після чого запускає процес. Інформація про кут нахилу ємності, що надходить від акселерометра, використовується системою керування для формування керувальних сигналів привода. Привід обертання через гнучку муфту та вал передає обертальний рух Y-подібній ємності, яка встановлюється у вертикальне положення так, що два нахилені патрубки розташовані зверху, а прямий патрубок – знизу. Після цього відкриваються заслінки нахилених патрубків, і кормові матеріали із завантажувальних патрубків надходять у змішувальну ємність, заповнюючи її до заданого рівня. Після завершення завантаження заслінки закриваються. Далі ємність починає обертатися із заданими параметрами.

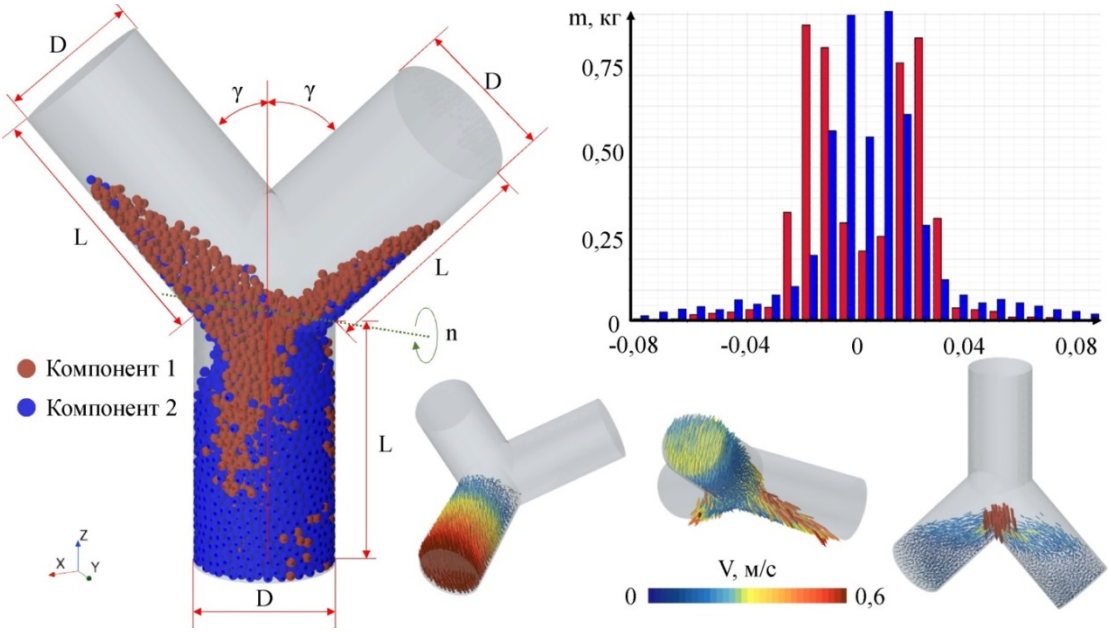
У процесі обертання кормові матеріали переміщуються під дією відцентрових сил, сили тяжіння та взаємодії з внутрішнім розподільником, що забезпечує інтенсивне та рівномірне перемішування компонентів корму. Додаткові коливання ємності, які виникають завдяки демпфувальним елементам, сприяють інтенсифікації процесу змішування, запобігають утворенню застійних зон і підвищують однорідність готової кормової суміші.

Акселерометр забезпечує контроль динамічних параметрів руху та передає відповідні сигнали до системи керування для коригування режимів роботи у реальному часі.

Після завершення заданої тривалості процесу змішування ємність знову встановлюється у вертикальне положення, після чого відкривається заслінка прямого патрубка, і готова кормова суміш під дією сили тяжіння вивантажується через вивантажувальний патрубок. Після завершення вивантаження заслінка закривається, і за необхідності процес може бути повторений.

Перший етап досліджень був спрямований на аналітичне обґрунтування конструктивний і режимних параметрів Y-подібного змішувача кормових матеріалів з використанням сучасних методів багатофазного моделювання. Для цього застосовано програмне середовище Simcenter Star-CCM+ [21], яке дозволяє поєднувати обчислювальну гідродинаміку з методом дискретних елементів і таким чином відтворювати складну взаємодію газового середовища та твердих частинок у робочому об’ємі змішувача.

На даному етапі сформовано геометричну та розрахункову чисельну модель Y-подібного змішувача (рис. 2), що враховує конструктивні особливості робочої камери та дає змогу варіювати ключові параметри, зокрема кут злиття патрубків, їх діаметр і довжину.



D – діаметр патрубків; L – довжина патрубків; γ – кут злиття патрубків; n – частота обертання; m – маса компонентів; V – швидкість руху частинок

Рисунок 2 – Геометрична та розрахункова чисельна модель Y-подібного змішувача

Джерело: розроблено авторами

Побудова просторової сітки із застосуванням поліедричних і триммер-елементів забезпечила адекватне відображення зон інтенсивного руху частинок і контактної взаємодії зі стінками при прийнятних обчислювальних витратах.

Фізична постановка задачі базувалася на нестаціонарному тривимірному підході, у якому повітряне середовище розглядалося як суцільна фаза, а кормові матеріали – як сукупність окремих твердих частинок, рух яких описувався у лагранжевій формі. Для частинок прийнято спрощене геометричне представлення у вигляді сфер із постійними фізико-механічними властивостями. Контактна взаємодія між компонентами преміксу та зі стінками змішувача моделювалася з урахуванням пружних і фрикційних ефектів, що дозволило відтворити реальні умови зіткнень у процесі перемішування.

У межах чисельних експериментів змодельовано стадії завантаження, активного змішування та завершального вирівнювання суміші (змішування/сегрегація) (рис. 3). Візуалізація траєкторій руху частинок, розподілу їх швидкостей і концентрацій у різних зонах робочої камери дала змогу простежити формування багатопоточних структур і оцінити характер циркуляції матеріалу під час обертання змішувача. Отримані часові залежності коефіцієнта однорідності в контрольних точках підтвердили наявність чітко виражених фаз процесу та дозволили визначити момент досягнення стабільного рівня змішування.

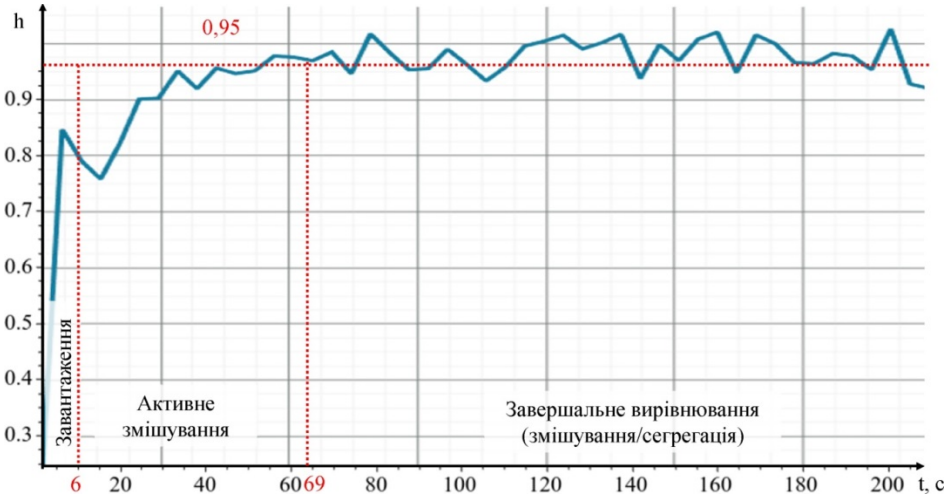


Рисунок 3 – Кінетика процесу змішування в Y-подібному змішувачі при γ = 46°, D = 186 мм, L = 371 мм, n = 22 об/хв

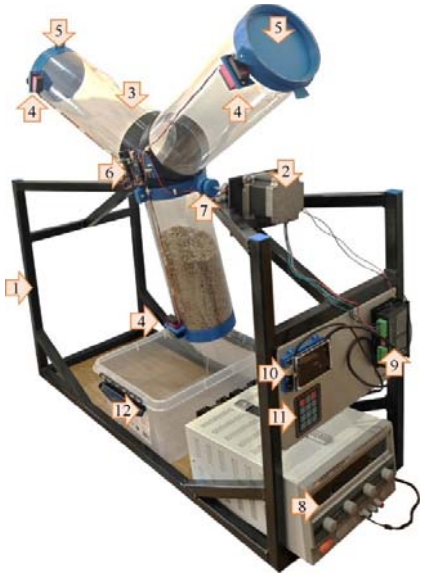
Джерело: розроблено авторами

У результаті варіювання параметрів Y-подібного змішувача встановлено, що досягнення коефіцієнта однорідності суміші 0,95 за мінімального часу змішування та збільшеного об'єму гілок змішувача можливе за раціонального поєднання конструктивних і режимних параметрів. За результатами обробки даних у середовищі Wolfram Cloud визначено оптимальні значення факторів дослідження: кут злиття патрубків γ = 46°, діаметр патрубків D = 186 мм, довжина патрубків L = 371 мм, частота обертання n = 22 об/хв. За цих умов тривалість процесу змішування становить τ = 69 с.

Таким чином, результати першого етапу досліджень підтверджують доцільність використання підходу CFD–DEM для аналізу роботи Y-подібного змішувача кормових преміксів. Сформована модель створює надійну основу для подальших експериментальних досліджень, оптимізації конструктивних і режимних параметрів, а також для оцінювання енергоефективності процесу змішування.

Друга стадія досліджень присвячена проведенню експериментальної перевірки результатів чисельного моделювання та встановленню закономірностей процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі за реальних умов роботи. Основною метою експериментальних досліджень є оцінювання ефективності процесу змішування, уточнення впливу конструктивних і режимних параметрів на якість готової суміші, а також підтвердження раціональних значень факторів, отриманих на етапі CFD–DEM моделювання.

Друга стадія досліджень була спрямована на формування експериментальної бази для подальшого вивчення процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі та на розроблення методики проведення експериментальних досліджень. На цьому етапі виконано проєктування, виготовлення та перевірку працездатності лабораторного стенду (рис. 4), а також сформовано систему факторів, критеріїв і засобів вимірювання, які планується використати під час наступної стадії експериментів.



1 – станина; 3 – Y-подібна ємність; 4 – сервоприводи; 5 – заслінки; 6 – акселерометр; 7 – струмопровідне контактне кільце; 8 – блок живлення; 9 – контролер крокового двигуна; 10 – блок керування з дисплеєм; 11 – клавіатура; 12 – ємність для збору суміші

Рисунок 4 – Загальний вигляд стенду Y-подібного змішувач кормових матеріалів
Джерело: розроблено авторами

Для реалізації експериментальних досліджень виготовлено лабораторний стенд Y-подібного змішувача кормових матеріалів, конструкція якого відповідає принциповій схемі (рис. 1) та результатам чисельного моделювання (рис. 2).

Y-подібна ємність стенду виконана модульною, що забезпечує можливість варіювання геометричних параметрів гілок без зміни базової конструкції. Передбачено заміну патрубків різної довжини та діаметра, а також використання змінних фітингів для встановлення різних кутів злиття гілок. Такий конструктивний підхід створює умови для систематичного дослідження впливу геометрії робочого органа на процес змішування кормових матеріалів на наступних етапах роботи.

Система завантаження та вивантаження кормових матеріалів оснащена керованими заслінками, що унеможливлює неконтрольовану подачу або передчасне вивантаження суміші. Це забезпечує відтворюваність умов майбутніх експериментів і чітке розмежування стадій завантаження, змішування та вивантаження.

Для контролю динамічних параметрів роботи Y-подібної ємності на стенді встановлено акселерометр у зоні злиття гілок. Передача сигналів від датчика здійснюється через струмопровідне контактне кільце, що забезпечує безперервне електроживлення та зчитування даних з рухомих елементів. На другій стадії виконано перевірку працездатності системи збору даних і стабільності сигналів акселерометра в усьому діапазоні робочих швидкостей обертання.

Після виготовлення стенду проведено комплекс пусконалагоджувальних робіт і функціональних випробувань без навантаження та з холостим прокручуванням робочої ємності. У ході перевірки підтверджено коректність роботи привода, системи керування, сервоприводів заслінок і вимірювальних датчиків, а також відсутність резонансних режимів у допустимому діапазоні частот обертання. Це дозволило зробити висновок про готовність стенду до проведення експериментальних досліджень.

Паралельно зі створенням стенду розроблено методику експериментальних досліджень процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі. Методика передбачає проведення серії дослідів за планом багатофакторного експерименту з керованою зміною основних конструктивних і режимних параметрів. До факторів

досліджень віднесено довжину гілок Y-подібної ємності, діаметр їх поперечного перерізу, кут злиття гілок, частоту обертання робочої ємності та тривалість змішування.

Визначено критерії оцінювання ефективності процесу змішування, основним з яких є коефіцієнт однорідності кормової суміші, що планується визначати за результатами відбору проб із кількох контрольних зон робочого об'єму. Додатково передбачено оцінювання енергетичних показників процесу шляхом вимірювання споживаної потужності привода змішувача.

Таким чином, на другій стадії досліджень створено та перевірено експериментальний стенд Y-подібного змішувача кормових матеріалів, а також розроблено методику проведення експериментальних досліджень. Безпосереднє виконання експериментів, одержання та аналіз кількісних результатів передбачається здійснити на наступній стадії роботи.

Висновки. Розроблено конструкцію Y-подібного змішувача кормових матеріалів із керованими режимами роботи, що забезпечує інтенсивне переміщення компонентів за рахунок поєднання обертального руху робочої ємності, дії відцентрових і гравітаційних сил, а також додаткових коливань, сформованих демпфувальними елементами.

Створено геометричну та розрахункову чисельну модель Y-подібного змішувача у середовищі Simcenter Star-CCM+ з використанням підходу CFD–DEM, що дозволило відтворити реальні умови взаємодії сипких кормових матеріалів між собою та зі стінками робочої камери. За результатами чисельних експериментів встановлено наявність чітко виражених стадій процесу змішування: завантаження, активного перемішування та стабілізації однорідності суміші. Отримані часові залежності коефіцієнта однорідності підтвердили можливість досягнення високої якості змішування в межах короткого технологічного циклу. Визначено раціональні значення конструктивних і режимних параметрів Y-подібного змішувача, за яких забезпечується коефіцієнт однорідності суміші 0,95: кут злиття патрубків $\gamma = 46°$, діаметр патрубків $D = 186$ мм, довжина патрубків $L = 371$ мм, частота обертання $n = 22$ об/хв, при тривалості процесу змішування $\tau = 69$ с.

Спроєктовано та виготовлено лабораторний стенд Y-подібного змішувача кормових матеріалів, конструкція якого відповідає результатам чисельного моделювання та забезпечує можливість варіювання основних геометричних параметрів робочої ємності. Розроблено методику експериментальних досліджень, яка створює основу для подальшого вивчення закономірностей процесу змішування, експериментального підтвердження результатів моделювання та оцінювання енергетичної ефективності Y-подібного змішувача кормових матеріалів.

Список літератури

1. Кісільов Р. В., Лузан П. Г., Амосов В. В., Васильковський М. О. Дослідження впливу конструктивних параметрів змішувача на якість приготування кормової суміші. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: наук. зб.* 2025. Вип. 12(43), ч. 1. С. 187–194. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.187-194
2. Кісільов Р. В., Хмельовський В. С., Лузан П. Г., Сисоліна І. П. Дослідження двосекційного змішувача для приготування збалансованих сумішей на фермах ВРХ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 107–113. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.107-113
3. Кісільов Р. В., Матвєєв К. Д., Лузан П. Г. Дослідження технологічної ефективності змішування кормів двоступеневим одновальним комбінованим змішувачем періодичної дії. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 43, ч. 2. С. 108–112.
4. Дудін В. Ю., Говоруха В. Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 53. С. 112–121. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.112-12
5. Кісільов Р. В., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Нестеренко О. В. Дослідження процесу приготування кормових сумішей для ВРХ комбінованим змішувачем. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2014. Вип. 44. С. 20–24.

6. Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Poberezhets J., Tokarchuk O., Hon-tar V., Didyk A. Multicriteria compromise optimization of feed grain grinding process. *Przegląd el-ektrotechniczny*. 2021. Vol. 97 (11). P. 179–183. DOI: 10.15199/48.2021.11.33
7. Xin J. DEM Study on the Mixing Behaviour of U-shaped Ribbon Mixers. *A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.* 2022. 292 p.
8. Park C., Kim J., Landon R. S., Lyu B., Cho H., Moon I. Novel evaluation method for the continuous mixing process of bimodal particles. *Powder Technology*. 2018. Vol. 344. P. 636–646. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.052
9. Bhalode P., Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*. 2020. Vol. 373. P. 195–209. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.043
10. Chandratilleke G. R., Bridgwater A. Yu, J., Shinohara K. A particle-scale index in the quantification of mixing of particles. AIChE journal. 2012. Vol. 58. P. 1099–1118. DOI: 10.1002/aic.12654
11. Cho M., Dutta P., Shim J. A non-sampling mixing index for multicomponent mixtures. *Powder Technology*. 2017. Vol. 319. P. 434–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.011
12. Lemieux M., Bertrand F., Chaouki J., Gosselin P. Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender. *Chemical Engineering Science*. 2007. Vol. 62. P. 1783–1802. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.012
13. Алієв Е. Б., Кошулько В. С., Кочережко Н. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного змішувача комбікормів періодичної дії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. Вип. 3 (122). С. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-1
14. Biroun M. H., Sorensen E., Hilden J. L., Mazzei L. CFD modelling of powder flow in a continuous horizontal mixer. *Powder Technology*. 2023. Vol. 428. 118843. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118843
15. Pezo M., Pezo L., Jovanović A., Lončar B., Čolović R. DEM/CFD approach for modeling granular flow in the revolving static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. Vol. 109. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.003
16. Shevchenko I., Aliiev E. Improving theefficiency ofthe process ofcontinuous flowmixing of bulkcomponents. Eastern-*European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6/1 (108). P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
17. Lee S.J., Hwang S.-Y. Comparative Study to Evaluate Mixing Efficiency of Very Fine Particles. *Applied Sciences.* 2025. Vol. 15. P. 8712. DOI: 10.3390/app15158712
18. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Тарасюк Ю. М. Результати експериментальних досліджень якості змішування кормових сумішей гвинтовим транспортером – змішувачем. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2014. Вип. 2. С. 309–315.
19. Pezo M., Pezo L., Lončar B., Kojić P., Jovanović A. A. A Comprehensive Review of Discrete Element Method Studies of Granular Flow in Static Mixers. *Processes*. 2025. Vol. 13(11). 3522. DOI: 10.3390/pr13113522
20. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective. *Particuology*. 2012. Vol. 10 (4). P. 397–427. DOI: 10.1016/j.partic.2012.06.002
21. Алієв Е. Б. *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник*. Київ: Аграрна наука. 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9

References

1. Kisilyov, R. V., Luzan, P. G., Amosov, V. V., & Vasylkovsky, M. O. (2025). Research on the influence of the design parameters of the mixer on the quality of the feed mixture preparation. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Scientific Collection*. Issue 12(43), Part 1. P. 187–194. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.187-194 [in Ukrainian].
2. Kisilyov, R. V., Khmelovsky, V. S., Luzan, P. G., & Sysolina, I. P. (2020). Research on a two-section mixer for the preparation of balanced mixtures on cattle farms. *Design, production and operation of agricultural machinery: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. Issue 50. P. 107–113. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.107-113 [in Ukrainian].
3. Kisilov, R. V., Matveev, K. D., & Luzan, P. G. (2013). Research on the technological efficiency of mixing feed with a two-stage single-shaft combined mixer of periodic action. *Design, production and operation of agricultural machines: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Proceedings*. Issue 43, part 2. P. 108–112. [in Ukrainian].
4. Dudin, V. Yu., & Govorukha, V. B. (2023). Justification of the design and technological parameters of a ribbon-screw mixer for bulk feed. *Design, production and operation of agricultural machines: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Proceedings*. Issue 53. P. 112–121. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.112-12 [in Ukrainian].
5. Kisilyov, R. V., Luzan, P. G., Machok, Yu. V., & Nesterenko, O. V. (2014). Research on the process of preparing feed mixtures for cattle using a combined mixer. *Design, production and operation of agricultural machines: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Proceedings*. Issue 44. P. 20–24. [in Ukrainian].

6. Kupchuk, I., Yaropud, V., Hraniak, V., Poberezhets, J., Tokarchuk, O., Hon-ta,r V., & Didyk, A. (2021). Multicriteria compromise optimization of feed grain grinding process. *Przegląd el-ektrotechniczny*. Vol. 97 (11). P. 179–183. DOI: 10.15199/48.2021.11.33 [in English].
7. Xin, J. (2022). DEM Study on the Mixing Behavior of U-shaped Ribbon Mixers. *A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy*. 292 p. [in English].
8. Park, C., Kim, J., Landon, R.S., Lyu, B., Cho, H., & Moon, I. (2018). Novel evaluation method for the continuous mixing process of bimodal particles. *Powder Technology*. Vol. 344. P. 636–646. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.052 [in English].
9. Bhalode, P., & Ierapetritou, M. (2020). A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*. Vol. 373. P. 195–209. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.043 [in English].
10. Chandratilleke, G. R., Bridgwater, A. Yu, J., & Shinohara, K. (2012). A particle-scale index in the quantification of mixing of particles. *AIChE journal*. Vol. 58. P. 1099–1118. DOI: 10.1002/aic.12654 [in English].
11. Cho, M., Dutta, P., & Shim, J. (2017). A non-sampling mixing index for multicomponent mixtures. *Powder Technology*. Vol. 319. P. 434–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.011 [in English].
12. Lemieux, M., Bertrand, F., Chaouki, J., & Gosselin, P. (2007). Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender. *Chemical Engineering Science*. Vol. 62. P. 1783–1802. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.012 [in English].
13. Aliiev, E. B., Koshulko, V. S., & Kocherezhko, N. V. (2023). Justification of the design and technological parameters of a rotary mixer of compound feeds of periodic action. *Technology, Energy, Transport of the Agricultural Industry*. Issue 3 (122). P. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-1 [in Ukrainian].
14. Biroun, M.H., Sorensen, E., Hilden, J.L., & Mazzei, L. (2023). CFD modeling of powder flow in a continuous horizontal mixer. *Powder Technology*. Vol. 428. 118843. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118843 [in English].
15. Pezo, M., Pezo, L., Jovanović, A., Lončar, B., & Čolović, R. (2016). DEM/CFD approach for modeling granular flow in the revolving static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 109. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.003 [in English].
16. Shevchenko I., Aliyev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6/1 (108). P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409 [in English].
17. Lee, S.J., & Hwang, S.-Y. (2025). Comparative Study to Evaluate Mixing Efficiency of Very Fine Particles. *Applied Sciences*. Vol. 15. P. 8712. DOI: 10.3390/app15158712 [in English].
18. Gevko, I. B., Dyachun, A. E.,& Tarasyuk, Yu. M. (2014). Results of experimental research on the quality of mixing of feed mixtures by screw conveyor - mixer. *Bulletin of the Zhytomyr National Agroecological University*. Issue 2. P. 309–315. [in Ukrainian].
19. Pezo, M., Pezo, L., Lončar, B., Kojić, P., & Jovanović, A. A. (2025). A Comprehensive Review of Discrete Element Method Studies of Granular Flow in Static Mixers. *Processes*. Vol. 13(11). 3522. DOI: 10.3390/pr13113522 [in English].
20. Bridgwater, J. (2012). Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective. *Particuology*. Vol. 10 (4). P. 397–427. DOI: 10.1016/j.partic.2012.06.002 [in English].
21. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agroindustrial production processes: textbook*. Kyiv: Agrarian Science. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9 [in Ukrainian].

Elchyn Aliiev, Professor, DSc. Senior Researcher
Ruslan Ponomarenko, recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of Preliminary Studies of a Y-Shaped Feed Material Mixer

The quality of feed mixture preparation is a determining factor in livestock efficiency, as the uniform distribution of components directly affects the nutritional value and balance of the feed. This article presents the results of preliminary studies on the mixing process of feed materials in a Y-shaped mixer with controllable operating modes. The design and technological scheme of the mixer and its operating principle are justified. To analyze the physical patterns of the process, numerical modeling was used combining computational fluid dynamics and discrete element methods (CFD–DEM) in the Simcenter Star-CCM+ environment. The influence of geometric and operational parameters on the mixing kinetics and the mixture homogeneity coefficient was investigated. Rational values of the main parameters were determined, ensuring a homogeneity coefficient of 0.95 with minimal processing time. A laboratory test bench was designed and manufactured, and a methodology for experimental studies was developed, forming the basis for further optimization of the design and assessment of the energy efficiency of the Y-shaped feed mixer.

feed materials, mixer, mixture homogeneity, CFD–DEM modeling, design parameters, experimental studies

Одержано (Received) 11.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 25.02.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ
INFORMATION ABOUT AUTHORS

Алієв Ельчин Бахтияр огли – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4006-8803, e-mail: aliev@meta.ua.
Elchyn Aliiev – Doctor of Technic Sciences, Senior Researcher, Professor Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4006-8803, e-mail: aliev@meta.ua.

Абрамова Людмила Сергіївна – професор, доктор технічних наук, професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-9618, e-mail: abramova_ls@ukr.net.
Liudmyla Abramova – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Road Traffic Management and Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-9618, e-mail: abramova_ls@ukr.net.

Артеменко Дмитро Юрійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6633-0470, e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua.
Dmytro Artemenko – Associate Professor, PhD of technical sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Agricultural Engineering Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-6633-0470, e e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua.

Атрощенко Дмитро Олександрович – аспірант кафедри матеріалознавства і ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3793-8691., e-mail: atroshchenkod@gmail.com
Dmytro Atroshchenko – Postgraduate student of the Department of Materials Science and Foundry Production, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine,ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3793-8691, e-mail: atroshchenkod@gmail.com.

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.

Бабак Олег Петрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1068-0631, e-mail: ang.babak@gmail.com.
Oleg Babak - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Tribology, Automobiles and Materials Science, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1068-0631, e-mail: ang.babak@gmail.com.

Бабій Андрій Васильович – професор, доктор технічних наук, завідувача кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6198-0100, e-mail: avbabiytntu@gmail.com.
Andrii Babii – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Engineering Mechanics and Agricultural Machines Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6198-0100, e-mail: avbabiytntu@gmail.com.

Бевз Олег Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1606-2372, e-mail: oleg_bevz@ukr.net.
Bevz Oleg - 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/0000-0003-1606-2372, e-mail: oleg_bevz@ukr.net.

Березька Катерина– доцент, кандидат технічних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9632-4004б e-mail: k.berezka@wunu.edu.uaю
Kateryna Berezka – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9632-4004, e-mail: k.berezka@wunu.edu.ua.

Боровік Артем Євгенійович – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0743-174X, e-mail: artem.borovik@gmail.com.
Artem Borovik – PhD student in Industrial mechanical engineering, Azov State Technical University, Dnipro, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0743-174X, e-mail: artem.borovik@gmail.com.

Босий Микола Вікторович – старший викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3090-0427, e-mail:bosiymv@ukr.net.
Mykola Bosyi – Senior Lecturer of Materials Science and Foundry Engineering Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3090-0427, e-mail: bosiymv@ukr.net.

Вальчук Ігор Казимирович – аспірант, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна.
Igor Valchuk – Postgraduate student, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine.

Валявський Іван Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки та робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4899-6313, e-mail: valiavskyi@kntu.kr.ua.
Ivan Valiavskyi – Candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4899-6313, e-mail: valiavskyi@kntu.kr.ua.

Веселівська Галина Григорівна – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORSID: https://orcid.org/0000-0002-0393-092X, e-mail: fminanu1978@gmail.com.
Halyna Veselivs'ka – Senior research fellow, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Researcher of Department of material science bases of surface engineering of Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORSID: https://orcid.org/0000-0002-0393-092X, e-mail: fminanu1978@gmail.com.

Вичавка Анатолій Анатолійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1467-9337, e-mail: vichavka@ukr.net.
Anatolij Vychavka - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Tribology, Automobiles and Materials Science, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1467-9337, e-mail: vichavka@ukr.net.

Вовк Іван Васильович – 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/0009-0000-5305-3550, e-mail: ivan_5479@ukr.net.
Ivan Vovk – PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5305-3550, e-mail: ivan_5479@ukr.net.

Гайкова Тетяна Владиславівна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6972-3210, e-mail: tanyahaikova@ukr.net.
Tetiana Haikova – Associate Professor, Ph. D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport Technologies, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-6972-3210, e-mail: tanyahaikova@ukr.net.

Гевко Богдан Романович– кандидат економічних наук, асистент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1639-2136, e-mail: gevkobr@gmail.com.
Bohdan Hevko – PhD in Technical Sciences, Assistant of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1639-2136, e-mail: gevkobr@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.

Глиняний Віктор Сергійович – аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4209-8378, e-mail: victorglin9@gmail.com.
Viktor Glynianyi - Postgraduate Student, Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4209-8378, e-mail: victorglin9@gmail.com.

Гоголюк Оксана Петрівна – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка». Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2146-4667, e-mail: oksana.p.hoholyuk@lpnu.ua.
Oksana Hoholyuk – Professor, Doctor in Technics (Doctor of Technics Sciences), Head of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Institute of Power Engineering and Control Systems, Lviv Polytechnic National University. Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2146-4667, e-mail: oksana.p.hoholyuk@lpnu.ua.

Годунко Максим Олегович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2649-5040, e-mail: maksimgodunko83@gmail.com.
Maksym Hodunko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2649-5040, e-mail: maksimgodunko83@gmail.com.

Головатий Артем Олегович – асистент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9552-0089, e-mail: artemholovatyi@ukr.net.
Artem Holovatyi – Assistant lecturer, Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9552-0089, e-mail: artemholovatyi@ukr.net.

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.

Гречка Андрій Іванович – доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1188-7412, e-mail: angre17@gmail.com.
Andrii Hrechka – Associate Professor, Candidate of technical sciences, Head of the department "Mechanical engineering, mechatronics and robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-1188-7412, e-mail: angre17@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 in Technics (Candidate of Technics 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.

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

Даниляк Марія-Олена Михайлівна – старший дослідник, кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу Корозії та протикорозійного захисту Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORSID: https://orcid.org/0000-0003-0688-8146, e-mail:
danyliak-olena@ukr.net.
Olena-Mariia Danyliak – Senior research fellow, PhD (Candidate of Chemical Sciences), Senior Researcher of Department of corrosion and corrosion protection of Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORSID: https://orcid.org/0000-0003-0688-8146, e-mail: danyliak-olena@ukr.net.

Дарієнко Віктор Вікторович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9023-6030, e-mail: vvdarienko@gmail.com, (066)3038586
Viktor Darienko - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9023-6030, e-mail: vvdarienko@gmail.com, (066)3038586

Дейкун Віктор Анатолійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5420-5878 , e-mail: dejkunva@kntu.kr.ua.
Viktor Deikun – 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/0000-0001-5420-5878 , e-mail: dejkunva@kntu.kr.ua.

Джирма Станіслав Олександрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельні, дорожні машини і будівництво, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2248-1653, e-mail: stas55871@ukr.net.
Stanislav Dzhyrma – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Building and Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2248-1653, e-mail: stas55871@ukr.net.

Доля Костянтин Вікторович – доцент, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, ORCID 0000-0002-4693-9158, . k.v.dolia@gmail.com, 0992918160
Kostiantyn Dolia – Associate Professor, Doctor of Science, Professor of the Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID 0000-0002-4693-9158, . k.v.dolia@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.

Євменьєв Ілля Романович – студент, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна e-mail: evmenevilla@gmail.com.
Illia Yevmenyev – student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: evmenevilla@gmail.com.

Єрьомін Павло Миколайович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6650-3389, e-mail: p24124@gmail.com.
Pavlo Yeromin – Candidate of technical sciences, Senior teacher of the department "Mechanical engineering, mechatronics and robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0001-6650-3389, e-mail: p24124@gmail.com.

Замкова Наталія Олександрівна – здобувач вищої освіти на четвертому (освітньо-науковому) рівні за спеціальність "Транспортні технології " (на автомобільному транспорті), Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: Natashkazamkova@gmail.com.
Nataliia Zamkova – a higher education applicant at the fourth (educational and scientific) level in the specialty "Transport Technologies" (in road transport), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: Natashkazamkova@gmail.com.

Захарчук Олена Павлівна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспорту і логістики, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4359-5644, e-mail: olenaskyba8500@gmail.com, (068) 9302511
Olena Zakharcuk - Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of of Transport and Logistics Department, Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-4359-5644, e-mail: olenaskyba8500@gmail.com.

Йовченко Алла Василівна – кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна, ORCID: 0000-0002-7069-1092, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, 0986551002.
Alla Yovchenko – PhD tech. sci, senior lecturer of Department of Automobiles and Technology of Their Operation, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: 0000-0002-7069-1092, e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, 0986551002.

Кепко Олег Ігорович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної інженерії та охорони праці, Уманський національний університет, м. Умань, Україна, ORCID: https://orcid.org 0000-0003-1443-307X, e-mail: kepko@meta.ua.
Oleg Kepko – Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Applied Engineering and Occupational Safety, Uman National University, Uman, Ukraine, ORCID: https://orcid.org 0000-0003-1443-307X, e-mail: kepko@meta.ua.

Кириченко Андрій Миколайович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4335-9588, e-mail: amkyrychenko@gmail.com.
Andrii Kyrychenko – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the department "Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-4335-9588, e-mail: amkyrychenko@gmail.com.

Кириченко Ігор Георгійович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет «ХНАДУ», м. Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2128-3500, e-mail: kyrig@ukr.net.
Ihor Kyrychenko – Professor, Doctor of Sciences (Doctor of Technical Sciences), Professor of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University «KhNADU», Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2128-3500, e-mail: kyrig@ukr.net.

Кислун Олег Андрійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6059-3731, e-mail: kyslun@gmail.com.
Kyslun Oleh - Associate Professor, PhD of technical sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Software, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6059-3731, e-mail: kyslun@gmail.com.

Коваль Назарій Ярославович – проректор, доктор філософії, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7846-2924, e-mail: kovaln870@gmail.com.
Nazarii Koval – Vice-Rector, Doctor of Philosophy, Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7846-2924, e-mail: kovaln870@gmail.com.

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.

Ковальов Юрій Григорович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1729-2033, e-mail: yukovalyov@ukr.net.
Yurii Kovalov – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Associate Professor of the Department of Materials Science and Foundry Production, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1729-2033, e-mail: yukovalyov@ukr.net.

Козаченко Євген Миколайович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4075-439X, e-mail: Kozachenko.yevhen@gmail.com.
Yevhen Kozachenko – PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4075-439X, e-mail: Kozachenko.yevhen@gmail.com.

Козловський Олександр Антонович – доцент, кандидат технічних наук, Доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, e-mail: kozlovskyioa@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6885-5994
Oleksandr Kozlovskyi – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Associate Professor of the Department of Electrical Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine , e-mail: kozlovskyioa@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6885-5994

Костьян Наталія Леонідівна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1599-4007, e-mail: n.kostian@chdtu.edu.ua.
Nataliia Kostian – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Technologies of their Operating, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1599-4007, e-mail: n.kostian@chdtu.edu.ua.

Коциловський Мар'ян Петрович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Галузеве машинобудування», Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2958-637X, e-mail: m.kotsylovsky@gmail.com.
Maryan Kotsylovskyi – PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2958-637X, e-mail: m.kotsylovsky@gmail.com.

Кочина Анастасія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-4770, e-mail: kochina.tsl@gmail.com.
Anastasia Kochina – PhD in Engineering, Associate Professor of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8377-4770, e-mail: kochina.tsl@gmail.com.

Кравченко Роман Анатолійович – аспірант кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1268-1141, e-mail: roman.kravchenko.84@ukr.net.
Roman Kravchenko – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1268-1141, e-mail: roman.kravchenko.84@ukr.net.

Красота Артем Михайлович – 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/ 0009-0007-7700-9176, e-mail: kras.kras.kras.365@gmail.com.
Artem Krasota – PhD student in Industrial Engineering, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7700-9176, e-mail: kras.kras.kras.365@gmail.com.

Красота Михайло Віталійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8791-3264, e-mail: krasotamv@ukr.net.
Mykhailo Krasota – Associate Professor, PhD. Sc. (Tech) (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0001-8791-3264, e-mail: krasotamv@ukr.net.

Кропівний Володимир Миколайович – професор, кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5313-0226, e-mail: vlkropivny@gmail.com.
Volodymyr Kropivnyi – Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5313-0226, e-mail: vlkropivny@gmail.com.

Кузик Олександр Володимирович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3047-3760, e-mail: kuzykov1985@gmail.com.
Olexandr Kuzyk – Associate Professor, PhD in Engineering (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Materials Science and Foundry Engineering Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-3047-3760, e-mail: kuzykov1985@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 Transport Technologies, Senior Lecturer at the Department of Machine Operation and Repair, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6727-5357, e-mail: d.coolava@gmail.com.

Лаврись Сергій Мирославович – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORSID: https://orcid.org/0000-0003-2616-8699, e-mail: lavrys92@gmail.com.
Serhii Lavrys – Senior research fellow, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Researcher of Department of material science bases of surface engineering of Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORSID: https://orcid.org/0000-0003-2616-8699, e-mail: lavrys92@gmail.com.

Лапченко Артем Сергійович – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4037-5395, email: las83@ukr.net.
Artem Lapchenko – Senior Researcher, PhD in Engineering (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Bridges, tunnels and hydraulic structures department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4037-5395, email: las83@ukr.net.

Лисенко Олександр Володимирович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3385-1771, e-mail: Ac74@i.ua.
Oleksandr Lysenko – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Mechanical engineering, mechatronics and robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-3385-1771, e-mail: Ac74@i.ua

Лисенко Сергій Володимирович – доцент, кандидат технічних 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.

Лізунков Олександр Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7639-8842, e-mail: AvLizunkov@gmail.com.
Oleksandr Lizunkov – 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/0000-0001-7639-8842, e-mail: AvLizunkov@gmail.com.

Лісовий Іван Олександрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії, Уманський національний університет, м. Умань, Україна, ORCID: https://orcid.org 0000-0003-1480-1805, **e-mail**: lisov.iv.ol@gmail.com**.**
Lisoviy Ivan – Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Agroengineering, Uman National University, Uman, Ukraine, ORCID: https://orcid.org 0000-0003-1480-1805, e-mail: lisov.iv.ol@gmail.com.

Ломакін Віктор Миколайович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6724-4961, e-mail: vik284333@gmail.com.
Viktor Lomakin – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Associate Professor of the Department of Materials Science and Foundry Production, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, http://orcid.org/0000-0002-6724-4961, e-mail: vik284333@gmail.com.

Ляшук Олег Леонтійович - професор, доктор технічних наук, професор кафедри автотранспорту та логістики, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4881-8568, e-mail: dyachun_andriy@ukr.net.
Oleg Lyashuk - Professor, Doctor Technical Sciences, Professor of the Department of Motor Transport and Logistics, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4881-8568, e-mail: oleglashuk@ukr.net.

Мажара Віталій Анатолійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7451-3798, e-mail: majara@ukr.net.
Vitalii Mazhara – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7451-3798, e-mail: majara@ukr.net.

Мажаров Володимир Сергійович - кандидат технічних наук, доцент кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів, Українська державна льотна академія, м.Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9535-0841, e-mail: mazharovpp@gmail.com.
Volodymyr Mazharov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Operations and Polling Safety, Ukrainian State Lithuanian Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9535-0841, e-mail: mazharovpp@gmail.com.

Маковкін Олег Миколайович – доцент, кандидат технічних наук, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4487-7448, e-mail: makovkinol@khmnu.edu.ua.
Makovkin Oleg Mykolaiovych – Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4487-7448, e-mail: makovkinol@khmnu.edu.ua.

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.

Молокост Людмила Анатоліївна – викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8418-0672, e-mail: lyudmila.molokost1967@gmail.com.
Liudmyla Molokost – Lecturer of Materials Science and Foundry Engineering Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8418-0672, e-mail: lyudmila.molokost1967@gmail.com.

Моргун Олексій Ігорович – здобувач вищої освіти на другому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Прикладна механіка», Національний технічний університет України «Київський політехнічний

інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9611-1829, e-mail: alexmorgun2003@gmail.com.
Oleksii Morhun– student in Applied Mechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9611-1829, e-mail: alexmorgun2003@gmail.com.

Москальченко Роман Володимирович – аспірант кафедри сільськогосподарського машинобудування, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: romanmoskalchenko2016@gmail.com.
Roman Moskalchenko – postgraduate Agricultural Engineering Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: romanmoskalchenko2016@gmail.com.

Мусієнко Ольга Станіславівна – доктор філософії, старший викладач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8255-3909, e-mail: olga.musinko@gmail.com.
Olha Musiienko – PhD in Applied Mechanics, Senior Lecturer at the Department of Dynamics and Strength of Machines and Strength of Materials, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8255-3909, e-mail: olga.musinko@gmail.com.

Мурований Ігор – доцент, кандидат технічних наук, Луцький національний університет, Луцьк, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9749-980X, e-mail: igor_lntu@ukr.net.
Igor Murovanyi – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9749-980X, e-mail: igor_lntu@ukr.net.

Навроцька Тетяна Дем'янівна– кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8926-3389, e-mail: tanyanavrotcka82@gmail.com.
Tetiana Navrotska – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8926-3389, e-mail: tanyanavrotcka82@gmail.com.

Наглюк Іван Сергійович – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри організації та безпеки дорожнього руху, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9411-4479, e-mail: isnagluk@ukr.net.
Ivan Nahliuk – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Road Traffic Management and Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9411-4479, e-mail: isnagluk@ukr.net.

Настоящий Владислав Анатолійович – кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8931-5097, e-mail: vanast52@ukr.net.
Vladislav Nastoyashchiy – Associate Professor, Professor of the Department of Building, Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8931-5097, e-mail: vanast52@ukr.net.

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: knowledgebasis@gmail.com.

Омелянський Юрій Васильович – аспірант кафедри автотранспорту та логістики, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/ 0009-0005-1002-0050, e-mail: yura.omelyanskyy@stellar-ua.com.
Yuriy Omelyanskyy – Postgraduate student of the Motor Transport and Logistics Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1002-0050, e-mail: yura.omelyanskyy@stellar-ua.com.

Осадчий Сергій Іванович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1811-3594, e-mail: srg2005@ukr.net.
Serhii Osadchyi – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering Systems and Energy Management, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1811-3594, e-mail: srg2005@ukr.net.

Осін Руслан Анатолійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8927-5363, e-mail: ruslan_osin@ukr.net.

Ruslan Osin – Associate Professor, PhD. Sc. (Tech) (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-8927-5363, e-mail: ruslan_osin@ukr.net.

Панасюк Валентина– професор кафедри аудиту, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна, e-mail: tina.panasjuk@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5133-6431
Valentyna Panasyuk – Professor, Dr. E.Sc (Doctor of Economic Sciences), West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, e-mail: tina.panasjuk@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5133-6431

Пархоменко Юрій Михайлович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3492-3965, e-mail: parhomenkoym@ukr.net.
Yuriy Parkhomenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Manufacturing Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3492-3965, e-mail: parhomenkoym@ukr.net.

Пашинський Віктор Антонович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5474-6399, e-mail: pva.kntu@gmail.com.
Victor Pashynskyi – 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 будівельні, дорожні машини і будівництво, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2669-523X, e-mail: mykola.pashynskyi@gmail.com.
Mykola Pashynskyi – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Building and Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2669-523X, e-mail: mykola.pashynskyi@gmail.com.

Перун Сергій Сергійович – студент гр. БІ-24мб, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: perunsese@kntu.kr.ua.
Serhii Perun – Ph. D. Student, Central Ukrainian National Technical, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: perunsese@kntu.kr.ua.

Петрашенко Андрій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного проектування і спеціалізованих комп'ютерних систем факультету прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0239-1706, e-mail: petrashenko@gmail.com.
Andrii Petrashenko – PhD, Associate Professor of the Department of System Design and Specialized Computer Systems, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0239-1706, e-mail*:* petrashenko@gmail.com.

Петрусенко Руслан Ігорович – здобувач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8154-2631, e-mail: ruslan.petrusenko@gmail.com.
Ruslan Petrusenko – Student of the Department of Motor Vehicle Transport, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8154-2631, e-mail: ruslan.petrusenko@gmail.com.

Погрелюк Ірина Миколаївна – професор, доктор технічних наук, завідувач відділу Матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORSID: https://orcid.org/0000-0002-3009-2829, e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com.
Iryna Pohrelyuk – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of material science bases of surface engineering of Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORSID: https://orcid.org/0000-0002-3009-2829, e-mail: irynapohrelyuk@gmail.com.

Пономаренко Руслан Григорович – здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти зі спеціальністю 133 Галузеве машинобудування, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0282-8285, e-mail: Ponomarenko240314@gmail.com.
Ruslan Ponomarenko – PhD student in 133 Industrial mechanical engineering, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0282-8285, e-mail: Ponomarenko240314@gmail.com.

Проскурняк Роман Васильович – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу Матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORSID: https://orcid.org/0000-0003-3925-5652, e-mail: proskurnjak83@gmail.com.
Roman Proskurnyak – PhD (Candidate of Technical Sciences), Researcher of Department of material science bases of surface engineering of Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORSID: https://orcid.org/0000-0003-3925-5652, e-mail: proskurnjak83@gmail.com.

Пукалов Віктор Вікторович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0848-5861, e-mail: Pukalovvictor@gmail.com.
Viktor Pukalov – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Associate Professor of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, http://orcid.org/0000-0002-0848-5861, e-mail: Pukalovvictor@gmail.com.

Посонський Сергій Феліксович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4697-7699, e-mail: p.s.f@ukr.net.
Sergiy Posonskiy – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Tribology, Automobiles and Materials Science, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4697-7699, e-mail: p.s.f@ukr.net.

П'єнтак Марія Дмитрівна – старший викладач кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-6758-6593, e-mail: mariaradyk03@ukr.net.
Mariia Pientak – Senior Lecturer of the Automobiles department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6758-6593, e-mail: mariaradyk03@ukr.net.

Рутковський Анатолій Віталійович – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка Національної академії наук України, м. Київ, Україна, ORCID: 0000-0001-9515-814X, e-mail: rut2000@ukr.net.
Anatoly Rutkovskiy– Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Strength of Materials and Structure Department in thermo -Silly Fields and Gas Streams, Institute of Strength Problems GS Pisarenko National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: 0000-0001-9515-814X, e-mail: rut2000@ukr.net.

Романович Микола Іванович - ст.викладач кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів, Українська державна льотна академія, м.Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5149-3859, e-mail: nicolai1965@ukr.net.
Mykola Romanovych - Senior Lecturer, Department of Flight Operations and Flight Safety, Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5149-3859, e-mail: nicolai1965@ukr.net.

Рендзіняк Сергій Йосипович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій, Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4544-4871, e-mail: serhii.y.rendziniak@edu.lpnu.ua.
Serhiy Rendzinyak – Professor, Doctor in Technics (Doctor of Technics Sciences), Professor of the Department of Radio Physics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4544-4871, e-mail: serhii.y.rendziniak@edu.lpnu.ua.

Сахно Сергій Анатолійович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7874-3376, e-mail: sahno.avcentr@gmail.com.
Serhii Sakhno – Post-Graduate Student of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7874-3376, e-mail: sahno.avcentr@gmail.com.

Священький Володимир Вячеславович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5889-8875, e-mail: sviatskyivv@kntu.kr.ua.
Volodymyr Sviatskyi – Associate Professor, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the department "Mechanical engineering, mechatronics and robotics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-5889-8875, e-mail: sviatskyivv@kntu.kr.ua.

Семченко Наталія Олександрівна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5946-0402, e-mail: nat-semchenko@ukr.net.
Nataliia Semchenko – Associate Professor, Doctor of Philosophy of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Transport, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5946-0402, e-mail: nat-semchenko@ukr.net.

Сергійчук Андрій Андрійович - здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3588-0560, e-mail: kirovogradsto@gmail.com.
Andrii Serhiichuk - PhD Student, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3588-0560, e-mail: kirovogradsto@gmail.com.

Ситник Юрій Борисович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів, Українська державна льотна академія, м.Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0966-691X, e-mail: ybsytnyk@ukr.net.
Yurii Sytnyk – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mineral Operation and Pollution Safety, Ukrainian State Lithuanian Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0966-691X, e-mail: ybsytnyk@ukr.net.

Скриннік Іван Олександрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельні, дорожні машини і будівництво, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1949-3197, e-mail: skrinnikio@kntu.kr.ua.
Ivan Skrynnik – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Department of Building and Road Machines and Construction, Central Ukrainian National Technical, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1949-3197, e-mail: skrinnikio@kntu.kr.ua.

Слонь Віктор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, архітектури та дизайну, Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5535-0794, e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com.
Viktor Slon – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Architecture and Design, Kherson State Agrarian and Economic University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5535-0794, e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com.

Степаненко Сергій Петрович – старший науковий співробітник, доктор технічних наук, завідувач відділу механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8331-4632, e-mail: 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, e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Стецюренко Ілля Станіславович здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8453-2154, e-mail: stetsiurenko.illia@lll.kpi.ua
Illia Stetsiurenko Master's degree student in Computer Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8453-2154, e-mail: stetsiurenko.illia@lll.kpi.ua

Сулима Олексій Миколайович – кандидат медичних наук, ортопед-травматолог вищої категорії, завідувач лабораторії біомедичної інженерії, Державна установа «Інститут травматології та ортопедії Національної академії медичних наук України», м. Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1314-8915, e-mail: sulymaoleksii@gmail.com.
Oleksii Sulyma – PhD in Medicine, orthopedic traumatologist of the highest category, Head of the Biomedical Engineering Laboratory, State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine, ORCID**:** https://orcid.org/0000-0002-1314-8915, e-mail: sulymaoleksii@gmail.com.

Тарандушка Іван Павлович – старший викладач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна. https://orcid.org/0000-0002-5182-3811, e-mail: i.tarandushka@chdtu.edu.ua.
Ivan Tarandushka - Senior Lecturer of vehicles and technology for their operation Department, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-5182-3811, e-mail: i.tarandushka@chdtu.edu.ua.

Тарандушка Людмила Анатоліївна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна. https://orcid.org/0000-0002-1410-9088, e-mail: l.tarandushka@chdtu.edu.ua.
Liudmyla Tarandushka - Professor., Doctor of Engineering, Head of vehicles and technology for their operation Department, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-1410-9088, e-mail: l.tarandushka@chdtu.edu.ua.

Тесля Володимир Олегович– доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7865-4712, e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net.
Volodymyr Teslia – Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7865-4712, e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net.

Ткачук Олег Володимирович – старший дослідник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна, ORSID: https://orcid.org/0000-0002-0599-5364, e-mail: tkachukoleh@gmail.com.

Oleh Tkachuk – Senior research fellow, PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Researcher of Department of material science bases of surface engineering of Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, ORSID: https://orcid.org/0000-0002-0599-5364, e-mail: tkachukoleh@gmail.com.

Трапезон Олександр Георгійович – провідний науковий співробітник, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка Національної академії наук України, м. Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8567-9854, e-mail: coating@ipp.kiev.ua.
Oleksandr Trapezon– Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Strength of Materials and Structure Department in Thermo -Silly Fields and Gas Streams, Institute of Strength Problems GS Pisarenko National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8567-9854, e-mail: coating@ipp.kiev.ua.

Тригуба Анатолій Миколайович – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8014-5661, e-mail: trianamik@gmail.com.
Anatoliy Tryhuba – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information Technologies, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8014-5661, e-mail: trianamik@gmail.com.

Трушаков Дмитро Вікторович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0326-2383, e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com.
Dmytro Trushakov – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0326-2383, e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com.

Федотова Маріанна Олександрівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5827-1685, e-mail: skrynnik_2002@ukr.net.
Marianna Fedotova – PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), Assistant of Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5827-1685, e-mail: skrynnik_2002@ukr.net.

Фількін Орест Ігорович – здобувач вищої освіти на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Ґалузеве машинобудування», Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3994-9623, e-mail: filkin.orest@gmail.com.
Orest Filkin – PhD student in Industrial Mechanical Engineering, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Lviv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3994-9623, e-mail: filkin.orest@gmail.com.

Хорошун Роман Васильович – доктор філософії, доцент кафедри автомобілів, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1862-7640, e-mail: roman_086@ukr.net.
Roman Khoroshun – Associate Professor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Automobile Department, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1862-7640, e-mail: roman_086@ukr.net.

Хачатурян Олена Сергіївна – кандидатка економічних наук, доцентка кафедри економіки, підприємництва та готельно-ресторанної справи, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2893-6914, e-mail: elenarice1210@gmail.com.
Olena Khachaturyan – Senior Lecturer, PhD in econ. sci., Associate Professor of the Department of Economics, Entrepreneurship and Hotel and Restaurant Business, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2893-6914, e-mail: elenarice1210@gmail.com.

Хачатурян Сергій Леонідович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3562-1267, e-mail: serg130354@gmail.com.
Serhiy Khachaturyan – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3562-1267, e-mail: serg130354@gmail.com.

Цимбал Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5237-7814, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net.
Serhii Tsymbal– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5237-7814, e-mail: tsymbal_s_v@ukr.net.

Черемшук Роман Володимирович – здобувач вищої освіти на другому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти за спеціальністю «Прикладна механіка», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1873-8388, e-mail: romacheremshuk22@gmail.com.
Roman Cheremshuk– student in Applied Mechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1873-8388, e-mail: romacheremshuk22@gmail.com.

Чорна Діана Петрівна - здобувач вищої освіти на четвертому (освітньо-науковому) рівні за спеціальність "Транспортні технології " (на автомобільному транспорті), Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: Chornadianacooper@gmail.com.
Diana Chorna - a higher education applicant at the fourth (educational and scientific) level in the specialty "Transport Technologies" (in road transport), Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, e-mail: Chornadianacooper@gmail.com.

Шевчук Оксана – доцент, кандидат технічних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8283-4620, e-mail: oksana_shevchuk84@ukr.net.
Oksana Shevchuk – Associate Professor, PhD in Technics (Candidate of Technics Sciences), West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8283-4620, e-mail: oksana_shevchuk84@ukr.net.

Шепеленко Ігор Віталійович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1251-1687, e-mail: kntucpfzk@gmail.com.
Ihor Shepelenko – Professor, Doctor of Technical Science, Professor Department of Exploitation and Repairing Machines, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, https://orcid.org/0000-0003-1251-1687, e-mail: kntucpfzk@gmail.com.

Шматько Сергій Іванович – інженер кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3048-2308, e-mail: shmatkosi@ukr.net.
Serhii Shmatko – Engineer of Materials Science and Foundry Engineering Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3048-2308, e-mail: shmatkosi@ukr.net.

Щербак Олег Віталійович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет «ХНАДУ», м. Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7953-2135, e-mail: olegcherbak@gmail.com.
Oleh Shcherbak – Associate Professor, PhD in Technical Sciences (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University «KhNADU», Kharkiv, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7953-2135, e-mail: olegcherbak@gmail.com.

Щербина Володимир Костянтинович – аспірант кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0105-3216, e-mail: Shcherbinavk@gmail.com.
Volodymyr Shcherbyna – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0105-3216, e-mail: Shcherbinavk@gmail.com.

Яцун Володимир Васильович – доцент, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4973-3080, e-mail: vvdarienko@gmail.com.
Volodymyr Yatsun – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Construction, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4973-3080, e-mail: vvdarienko@gmail.com.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 14(45)

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

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 29.05.2026р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 59.25
Тираж 300 прим. Зам. № 0943