

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 9(40)  
Частина I**

Кропивницький • 2024

---

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 9(40)  
Part I**

Kropyvnytskyi • 2024

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 25 березня 2024 року № 7.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Лисенко С.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Доренський О.П., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, доц.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Кузик О.В., канд. техн. наук, доц.; Матейчик В.П., д-р техн. наук, проф.; Мацуй А.М., канд. техн. наук, доц.; Мелешко Є.В., д-р техн. наук, проф.; Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А., д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук, проф.; Россолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Тарандушка Л.А., д-р техн. наук, доц.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, доц.; Яцун В.В., канд. техн. наук, доц.

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*

Реєстраційне свідоцтво: серія КВ № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

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

DOI: 10.32515/2664-262X

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 502.131:502.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.3-13](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.3-13)

Ю.М. Пархоменко, доц., канд. техн. наук, О.В. Медведєва, доц., канд. біол. наук,  
Д.В. Богатирьов, доц., канд. техн. наук, В.В. Босько, доц., канд. техн. наук,  
О.А. Кислун, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: [parhomenkoym@ukr.net](mailto:parhomenkoym@ukr.net), [kyslun@gmail.com](mailto:kyslun@gmail.com)

## Використання інформаційних технологій в екології та процесах охорони навколишнього середовища

У статті представлено результати дослідження існуючих програмних продуктів які є найбільш популярними та затребуваними в процесах екології та охорони навколишнього середовища. Подано огляд засобів автоматизованого проектування для сфери екології в Україні. Проведено огляд ринку засобів автоматизованого проектування для сфери екології, наведено їх характеристики. Представлено огляд систем комплексного керування в екології та охороні навколишнього середовища.

**програмне забезпечення, інформаційні технології, геоінформаційні системи, системи комплексного керування, охорона навколишнього середовища**

**Постановка проблеми.** Застосування інформаційних технологій в екології і процесах охорони навколишнього середовища полягає в тому, що природні ресурси нині піддаються значному тиску через індустріалізацію, розширення міських територій та інші людські діяльності. Це призводить до забруднення повітря, води та ґрунту, знищення екосистем, втрати біорізноманіття та інших негативних наслідків для довкілля. Використання інформаційних технологій може бути ключовим інструментом у боротьбі з цими проблемами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В області використання інформаційних технологій в екології та охороні навколишнього середовища підтверджує значний потенціал цих технологій для розв'язання різних екологічних проблем. Багато програмних продуктів які використовуються в сфері екології пов'язані з використанням ГІС (геоінформаційних систем) [1], перший період їх розвитку розпочався в 1950-1970 роках активними топографічними зйомками [2], що подальшому 1980х спонукало прихід державних замовників до створення комерційних продуктів з використанням баз даних. Деякі ключові аспекти, які виокремлюються з цих досліджень, включають:

1. Моніторинг стану довкілля: Застосування сучасних інформаційних технологій: супутникової зйомки; збору параметрів довкілля; датчики реєстрації; накопичення даних спостережень та їх аналіз, дозволяє отримувати уяву, здебільшого виражену в кількісній оцінках, щодо стану забруднення повітря, води та ґрунту, а також що до змін або до їх тенденцій в ландшафтах та біоценозу. Це дозволяє ефективно виявляти проблемні зони та вчасно реагувати на екологічні загрози.

2. Прогнозування екологічних подій: Застосування аналітичних методів та алгоритмів штучного інтелекту дозволяє прогнозувати розвиток екологічних криз, таких як природні лиха, зміни клімату та руйнування екосистем. Це допомагає розробляти стратегії запобігання та мінімізації негативного впливу на середовище.

3. Управління ресурсами та відходами: Інформаційні технології використовуються для оптимізації використання природних ресурсів, а також для ефективного управління відходами та відновлювальних джерел енергії. Це сприяє збереженню ресурсів та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

4. Громадська участь та освіта: Інформаційні технології дозволяють підвищувати свідомість громадськості щодо екологічних проблем, сприяючи поширенню інформації та стимулюючи активну участь громадськості у програмах з охорони навколишнього середовища.

5. Інноваційні рішення: Новітні технології, такі як блокчейн, Інтернет речей (IoT), а також розробки у галузі біоінформатики та нанотехнологій, відкривають нові можливості для розв'язання складних екологічних проблем та забезпечення сталого розвитку.

Загалом, дослідження та публікації свідчать про те, що використання інформаційних технологій може значно покращити управління екологічними процесами та сприяти збереженню навколишнього середовища для майбутніх поколінь.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є огляд, аналіз, класифікація та систематизація сучасного програмного забезпечення сфери екології та охорони навколишнього середовища.

**Викладення основного матеріалу.** Забезпечення збереження довкілля шляхом керування природоохоронними заходами базується на використанні ІТ в сфері екології та охорони навколишнього середовища, а їх ефективне використання вимагає розуміння напрямку застосунку програмних продуктів тобто виникає потреба в системному аналізі наявних розробок. Для оцінки потреби в програмному забезпеченні та інших супутніх послуг, пов'язаних з використанням ІТ суб'єктами екологічної та природоохоронної галузей, дослідимо ситуації на ринку інформаційних продуктів та послуг даних галузей.

Одним з основних ліцензованих та узгоджених Міністерством охорони навколишнього природного середовища України програмних продуктів представлених на ІТ ринку України є ЕОЛ 2000 [3].

#### **Основні напрямки використання програмного продукту ЕОЛ 2000 в Україні:**

1. Оцінка впливу на довкілля (ОВД):
  - Розрахунок розсіювання шкідливих речовин в атмосфері від стаціонарних джерел викидів.
  - Прогнозування забруднення атмосферного повітря.
  - Обґрунтування розмірів санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємств.
  - Оцінка впливу викидів на здоров'я населення та довкілля.
2. Проектування систем очищення газів:
  - Розрахунок необхідної ефективності систем очищення газів.
  - Підбір та проектування газоочисного обладнання.
  - Оцінка економічної ефективності проектів з очищення газів.
3. Контроль за дотриманням природоохоронного законодавства:
  - Перевірка розрахунків оцінки впливу на середовище (ОВС), поданих підприємствами.
  - Інспектування джерел викидів забруднюючих речовин.
  - Нарахування плати за викиди забруднюючих речовин у атмосферний повітря.
4. Наукові дослідження:
  - Вивчення процесів розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері.
  - Моделювання атмосферних процесів.
  - Розробка нових методів розрахунку ОВС.
5. Навчання:

- Підготовка фахівців з екології та охорони навколишнього середовища.
- Проведення курсів підвищення кваліфікації для фахівців природоохоронних органів.

Програмний комплекс ЕОЛ 2000 використовується:

- Міністерством екології та природних ресурсів України.
- Державною екологічною інспекцією України.
- Обласними та районними управліннями екології та природних ресурсів.
- Підприємствами, які здійснюють викиди забруднюючих речовин в атмосферний повітря.

- Науково-дослідними інститутами та навчальними закладами.

Переваги використання програмного комплексу ЕОЛ 2000:

- Достовірність розрахунків: ЕОЛ 2000 базується на перевірених наукових методах розрахунку розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері.
- Універсальність: ЕОЛ 2000 може використовуватись для розрахунку викидів від різних типів джерел, у тому числі від промислових підприємств, ТЕС, автотранспорту.
- Простота використання: ЕОЛ 2000 має зручний інтерфейс користувача, що робить його доступним для фахівців з різним рівнем підготовки.
- Надійність: ЕОЛ 2000 – це перевірений часом програмний продукт, який використовується в Україні протягом багатьох років.

Програмний комплекс ЕОЛ 2000 є цінним інструментом для оцінки впливу на довкілля, проектування систем очищення газів, контролю за дотриманням природоохоронного законодавства, а також для наукових досліджень та навчання.

**Зв'язок програмного продукту ЕОЛ 2000 з геоінформаційними системами (ГІС):**

- ЕОЛ 2000 може бути інтегрований з ГІС для візуалізації результатів розрахунків.
- Це дозволяє наочно надати дані про розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.
- ГІС також можуть використовуватись для створення карт ризиків забруднення атмосферного повітря.

Системи геоінформаційного аналізу: Ці системи використовують географічні інформаційні системи (ГІС) для аналізу та візуалізації екологічних даних. Вони дозволяють виявляти та аналізувати зміни в середовищі та розробляти стратегії збереження навколишнього середовища.

ESRI ArcGIS: ArcGIS від компанії ESRI - один з найпопулярніших і потужних програмних засобів для ГІС. Він має багато інструментів та розширень, спеціально призначених для екологічних досліджень та охорони навколишнього середовища. За допомогою ArcGIS можна виконувати аналіз впливу на довкілля, моніторинг змін середовища, створення карт, моделювання екосистем та ін. [4].

QGIS: QGIS - це безкоштовне та відкрите програмне забезпечення ГІС, яке також має багато можливостей для використання в екологічних проектах. Воно підтримує різні формати даних, має велику кількість плагінів для розширення функціоналу, включаючи ті, які спрямовані на роботу з даними екології, працює на Linux, Unix, Mac OSX, Windows та Android [5].

GRASS GIS: GRASS GIS - це інший безкоштовний та відкритий програмний продукт, який спеціалізується на аналізі земель та даних довкілля. Він має широкий спектр алгоритмів для аналізу та просторового моделювання даних екології, таких як гідрологічний аналіз, аналіз ландшафтів тощо. Він постачається з часовою структурою для розширеної обробки часових рядів і API Python для швидкого геопросторового

програмування. GRASS GIS оптимізовано для продуктивності та аналізу великих геопросторових даних. Зараз GRASS використовується в академічних і комерційних установах по всьому світу, а також багатьма державними установами та екологічними консалтинговими компаніями [6].

ENVI: ENVI — це програмний продукт для візуалізації та обробки даних Зйомки Землі (ERS). Це набір засобів для виконання повного циклу обробки даних: від ортотрансформації та просторової прив'язки зображення до отримання необхідної інформації та її інтеграції з даними в геоінформаційних системах.

Рішення ENVI поєднують технології спектральної обробки та аналізу зображень із інтуїтивно зрозумілим зручним інтерфейсом, який допомагає отримувати інформацію з лідарних зображень, радарів із синтетичною апертурою та мультиспектральних або гіперспектральних зображень [7].

Алгоритми ENVI науково перевірені, прості у використанні та тісно інтегровані з платформою Esri ArcGIS. ENVI можна налаштувати за допомогою мови IDL відповідно до конкретних вимог. Інтуїтивно зрозумілі інструменти та робочі процеси забезпечують глибоке машинне навчання.

Google Earth Engine: це хмарна платформа, яка надає доступ до великих обсягів супутникових зображень та обчислювальних ресурсів для аналізу змін довкілля та екологічних досліджень.

Google Earth Pro: Google Earth Pro надає можливість вивчення глобальної географії та основних функцій ГІС, таких як створення та редагування об'єктів на мапі.

Порівняльний аналіз основних властивостей ГІС представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика ГІС

	ArcGIS	QGIS	GRASS	ENVI	Google Earth Engine	Google Earth Pro
Безкоштовне використання	-	+	+	+/- (пробна версія)	+	+
Англійський / український інтерфейс	+/+	+/+	+/-	+/-	+/*	+/+
Розробники	ESRI	QGIS	GRASS	ITT Visual Information Solutions	Google	Google
Операційні системи	Windows, MacOS, Linux, BSD, Android	Windows, macOS, Linux, Android,	Linux, Windows, MacOS, POSIX	Linux, Windows, MacOS,	Windows, macOS, Linux, Android, iOS	Windows, macOS, Linux, Android, iOS
Основний інструментарій	моделювання, оцінки та аналізу геостатистичних даних; - оцінки динаміки просторових даних в часі; - для роботи з тривимірними даними, моделями рельєфу та іншим;	геостатистика; - гідрологічний аналіз; - морфометричний аналіз; - моделювання пожеж; - робота з тривимірними моделями рельєфу	просторове моделювання, візуалізація растрових та векторних даних; - аналіз та керування геоданими зондування поверхні Землі та аерофотознімків;	перегляд та аналіз векторних зображень; - корекції геометричних та радіометричних спотворень відомих систем; - просторової вшивки зображень	перегляду та аналізу просторових даних; - обробки зображень	візуалізації супутникових знімків імітації польоту віртуальним глобусом шляхом побудови реалістичного 3-D зображення з можливістю замірів відстаней та прокладанням маршрутів

Джерело: розроблено авторами

Бази даних (БД). БД, як організована структура взаємопов'язаної інформації, що призначена для зберігання, зміни й обробки, є невід'ємною технологічною складовою сучасного програмного забезпечення, хоч в контексті застосування більш прийнято користуватися терміном СКДБ (СКДБ - система керування базами даних) під яким розуміють бази даних разом з засобами створення, зберігання та управління. Загалом, класифікують БД за різними критеріями (враховуючи організаційну модель БД розрізняють: ієрархічні, мережеві, реляційні та об'єктно-орієнтовані; враховуючи розміщення даних: розподілені та централізовані але в рамках дослідження скористаємося поділом з позиції їх застосування геоінформаційними системами.

Загалом, ГІС використовують широкий спектр видів та типів баз даних для зберігання та управління геопросторовими даними. Відповідно до застосування за типом даних БД умовно поділяються на векторні та растрові.

Векторні БД зберігають геопросторові об'єкти як точки, лінії та полігони з їх атрибутами. Цей тип бази даних добре підходить для даних з чіткими межами, таких як дороги, будинки та земельні ділянки [8].

До переваг векторних баз даних відносять:

- точність (векторні дані зберігають точні форми та розміри геопросторових об'єктів, що робить їх ідеальними для даних з чіткими межами, таких як дороги, будинки та земельні ділянки);
- масштабованість (векторні дані можна легко масштабувати без втрати якості, що робить їх корисними для великих наборів даних);
- гнучкість (векторні дані можна легко редагувати та оновлювати, що робить їх корисними для динамічних даних);
- аналізуємість (векторні дані добре підходять для складних просторових аналізів, таких як пошук найближчого сусіда, маршрутизація та накладання шарів).

До найпоширеніших застосунків для подання векторних геопросторових даних відносяться:

- Shapefile - простий формат файлу, який часто використовують для обміну геопросторовими даними; Shapefile складається з декількох файлів, які описують геометрію та атрибути об'єктів [9];
- GeoJSON - формат на основі тексту, який використовується для подання геопросторових даних у веб-застосунках; GeoJSON є легким та читабельним для людини, а також його підтримують багато бібліотек та інструментів [10];
- PostGIS - розширення просторових даних для реляційної бази даних PostgreSQL; PostGIS додає до PostgreSQL підтримку геопросторових типів даних та функцій, що робить його потужним та гнучким рішенням для зберігання та управління геопросторовими даними [11];
- Arcpy - модуль Python для роботи з геопросторовими даними в ArcGIS; Arcpy надає широкий спектр функцій для роботи з векторними даними, включаючи створення, редагування, аналіз та візуалізацію [12]

Як приклад застосування векторних баз даних можна навести:

- Кадастр та землеустрій (векторні дані використовуються для зберігання інформації про земельні ділянки, межі власності та інші кадастрові дані);
- Інфраструктура (векторні дані використовуються для зберігання інформації про дороги, мости, труби та інші інфраструктурні об'єкти);
- Управління навколишнім середовищем (векторні дані використовуються для зберігання інформації про ліси, водні ресурси, ґрунти та інші природні ресурси);
- Демографічні дані (векторні дані використовуються для зберігання інформації про населення, такі як межі переписів населення, місця розташування будинків та

соціальні дані).

- Планування та управління містами: (векторні дані використовують для зберігання інформації про зонування, транспорт, комунальні послуги та інші міські дані).

Растрові бази даних є одним із двох основних типів баз даних, що використовують у ГІС для зберігання та управління геопросторовими даними. Вони відрізняються від векторних баз даних тим, що зберігають геопросторові дані як сітку пікселів, де кожному пікселю присвоєно значення, що представляє певну характеристику.

До переваг растрових баз даних відносять:

- простоту у використанні (растрові дані прості у використанні та розумінні, що робить їх популярними для початківців);

- швидкість обробки (растрові дані швидко обробляються та аналізуються, що робить їх корисними для великих наборів даних);

- придатність для даних із плавними переходами (растрові дані добре підходять для даних із плавними переходами, таких як супутникова зйомка та дані про рельєф);

- економність з позиції витрат на зберігання (растрові дані можуть бути компактнішими, ніж векторні дані, для зберігання даних з низькою роздільною здатністю).

До найпоширених застосунків для подання растрових геопросторових даних відносяться:

- TIFF - формат файлу зображення, який часто використовується для зберігання растрових геопросторових даних, TIFF може зберігати дані у різних форматах, включаючи JPEG, MrSID, GeoTIFF, PNG та LZW [13];

- ERDAS Imagine - формат файлу, який використовується для зберігання та обробки растрових геопросторових даних, ERDAS Imagine пропонує широкий спектр функцій для роботи з растровими даними, включаючи калібрування, мозаїку, аналіз та візуалізацію [14];

- GRiD - формат файлу, який використовується для зберігання растрових даних з геокоординатною інформацією, GRiD є простим та легким форматом, який часто використовується для обміну даними [15];

- NetCDF - формат файлу, який використовується для зберігання багатовимірних растрових даних, NetCDF часто використовується для наукових даних, таких як дані про клімат та океан [16].

Прикладом застосування растрових баз даних можна послугоуватись:

- супутникова зйомка (растрові дані використовуються для зберігання супутникових зображень земної поверхні);

- дані про рельєф (растрові дані використовуються для зберігання даних про висоту та рельєф земної поверхні);

- дані про ґрунти (растрові дані використовуються для зберігання інформації про типи ґрунтів та їх характеристики);

- дані про рослинність (растрові дані використовуються для зберігання інформації про типи рослинності та їх покриття);

- метеорологічні дані (растрові дані використовуються для зберігання метеорологічних даних, таких як температура, опади та тиск).

Крім цих типів, існують й інші спеціалізовані бази даних, які можуть використовуватися в ГІС для певних цілей, наприклад, для зберігання тимчасових даних або для виконання складних просторових аналізів.

Порівняльний аналіз застосувань векторної та растрової БД в екології та

процесах охорони навколишнього середовища представлено в таблиці 2.

Системи моніторингу та управління забрудненням: Ці системи включають сенсори, інформаційні технології та аналітичні інструменти для виявлення та моніторингу рівня забруднення повітря, води та ґрунту. Вони дозволяють оперативно реагувати на виникнення забруднень та приймати ефективні заходи для їх зменшення.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика векторної та растрової БД

Характеристика	Векторна БД	Растрова БД
Представлення геопросторових об'єктів	точки, лінії та полігони з атрибутами	сітка пікселів, де кожному пікселю присвоєно значення, що представляє певну характеристику.
Формати даних	DXF, DWG, DGN, DX90, DLG, DWF, F1M, GEN, SHP, TAB, MIF/MID, HPGL, DMF, Shapefile, GeoJSON	PNG, LZW, NetCDF, BMP, TIFF, TIFF-LZW, GEOTIFF, JPEG, JFIF, PCX, GIF, ERDAS IMAGINE, IMG, ER Mapper, ESRI Grid, MrSID
Застосунок	- Кадастр та землевстрій - Інфраструктура, - Управління навколишнім середовищем. - Планування та управління, містами.	- Супутникова зйомка; - Дані про рельєф; - Дані про ґрунти; - Дані про рослинність; - Метеорологічні дані.
Переваги від застосування	- точність; - масштабованість; - гнучкість; - аналізуємість	- простоту в використанні; - швидкість обробки; - придатність для даних із плавними переходами; - економічність з позиції витрат на зберігання

Джерело: розроблено авторами

EcoSys: Це програмний продукт, який надає інструменти для моніторингу, аналізу та звітування про екологічні показники. Він дозволяє організаціям відстежувати викиди шкідливих речовин, спостерігати за рівнем забруднення повітря та води, а також вести контроль над відходами.

Eco Line: Це хмарний сервіс, який дозволяє компаніям вести облік та аналізувати свої викиди, відходи та інші аспекти діяльності, що впливають на навколишнє середовище. Він також надає інструменти для розробки стратегій зменшення негативного впливу.

Enablon: Цей продукт пропонує рішення для управління екологічною діяльністю підприємств, включаючи моніторинг викидів, управління відходами та впровадження стандартів сталого розвитку.

Emex: Ця платформа надає інструменти для автоматизації процесів моніторингу та звітування про екологічні показники. Вона дозволяє відстежувати та аналізувати різноманітні аспекти діяльності, які впливають на довкілля.

EcoIntense: Цей програмний продукт спрямований на забезпечення відповідності екологічним стандартам та нормативам. Він дозволяє ведення моніторингу забруднення та впровадження заходів з його зменшення.

Системи управління відходами: Ці системи допомагають в управлінні відходами на всіх етапах їхнього життєвого циклу, включаючи збір, переробку, використання та утилізацію. Вони можуть використовувати технології інтернет речей (IoT) для відстеження та оптимізації процесів управління відходами.

EcoControl: Цей програмний продукт надає рішення для моніторингу та управління відходами на підприємствах та в організаціях України. Він дозволяє вести облік відходів, контролювати їхній обсяг та впроваджувати заходи щодо їх утилізації та переробки.

**EcoManager:** Цей програмний продукт надає інструменти для автоматизації процесів управління відходами на підприємствах різних галузей в Україні. Він дозволяє вести моніторинг відходів, планувати оптимальні маршрути збирання відходів та виконувати звітність згідно з вимогами законодавства.

**EcoWay:** Цей продукт пропонує рішення для ефективного управління відходами на підприємствах та в організаціях України. Він дозволяє вести контроль над генерацією та обробкою відходів, оптимізувати процеси їхньої утилізації та створювати звіти про відходи для органів контролю.

**EcoTech:** Цей програмний продукт надає рішення для моніторингу та аналізу відходів на підприємствах та в організаціях України. Він дозволяє вести облік відходів, визначати їх склад та кількість, а також розробляти стратегії зменшення та утилізації відходів.

**EcoSolutions:** Цей програмний продукт пропонує інструменти для управління відходами в Україні. Він дозволяє вести моніторинг відходів, планувати їх утилізацію та виконувати звітність про відходи перед відповідними органами.

Ці програмні продукти спрямовані на покращення управління відходами, забезпечуючи компаніям та організаціям ефективні інструменти для моніторингу, аналізу та контролю за їхнім обсягом та утилізацією.

**Системи управління водними ресурсами:** Ці системи спрямовані на забезпечення ефективного використання та охорони водних ресурсів. Вони можуть включати в себе моніторинг якості води, прогнозування водних ресурсів та управління водними системами.

**SCADA системи:**

- **WaterCAD:** Ця система використовується для моделювання та аналізу гідравлічних мереж водопостачання та водовідведення. Вона надає можливість оптимізувати використання води, виявити витоки та покращити загальну ефективність вашої системи.

- **InfoWorks WS:** Це ще одна популярна система SCADA для управління водними ресурсами. Її можливості подібні до WaterCAD, але вона також пропонує деякі додаткові функції, такі як моделювання якості води та планування повеней

**Програмне забезпечення для моніторингу:**

- **ArcGIS Water Resources:** Ця платформа GIS пропонує широкий спектр інструментів для моніторингу та аналізу водних ресурсів. Наявна можливість для відстеження рівнів води, стоку, якості води та інших важливих параметрів.

- **HydroNET:** Це програмне забезпечення спеціально розроблено для моніторингу гідрологічних мереж. Воно може збирати дані з датчиків, таких як рівнеміри та витратоміри, а також візуалізувати ці дані на картах та графіках.

**Програмне забезпечення для управління попитом на воду:**

- **Smart Irrigation Manager:** Ця система допомагає фермерам оптимізувати використання зрошувальної води. Вона використовує датчики та прогнози погоди, щоб визначити, коли та скільки води потрібно рослинам.

- **WaterSmart:** Це програмне забезпечення допомагає домовласникам та підприємствам скоротити споживання води. Воно надає інформацію про використання води та поради щодо її економії.

**Інші програмні продукти:**

- **WATERSHED:** Ця модель використовується для моделювання гідрологічних процесів у водозборах. Її можна використовувати для прогнозування стоку, повеней та інших подій, пов'язаних з водою.

- SWAT: Soil and Water Assessment Tool - це ще одна модель, яка використовується для моделювання гідрологічних процесів у водозборах. Її можна використовувати для оцінки впливу землеволодіння та інших факторів на якість води.

Системи енергетичного управління: Ці системи допомагають в оптимізації використання енергії та зменшенні викидів шкідливих речовин шляхом впровадження енергоефективних технологій, моніторингу енергоспоживання та управління системами енергопостачання.

Enbala Power Analytics: Ця платформа хмарних обчислень допомагає підприємствам відстежувати та аналізувати їхнє енергоспоживання. Може допомогти підприємствам виявити можливості економії енергії та скоротити витрати. Вона використовується різними організаціями, включаючи виробничі підприємства, будівлі та комунальні підприємства.

Siemens Energy Manager: Ця система СЕМ пропонує широкий спектр функцій для моніторингу та управління енергоспоживанням. Може допомогти підприємствам оптимізувати їхнє енергоспоживання, зменшити викиди парникових газів та відповідати нормативним вимогам. Вона використовується промисловими підприємствами, комерційними будівлями та державними установами.

Johnson Controls Metasys: Ця платформа управління будівлями (BMS) включає модуль енергоменеджменту. Може допомогти власникам будівель відстежувати та контролювати їхнє енергоспоживання, а також оптимізувати роботу систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВКВ). Вона використовується в комерційних, житлових та промислових будівлях.

Schneider Electric EcoStruxure Power SCADA: Ця система SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) використовується для моніторингу та управління розподільними мережами електроенергії. Може допомогти комунальним підприємствам покращити надійність електропостачання, підвищити енергоефективність та скоротити витрати. Вона використовується комунальними підприємствами, промисловими підприємствами та комерційними будівлями.

Eaton Powerware Energy Manager: Ця система СЕМ розроблена спеціально для центрів обробки даних. Може допомогти власникам центрів обробки даних відстежувати та контролювати їхнє енергоспоживання, а також оптимізувати роботу систем охолодження та резервного живлення. Вона використовується центрами обробки даних, комерційними будівлями та промисловими підприємствами.

**Висновки.** В результаті аналізу наявних інформаційних технологій, що використовуються в екології та процесах охорони навколишнього середовища на даному рівні розвитку в державі можна виділити наступні напрямки застосування: автоматизація моніторингу стану довкілля його середовищ; імітаційне комп'ютерне моделювання та прогнозування стану довкілля; управління ресурсами та відходами; інформаційно-комунікаційні технології підтримки екологічної політики в суспільстві. Технології, що використовуються, можна поділити на: спеціалізовані технічні системи, що являють собою обладнання та його програмне забезпечення: безпосередньо програмне забезпечення направлене на вирішення конкретних розрахункових завдань пов'язаних з обробкою (перетворенням) інформації, програмним продуктом направленим на забезпечення діяльності організацій та установ: комунікаційні технології - загалом у всіх випадках передбачається використання обладнання загального призначення: комп'ютерів, мереж та спеціалізованого обладнання. Окремо виділимо ГІС з базами даних, як забезпечуючу складову всіх розглянутих технологій, яка на даний момент технічного розвитку вже починає конструктивно інтегруватися в саме технологічне обладнання в його структуру безпосередньо в якості підсистем або частково навіть до його елементної бази.

## Список літератури

1. Донченко М. В., Коваленко І. І. Геоінформаційні системи: навч. посіб. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 132 с.
2. Що таке геоінформаційні системи? : веб-сайт. URL: [https://www.wikidata.uk-ua.nina.az/Геоінформаційна\\_система.html](https://www.wikidata.uk-ua.nina.az/Геоінформаційна_система.html) (дата звернення 26.03.2024).
3. ЕОЛ? : веб-сайт. URL: <http://sfund.kyiv.ua/ukr/products/ecology.htm> (дата звернення 28.03.2024).
4. Можливості ArcGIS : веб-сайт. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (дата звернення 29.03.2024).
5. Знайомство з QGIS : веб-сайт. URL: <https://qgis.org/uk/site/about/index.html> (дата звернення 30.03.2024).
6. Знайомство з GrassGIS : веб-сайт. URL: <https://grass.osgeo.org/> (дата звернення 30.03.2024).
7. ENVI можливості : веб-сайт. URL: [https://esri.ua/article.php?name=envi\\_capab](https://esri.ua/article.php?name=envi_capab) (дата звернення 01.04.2024)
8. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / Зацерковний В. І. та ін. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. 492 с.
9. Що таке шейп-файл: веб-сайт. URL: <https://products.aspose.com/gis/uk/net/gis-formats/shapefile/> (дата звернення 02.04.2024).
10. Додавання та перегляд GeoJSON у QGIS та ArcGIS: веб-сайт. URL: <https://opengislab.com/blog/2018/11/8/adding-and-viewing-geojson-in-qgis-and-arcgis> (дата звернення 02.04.2024).
11. POST GIS для новачків: веб-сайт. URL: <https://www.crunchydata.com/blog/postgis-for-newbies> (дата звернення 03.04.2024).
12. Взаємодія даних ArcGIS: веб-сайт. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-data-interoperability/overview> (дата звернення 03.04.2024).
13. Растрові формати в ГІС: веб-сайт. URL: <https://www.igismap.com/raster-data-file-format> (дата звернення 04.04.2024).
14. Stacy A.C. Nelson, Siamak Khorram. Image Processing and Data Analysis with ERDAS IMAGINE. Published by CRC Press. 2018. 350 p. URL:<https://www.routledge.com/Image-Processing-and-Data-Analysis-with-ERDAS-IMAGINEr/ACNelson-Khorram/p/book/9781138034983> (дата звернення 05.04.2024).
15. Просторовий аналіз ГІС: веб-сайт. URL: <https://eos.com/uk/blog/prostorovyi-analiz/> (дата звернення 05.04.2024).
16. Багатовимірні дані: веб-сайт. URL: <https://www.igismap.com/multidimensional-data/> (дата звернення 05.04.2024).

## References

1. Donchenko, M. V. & Kovalenko, I. I. (2021). *Heoinformatsijni systemy [Geoinformation systems]*. Mykolaiv: Vyd-vo ChNU im. Petra Mohyly [in Ukrainian].
2. Scho take heoinformatsijni systemy? veb-sajt [What are geographic information systems? website]. Retrieved from: [https://www.wikidata.uk-ua.nina.az/Геоінформаційна\\_система.html](https://www.wikidata.uk-ua.nina.az/Геоінформаційна_система.html) [in Ukrainian].
3. EOL: veb-sajt [EOL: website]. Retrieved from: <http://sfund.kyiv.ua/ukr/products/ecology.htm> [in Ukrainian].
4. Mozhlyvosti ArcGIS : veb-sajt [Opportunities: website]. Retrieved from: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> [in Ukrainian].
5. Znajomstvo z QGIS : veb-sajt [Acquaintance with QGIS: website]. Retrieved from: <https://qgis.org/uk/site/about/index.html> [in Ukrainian].
6. Znajomstvo z GrassGIS : veb-sajt [Acquaintance with GrassGIS: website]. Retrieved from: <https://grass.osgeo.org/> [in English].
7. ENVI mozhlyvosti : veb-sajt [ENVI opportunities: website]. Retrieved from: [https://esri.ua/article.php?name=envi\\_capab](https://esri.ua/article.php?name=envi_capab) [in Ukrainian].
8. Zatserkovnyj, V. I. et al. (2014). *Heoinformatsijni systemy i bazy danykh [Geoinformation systems and databases]*. Nizhyn : NDU im. M. Hoholia
9. Scho take shejp-fajl: veb-sajt [What is a shapefile: website]. Retrieved from: <https://products.aspose.com/gis/uk/net/gis-formats/shapefile/> [in Ukrainian].
10. Dodavannia ta perehliad GeoJSON u QGIS ta ArcGIS: veb-sajt [Additions and revisions of GeoJSON in QGIS and ArcGIS: website ]. Retrieved from: <https://opengislab.com/blog/2018/11/8/adding-and-viewing-geojson-in-qgis-and-arcgis> [in English].
11. POST GIS dlia novachkiv: veb-sajt [POST GIS for beginners: website]. Retrieved from: <https://www.crunchydata.com/blog/postgis-for-newbies> [in English].

12. Vzaiemodiia danykh ArcGIS: veb-sajt [ArcGIS data interaction: website]. Retrieved from: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-data-interoperability/overview> [in English].
13. Rastrovi formaty v HIS: veb-sajt [Raster formats in GIS: website]. Retrieved from: <https://www.igismap.com/raster-data-file-format> [in Ukrainian].
14. Stacy A.C. Nelson & Siamak, Khorram (2018). Image Processing and Data Analysis with ERDAS IMAGINE. Published by CRC Press. 2018. 350 p. Retrieved from: <https://www.routledge.com/Image-Processing-and-Data-Analysis-with-ERDAS-IMAGINEr/ACNelson-Khorram/p/book/9781138034983> [in English]
15. Prostorovyj analiz HIS: veb-sajt [Spatial analysis of GIS: website]. Retrieved from: <https://eos.com/uk/blog/prostorovyj-analiz/> [in Ukrainian].
16. Bahatovymirni dani: veb-sajt [Multidimensional data: website]. Retrieved from: <https://www.igismap.com/multidimensional-data/> [in Ukrainian].

**Yuriy Parhomenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olga Medvedeva** Assoc. Prof., PhD biol. sci., **Viktor Bosko** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmitriy Bogatryov** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Kyslun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Using of information technologies in ecology and processes of environmental protection**

The article presents the results of a study of existing software products that are the most popular and in demand in the processes of ecology and environmental protection. An overview of automated design tools for the field of ecology in Ukraine is given. An overview of the market of automated design tools for the field of ecology was conducted, and their characteristics were given. An overview of integrated management systems in ecology and environmental protection is presented.

The application of information technologies in the processes of ecology and environmental protection is that natural resources are now under significant pressure due to industrialization, expansion of urban areas and other human activities. This leads to pollution of air, water and soil, destruction of ecosystems, loss of biodiversity and other negative consequences for the environment. The use of information technology can be a key tool in combating these problems.

In the field of the use of information technologies in ecology and environmental protection, the significant potential of these technologies for solving various environmental problems is confirmed. Many software products used in the field of ecology are associated with the use of GIS (geographic information systems) [1], the first period of their development began in the 1950s and 1970s with active topographic surveys [2], which in the later 1980s prompted the arrival of government customers to create commercial products using databases.

Some key aspects that stand out from these studies include:

1. Monitoring of the state of the environment: Application of modern information technologies: satellite imaging; collection of environmental parameters; registration sensors; the accumulation of observation data and their analysis allows to get an idea, mostly expressed in quantitative estimates, about the state of air, water and soil pollution, as well as about changes or their trends in landscapes and biocenosis. This allows you to effectively identify problem areas and respond to environmental threats in a timely manner.

2. Forecasting environmental events: The use of analytical methods and algorithms of artificial intelligence makes it possible to predict the development of environmental crises, such as natural disasters, climate change, and the destruction of ecosystems. It helps to develop strategies to prevent and minimize negative impact on the environment.

3. Resource and waste management: Information technology is used to optimize the use of natural resources, as well as for efficient waste management and renewable energy sources. This helps to conserve resources and reduce the negative impact on the environment.

4. Public participation and education: Information technologies allow raising public awareness of environmental problems, facilitating the dissemination of information and stimulating active public participation in environmental protection programs.

5. Innovative solutions: The latest technologies, such as blockchain, the Internet of Things (IoT), as well as developments in the field of bioinformatics and nanotechnology, open up new opportunities for solving complex environmental problems and ensuring sustainable development.

**software, information technologies, geoinformation systems, integrated control systems, environmental protection**

*Одержано (Received) 26.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 13.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

**КІБЕРБЕЗПЕКА**

УДК 004.9

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.14-26](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.14-26)**О.С. Улічев**, канд. техн. наук, **К.О. Задорожний**, студ.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,**Україна**e-mail: askin79@gmail.com, kostazadoroznij9@gmail.com*

## Стандартизація еліптичних кривих: аналіз та впровадження в криптографічні протоколи

Використання еліптичних кривих у криптографії вважається одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасних алгоритмів безпеки. Цей математичний підхід базується на складності вирішення задачі дискретного логарифмування у групі точок еліптичної кривої над скінченним полем. Застосування криптографії на еліптичних кривих дозволяє забезпечити безпеку обміну даними, використовуючи ефективні алгоритми шифрування та створення цифрових підписів (ЦП). У цьому дослідженні розглядаються еліптичні криві для криптографічних цілей, а також наводяться основні операції у групі точок еліптичних кривих. Особлива увага приділяється алгоритмам обміну ключами Elliptic Curve Diffie-Hellman (ECDH) та Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). Також аналізуються стандарти, що регламентують використання еліптичних кривих у криптографічних системах, та розглядаються переваги цієї криптографічної парадигми порівняно з основними асиметричними алгоритмами. Досліджуються потенційні загрози та вразливості криптографічних алгоритмів на основі еліптичних кривих. Також наводяться приклади популярних стандартизованих кривих, рекомендованих відповідними організаціями, такими як NIST, що використовуються в реальних криптографічних застосуваннях.

**криптографія на еліптичних кривих; асиметричні криптосистеми; цифровий підпис на еліптичних кривих; ECC (Elliptic Curve Cryptography, еліптична криптографія); ECDH; ECDSA; RFC**

**Постановка проблеми.** У сучасному цифровому світі, де інформація відіграє ключову роль, безпека даних стає необхідністю. З розвитком інформаційних технологій та збільшенням обсягу цифрових даних, виникають нові виклики у забезпеченні конфіденційності, цілісності та доступності інформації. Це створює потребу у надійних методах захисту, серед яких одним з найбільш перспективних є криптографія на еліптичних кривих. Додатковим викликом класичним криптографічним алгоритмам стає розвиток квантових обчислень та квантових комп'ютерів. Застосування останніх ставлять під загрозу використання класичних асиметричних алгоритмів шифрування. Ситуація вимагає застосування інших підходів, зокрема шифрування, що базується на еліптичних кривих, а відтак - ґрунтовного дослідження алгоритмів шифрування на еліптичних кривих, їх оцінки та інтеграції даних алгоритмів в безпекові стандарти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ідею використання еліптичних кривих започаткували та внесли суттєвий внесок в дослідження питання ряд закордонних вчених, зокрема дослідженню питання присвячено роботи N.Koblitz[3,10], V.Miller[11], N. Saho, E. Ezin[18], I. Blake, N. Smart, G. Seroussi [4], та інші. Серед вітчизняних авторів, що досліджують різні аспекти й особливості застосування еліптичних кривих в захисті інформації та криптографічні методи, засновані на перетвореннях в групах точок еліптичних кривих, можна виділити наступних науковців Горбенко Ю., Горбенко І., Циганкова О., Щур, Н., Покотило, О., Байлюк, Є. Автори Горбенко Ю., Горбенко І.,

в своїй монографії [2], широко розглядають питання криптографії та цифрового підпису, зокрема приділяють увагу й використанню еліптичних кривих в цьому напрямку. Щур, Н. з співавторами в статті [27] зосереджують увагу на практичному застосуванні еліптичних кривих. Циганкова О., в статті [26], приділяє увагу дослідженню властивостей окремої групи кривих - еліптичних кривих у формі Едвардса. Сьогодні еліптична криптографія імплементована в ряд вітчизняних та закордонних стандартів, що стосуються криптографії та захисту інформації.

**Постановка завдання.** У цьому дослідженні ми розглянемо процес стандартизації еліптичних кривих, проведемо аналіз їх застосування в криптографічних протоколах та розглянемо можливості їх впровадження. Метою дослідження є виявлення переваг ЕСС у порівнянні з іншими криптографічними методами та розгляд потенційних викликів і вразливості цієї технології. Результати цього дослідження сприятимуть кращому розумінню принципів функціонування ЕСС та розробці ефективних криптографічних заходів для захисту цифрової інформації.

#### Виклад основного матеріалу.

**Основні властивості ЕСС.** Еліптична криптографія - це метод шифрування з відкритим ключем, що базується на теорії еліптичних кривих, він дозволяє створювати швидкі, компактні та ефективні криптографічні ключі. Одним з основних застосувань еліптичних кривих у криптографічних схемах є системи з відкритим ключем та ЦП.

Еліптичні криві [1] – це алгебраїчні криві, які описуються рівнянням третьої степені з двома змінними. Її можна описати за допомогою рівняння Вейерштраса (1) :

$$y^2 + a_1xy + a_3y = x^3 + a_2x^2 + a_4x + a_6, \quad (1)$$

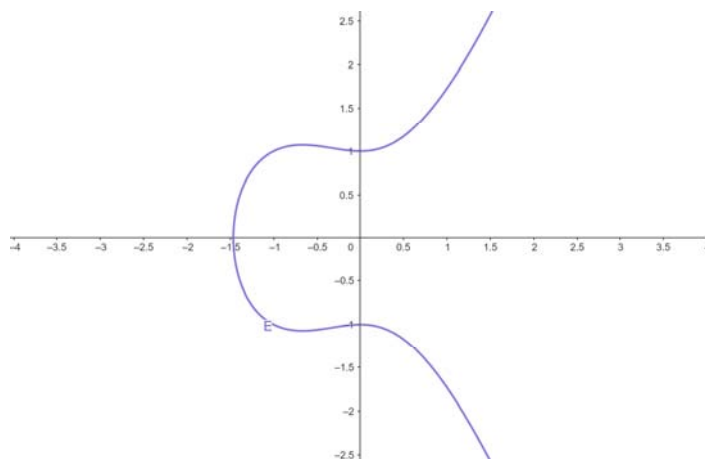
де  $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \in K, \Delta \neq 0$ .

Це рівняння має широке застосування, адже воно може використовуватися над будь-якими полями, включаючи скінченні. Цей факт робить еліптичні криві особливо цікавими для криптографії [1]. У галузі криптографії активно застосовуються еліптичні криві, визначені над двома типами кінцевих полів: полями характеристики  $2(GF(2^m))$  і простими полями непарних характеристик.

$$\begin{aligned} \Delta &= -d_2^3 + d_2 - 8d_4^3 - 27d_6^3 + 9d_1d_4d_6; \\ d_2 &= a_1^2 + 4a_2; \\ d_4 &= 2a_4 + a_1a_3; \\ d_6 &= a_3^2 + 4a_6; \\ d_8 &= a_1^2a_6 + 4a_2a_6 - a_1a_3a_4 + a_2a_3^2 - a_4^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Якщо скінченне поле  $K$  є простим -  $GF(p)$ , то крива  $E$  змінюється на криву, яка характеризується наступним рівнянням:

$$y^2 = x^3 + ax^2 + b. \quad (3)$$

Рисунок 1 – Ілюстрація еліптичної кривої  $y^2 = x^3 + 1x^2 + 1$ 

Джерело: [27]

У випадку, коли  $K = GF(2^m)$ , крива  $E$  перетворюється на криву, яка описується рівнянням:

$$y^2 + xy = x^3 + ax^2 + b, \quad (4)$$

де  $a, b \in K$ .

Далі розглянемо операції з точками на еліптичній кривій.

Припустимо, що крива  $E$  – еліптична крива, яка визначена над полем  $K$ , а  $P$  і  $Q$  – точками на цій кривій. Сума точок  $P$  та  $Q$  графічно визначається наступним способом [1].

1. Через точки  $P$  та  $Q$  провести пряму.
2. Показати, як виглядає перетин заданої прямої з еліптичною кривою у відношенні до осі  $OY$ .

Графічно подвоєння точки  $P$  визначається таким способом:

1. Провести дотичну до еліптичної кривої в точці  $P$ .
2. Подвоєною точкою  $P$  називається перетин заданої дотичної, який симетрично відображений відносно осі  $OY$ .

**Вимоги до ЕСС.** Для захисту від відомих атак, що базуються на проблемі дискретного логарифма у групі точок ЕК, важливо, щоб кількість точок ЕК була достатньою і ділилась на просте число  $n$ . Згідно зі стандартом ANSI X9.62, це число повинно перевищувати  $2^{160}$ . Рівняння ЕК формується за допомогою специфічного методу, що використовує випадкові або псевдовипадкові коефіцієнти.

Ключовими параметрами під час будівництва еліптичних кривих над полем  $GF(p)$  є:

1. Розмірність поля  $p$ , де  $p$  є простим числом.
2. Два елементи скінченного поля –  $a$  та  $b$  визначаються рівнянням еліптичної кривої  $E$ , яке має такий вигляд:

$$y^2 = x^3 + ax^2 + b, \quad (5)$$

де  $a, b \in GF(p)$ , та  $4a^3 + 27b^2 \neq 0 \pmod{p}$ .

3. Два елементи поля  $GF(p)$  –  $x_G$  та  $y_G$ , які визначають кінцеву точку  $G = (x_G, y_G)$  – генератор групи.
4. Порядок  $q$  точки  $G$ , де  $160q > 2^{160}$  та  $q > 4\sqrt{p}$ .
5. Співмножник  $h = \#E/q$ , де  $\#E$  означає порядок групи точок ЕК.

**Генерація основних параметрів.** Один з методів створення криптографічно надійних параметрів полягає в наступному:

1. Коефіцієнти  $a$  та  $b$  вибираються специфічним чином за допомогою використання в обчисленнях випадкових або псевдовипадкових чисел. Припустимо  $E$  – еліптична крива  $y^2 = x^3 + ax + b$  [3].
2. Підраховуємо  $N = \#E$ .
3. Робимо перевірку, що  $N$  має дільник, який являється великим простим числом  $q (q > 2^{160}, q > 4\sqrt{p})$ . В іншому випадку необхідно перейти на крок 1.
4. Перевіряємо, щоб  $q$  не ділився на  $p^k - 1$  для кожного  $k, k, 1 \leq 100$ . Якщо твердження хибне то, то необхідно повернутись на крок 1.
5. Перевірити, чи  $q$  не дорівнює  $p$ . У випадку невідповідності цій умові, необхідно повернутись до кроку 1.
6. Вибрати випадкову точку  $G' \in E$  і покласти  $G = (N/q)G'$ . Повторювати цей процес, доки  $G \neq O$ .

**Методи шифрування в ЕСС.** Одними із популярних сфер використання еліптичної криптографії, в яких криптостійкість ґрунтується на ECDLP або задачі дискретного логарифмування для еліптичних кривих, є шифрування з відкритим ключем та алгоритм електронно-цифрового підпису.

Розглянемо принципи роботи еліптичного варіанту протоколу обміну ключами Діффі-Хеллмана. Протокол Діффі-Хеллмана є методом обміну криптографічними ключами, який дозволяє двом учасникам, що не мають попередньої інформації один про одного, отримати загальний секретний ключ. Цей ключ використовується для шифрування даних, що обмінюються сторонами через незахищений канал зв'язку. Отриманий ключ може бути використаний для шифрування подальших сеансів зв'язку, що використовують шифр з симетричним ключем [4, с. 8].

Припустимо, що існує еліптична крива, яка забезпечує високий рівень криптостійкості (несуперсингулярну, в якій генеруюча точка  $G = (x; y)$  має великий порядок, тобто число  $n$ , при якому  $nG = O$  є дуже великим простим числом), визначена параметрами  $a$  та  $b$ :

$$y^2 = x^3 + ax + b$$

Позначимо персону відправника та сторону отримувача як  $A$  та  $B$  відповідно, тоді обмін ключами між сторонами  $A$  та  $B$  проводиться наступним чином:

1. Учасник  $A$  обирає ціле число, яке має бути менше за  $n$ ,  $PrivateKey_A < n$ . Це число є приватним ключем, а точка еліптичної кривої  $PublicKey_A = PrivateKey_A \times G$  називається публічним ключем.
2. Сторона  $B$  обирає так само секретний ключ  $PrivateKey_B$  та обчислює відкритий ключ  $PublicKey_B = PrivateKey_B \times G$ .
3. Учасник  $A$  генерує секретний ключ  $K_A = k_A \times P_B$ , а учасник  $B$  генерує секретний ключ  $K_B = k_B \times P_A$ .

Формули, що отримані в п.3 дають один й той самий результат, оскільки:

$$k_A \times P_B = k_A \times (k_B \times G) = k_B \times (k_A \times G) = k_B \times P_A$$

Отже тримані секретні ключі  $K_A$  та  $K_B$  еквівалентні, тому їх можна використовувати для подальшого шифрування повідомлень із використанням симетричного алгоритму.

Далі розглянемо ECDSA – це один із варіантів алгоритму ЦП (DSA), який використовує еліптичні криві [4, с. 4]. Цифровий підпис повідомлення - це блок даних

невеликого розміру, отриманий внаслідок криптографічного перетворення повідомлення за допомогою особистого (закритого) ключа відправника. Невід'ємною частиною цифрового підпису є хеш-функція  $H$ , яка призначена для того, щоб стиснути повідомлення  $M$  довільної довжини до фіксованого бінарного хеш-значення  $h(M)$ .

Аналогічно до ECDH, обидві сторони спочатку мають узгодити параметри еліптичної кривої  $a$  та  $b$ , базову точку  $G = (x, y)$ , просте число  $p$ , та  $n$  (просте число), таке що  $nG = O$ . Якщо розмір  $n$  в бітах менше розміру в бітах хеш-значення повідомлення  $h(M)$ , то використовуються тільки ліві біти хеш-значення –  $z$ .

Вираховується закритий ключ  $d$  – це випадкове ціле число, таке що  $0 < d \leq n - 1$ . Вираховується відкритий ключ  $Q = dG$ . Для створення підпису використовується приватний ключ, а для його перевірки – публічний. Процес підписування повідомлення складається з таких етапів:

1. Обирається випадковим чином ціле число  $k$  – одноразовий секретний ключ, де  $0 < k \leq n - 1$ .
2. Обчислюється  $(x_1, y_1) = kG$ .
3. Обчислюється  $r = x_1 \bmod n$ . Якщо  $r = 0$ , то переходимо до п. 1.
4. Обчислюється  $s = k^{-1}(z + dr) \bmod n$ . Якщо  $s = 0$ , то переходимо до п. 1.
5. Підписом для повідомлення  $M$  є пара  $(r, s)$ .

Для перевірки підпису одержувач, отримавши пару  $(r, s)$  та підтвержене значення відкритого ключа  $Q$ , виконує наступні дії:

1. Обчислюється  $w = s^{-1} \bmod n$ .
2. Обчислюється  $u_1 = z \cdot w \bmod n$  та  $u_2 = r \cdot w \bmod n$ .
3. Обчислюється  $(x_1, y_1) = u_1G + u_2Q$ .
4. Якщо  $(x_1, y_1) = O$  – цифровий підпис не є дійсним.
5. Якщо  $r \equiv x_1 \bmod n$  – цифровий підпис є дійсним.

Окрім форми Вейерштрасса (що є винятком), еліптичні криві можуть бути виражені і в іншій формі. Наприклад, в формі Монтгомері рівняння еліптичної кривої має такий вигляд:

$$by^2 = x^3 + ax^2 + x, \quad (6)$$

де  $a \neq \pm 2$  і  $b \neq 0$ .

З міркувань ефективності ECC часто застосовує криві Едвардса, які являють собою еліптичні криві у формі:

$$x^2 + ay^2 = 1 + dx^2y^2, \quad (7)$$

де  $d \neq 1$  і  $a \neq d$ .

Всі три форми еліптичних кривих – Едвардса, Вейерштрасса та Монтгомері – біраціонально еквівалентні, що робить їх використання ефективним без втрати інформації про криву.

**Переваги над мультиплікативною групою лишків за модулем  $p$ , де  $p$  - просте число.** Незважаючи на існування таких криптосистем, як Діффі-Хеллман, Ель-Гамаль, RSA і багато інших, виникла потреба використання нового криптографічного примітиву.

З моменту виникнення раніше згаданих криптосистем (Діффі-Хеллман – 1976[5], RSA - 1978, Ель-Гамаль – 1985[7]) обчислювальні можливості виявилися значно покращеними. Частота процесорів зростала з кілогерців до гігагерців, кількість ядер збільшилась від одиниць до сотень, і з'явилися зручні інструменти для об'єднання процесорів у кластери. З іншого боку, через бажання зламати ці криптосистеми, багато дослідників шукали способи знайти більш ефективні алгоритми для розв'язання

проблем, на яких вони ґрунтуються. У 1993 році Ленстра [8] пропонує ефективний алгоритм розкладання великих чисел на множники - GNFS(General Number Field Sieve), який здатний розкласти число  $n > 10^{100}$  за час:

$$\exp\left(\left(\frac{64}{9}\right)^{\frac{1}{3}} + o(1)\right) (\log n)^{\frac{2}{3}} (\log \log n)^{\frac{2}{3}}. \quad (8)$$

Це стало головною проблемою криптосистем, що базуються на мультиплікативних групах лишків по модулю  $p$ , далі -  $\mathbb{Z} * p$ . Це зводить обчислювальну складність задач, які лежать в основі цих криптосистем, до суб'експоненційних, а не експоненційних. Важливо зауважити, що цей алгоритм(запропонований Ленстра) не лише теоретична загроза. Наприклад, у 2019 році[9] використовуючи цей алгоритм, було знайдено дискретний логарифм 795-бітного числа. У зв'язку з цим, рекомендований розмір ключів в оригінальному патенті RSA [6] складав 200 біт, у першій сертифікації від NIST - 512 біт, а наразі мінімальний рекомендований розмір становить 2048 біт. Також слід відзначити, що GNFS не можна застосувати до будь-яких скінчених циклічних груп, через це він не впливає на групу точок еліптичної кривої над скінченими полями. Через це найкращий відомий алгоритм для вирішення проблеми дискретного логарифма для групи точок еліптичних кривих (ECDLP) вимагає часу  $O(\sqrt{q})$ , де  $q$  - розмір групи. Тому розміри ключів, які забезпечують однаковий рівень безпеки для  $\mathbb{Z} * p$  і для групи точок еліптичної кривої сильно відрізняються. Нижче приведена порівняльна характеристика безпеки ключа залежно від їхнього розміру для RSA/Diffie-Hellman і ECC:

Таблиця 1 – NIST рекомендовані розміри ключів

Розмір ключа RSA та Діффі-Хеллмана (біти)	Розмір ключа для еліптичних кривих (біти)	Симетричний розмір ключа (біти)
1024	160	80
2048	224	112
3072	256	128
7680	384	192
15360	521	256

Джерело: [18]

Як видно з вище наведеної таблиці, використання еліптичних кривих має значні переваги, оскільки ключі мають невелику довжину, що призводить до швидких обчислень на еліптичних кривих. Це сприяє високій швидкодії обробки даних та підвищує продуктивність систем, особливо у ситуаціях, коли потрібно провести велику кількість криптографічних операцій. Особливо це видно у сфері серверних технологій, де використання еліптичних кривих сприяє прискоренню TLS-рукописання, що призводить до швидкого завантаження веб-сторінок та підвищення рівня безпеки. Важливо також зазначити, що менша довжина ключа призводить до того, що пристрої вимагають менше обчислювальних ресурсів для виконання криптографічних операцій, що робить ECC гарним рішенням для мобільних пристроїв, систем IoT та інших пристроїв з обмеженою обчислювальною потужністю.

Ще однією перевагою криптографії на еліптичних кривих (ECC) є можливість використання багатьох розробок з криптографії з відкритим текстом, що працює з групою за модулем  $\mathbb{Z} * p$ . Це пояснюється тим, що ECC використовує складну обчислювальну проблему, пов'язану із знаходженням дискретного логарифма (DLP). Для еліптичних кривих ця проблема відома як ECDLP і є аналогічною складній обчислювальній задачі у Діффі-Хеллмана і Ель-Гамала. Крім того, еліптичні криві мають додаткову структуру, яку не має мультиплікативна група за модулем  $\mathbb{Z} * p$ , що

дозволяє створювати криптосистеми, неможливі для  $\mathbb{Z} * \mathbb{F}$ . Такою додатковою структурою є можливість будувати спарювання точок еліптичних кривих, алгебраїчні решітки та ізогенії. Алгебраїчні решітки та ізогенії еліптичних кривих активно використовуються для розробки пост-квантових криптосистем з відкритим ключем.

**Стандартизація еліптичних кривих у криптографії.** Ідея використовувати еліптичні криві для криптографії з'явилась у 1985 році. Незалежно один від одного її запропонували два вчених: Ніл Кобліц та Віктор Міллер. Кобліц висунув теорію, що криптосистеми на основі еліптичних кривих (ECC) будуть стійкішими, ніж традиційними асиметричними алгоритмами. Це пов'язано із тим, що задача дискретного логарифмування в групі точок еліптичної кривої є складнішою для розв'язання, ніж стандартна задача дискретного логарифмування [10]. Міллер дослідив математичні властивості еліптичних кривих і зрозумів, що їх можна використовувати в протоколі обміну ключами Діффі-Хеллмана [5,11].

Хоча еліптична криптографія (ECC) існувала вже з 1980-х років, вона не знаходила широкого практичного застосування до початку 2000-х років. З того часу ECC стала революційною технологією в галузі криптографії. На даний момент використання еліптичних кривих для вирішення криптографічних задач визнано і закріплено в різних міжнародних та американських стандартах, у тому числі:

- ANSI X9.62 та ANSI X9.63 – були створені 1999 та 2001 року American National Standards Institute (ANSI) та комітетом X9. Ці стандарти описують алгоритми криптографії на основі еліптичних кривих (ECC) і описують протоколи ECDSA в ANSI X9.62 та ECIES, ECDH і ECMQV в ANSI X9.63. Ці стандарти визначають формати повідомлень, рекомендовані криві та методи підпису та обміну ключами на еліптичних кривих. Вони широко використовуються у фінансовій секторі для захисту фінансових операцій, включаючи підтвердження платіжних транзакцій [12], [13].

- IEEE 1363. Він включає в себе практично всі алгоритми з публічним ключем, в тому числі ECDSA (Elliptic curve digital signature algorithm), ECIES (Elliptic curve integrated encryption scheme), ECMQV (Elliptic curve Menezes-Qu-Vanstone) і ECDH. До того ж, у додатку цього стандарту містяться всі базові теоретико-числові алгоритми, необхідні для криптографії з публічним ключем [14].

- FIPS 186-3 (2009 рік), FIPS 186-4 (2013 рік) та FIPS 186-5 (2023 рік) – це стандарти, прийняті National Institute of Standards and Technology (NIST), що регламентують використання алгоритмів цифрового підпису (ЦП), зокрема ECDSA (алгоритм цифрового підпису на еліптичних кривих). Ці стандарти також надають список рекомендованих кривих та їх параметрів, що сприяє створенню безпечних і надійних систем цифрового підписування та забезпечує відповідність до сучасних вимог у сфері криптографічної безпеки [15].

- ISO/IEC 15946-4:2004 та ISO/IEC 15946-5:2022 – це міжнародні стандарти, які входять до серії стандартів ISO/IEC 15946, прийнятих International Organization for Standardization (ISO) та International Electrotechnical Commission IEC). Стандарт ISO/IEC 15946-4 встановлює вимоги та рекомендації щодо генерації та перевірки електронних підписів на основі еліптичних кривих [16], тоді як ISO/IEC 15946-5 визначає методи створення еліптичної кривої над скінченним полем [17]. В окремому розділі цієї статті будуть розглянуті національні стандарти України, які регулюють використання еліптичних кривих для захисту криптографічної інформації

Паралельно із загальними стандартами, існують Request for Comments документи, далі просто RFC-документи, такі як RFC 7748 та RFC 8032, які описують використання конкретних еліптичних кривих, наприклад, Curve25519 та Ed25519, у протоколах обміну ключами та цифрового підпису.

Документ RFC 7748 визначає дві еліптичні криві над простими полями, такі як Curve25519 та Curve448, які пропонуються високий рівень практичної безпеки в криптографічних додатках, включаючи захист транспортного рівня (TLS). Ці криві призначені працювати на  $\sim 128$ -бітному та  $\sim 224$ -бітному рівні безпеки відповідно, і генеруються детерміновано на основі списку необхідних властивості [19].

А у документі RFC 8032 описана схема підпису еліптичної кривої Едвардса за допомогою алгоритму цифрового підпису (EdDSA). Цей алгоритм створено із рекомендованими параметрами для edwards25519 та edwards448 кривих [20].

Згадані RFC-документи важливі для визначення конкретних еліптичних кривих та їх параметрів, що можуть бути використані в криптографічних протоколах. Curve25519 використовується в протоколах обміну ключами, таких як Signal Protocol, і забезпечує ефективну та безпечну обмін ключами для забезпечення конфіденційності та цілісності даних. Аналогічно, Ed25519 є алгоритмом цифрового підпису, який базується на Curve25519 та забезпечує ефективність та високий рівень безпеки для підпису повідомлень.

Ці стандарти встановлюють загальноприйняті параметри для еліптичних кривих, роблячи їх доступними для широкого кола розробників та користувачів. Застосування стандартів у практиці демонструється в різних сферах, таких як криптовалюти системи (наприклад, Bitcoin, який використовує ECDSA), протоколи обміну даними (TLS/SSL, що використовує ECC), а також платіжні технології (Android Pay, Apple Pay), які використовують еліптичну криптографію для забезпечення безпеки та цифрового підпису.

Таким чином, стандартизація еліптичних кривих визначає єдині принципи для створення безпечних та ефективних криптографічних систем, що дозволяє їхню стандартизовану реалізацію та взаємодію в різних додатках та протоколах.

**Аналіз сучасного стану стандартизації ECC в Україні.** Головним документом, який встановлює правила для створення та перевірки цифрового підпису, є Національний стандарт ДСТУ 4145-2002 «Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Цифровий підпис, що базується на використанні еліптичних кривих. Формування та перевірка» [21]. Однак, варто зауважити, що цей стандарт залишається без оновлень з моменту його прийняття в 2002 році, незважаючи на рекомендації світових експертів про необхідність оновлення криптографічних стандартів кожні 4-5 років [26].

Національний стандарт ДСТУ 4145-2002 визначає механізм цифрового підписування, що ґрунтується на властивостях груп точок еліптичних кривих над полями  $GF(2^m)$ . Він регламентує використання еліптичних кривих над скінченним полем  $GF(2^m)$  та встановлює правила застосування цього механізму до повідомлень, що пересилаються каналами зв'язку та/або обробляються у комп'ютеризованих системах загального призначення [21].

Відповідно до стандарту, використання еліптичних кривих з параметрами, наведеними в окремому додатку, дозволено лише згідно з визначеними алгоритмами перевірки правильності вибору рівняння еліптичної кривої та базової точки.

Хоча ДСТУ 4145-2002 є досить гнучким стандартом щодо вибору параметрів безпеки, у тому числі функції хешування та генератора псевдовипадкових чисел, він все ж відстає за сучасними стандартами криптографічної безпеки. Зокрема, існують обґрунтовані обговорення щодо вразливостей кривих над полями характеристики 2, які можуть бути використані для атак злому систем.

Нині близько 10% використання цифрового підпису в Україні ґрунтується на ДСТУ 4145-2002, що значно менше, ніж у випадку стандартів, що включають RSA та ECDSA. Це обумовлено, зокрема, відсталістю стандарту, а також існуючими вразливостями, які можуть порушити безпеку системи. Водночас, електронні

документи, підписані за допомогою цифрового підпису, мають юридичну силу, що дає певну правову базу для їх використання в електронному документообігу [26].

Також Чинний стандарт, прийнятий в Україні, не відповідає міжнародним стандартам щодо електронного підпису. Проблема недостатньої відповідності міжнародним стандартам у сфері електронного підпису висвітлена у пункті 4.11 Концепції, де особлива увага приділяється необхідності розробки механізмів для ефективної взаємодії України з іншими державами в рамках юридично значущого електронного документообігу. [23, с. 23], [2].

Очевидно, що ДСТУ 4145-2002 потребує оновлення з урахуванням сучасних вимог криптографічної безпеки та викликів, які ставлять перед ним розвиток технологій та методів кібератак.

У 2020 році в Україні запроваджено новий Національний стандарт ДСТУ 9041-2020 "Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм шифрування коротких повідомлень, що ґрунтується на скручених еліптичних кривих Едвардса" [22] визначає методи шифрування коротких повідомлень до шістсот шістнадцяти біт. Новий алгоритм, порівняно зі стандартом цифрового підпису ДСТУ 4145-2002, використовує криптографічні перетворення у групі точок еліптичних кривих, застосовуючи криві у формі Едвардса, замість кривих у формі Вейерштрасса. Це призводить до значного покращення швидкодії більш ніж у три рази. Новий стандарт розроблений з урахуванням усіх сучасних вимог до стійкості криптографічних алгоритмів та відповідає всім актуальним вимогам.

У додаток до цього, ДСТУ 9041-2020 відповідає міжнародним стандартам та враховує усі найсучасніші підходи до криптографічного захисту інформації. Стандарт узгоджений з усіма чинними національними стандартами в Україні. Його особливості включають відносно невелику довжину ключа, застосування передових математичних методів та новий алгоритм створення псевдовипадкових послідовностей. На відміну від аналогічного алгоритму у ДСТУ 4145-2002, цей новий підхід використовує виключно національні криптографічні алгоритми і не посилається на відповідні стандарти пострадянського періоду, чий термін дії вже майже минув.

У червні 2023 року було замінено стандарт ДСТУ ISO/IEC 15946-5:2019 (ISO/IEC 15946-5:2017, IDT) на стандарт ДСТУ ISO/IEC 15946-5:2023 (ISO/IEC 15946-5:2022, IDT). Цей встановлює методи криптографії з відкритим ключем, які базуються на еліптичних кривих, описаних у ISO/IEC 15946-1. Він визначає методи генерації еліптичних кривих для впровадження механізмів на базі еліптичних кривих, що визначені у, ISO/IEC 14888-3, ISO/IEC 29192-4, ISO/IEC 11770-3, ISO/IEC 9796-3, ISO/IEC 18033-2 та ISO/IEC 18033-5. Цей документ застосовний до криптографічних методів, заснованих на еліптичних кривих, визначених над скінченними полями простого порядку ступеня (включаючи спеціальні випадки простого порядку та дві характеристики) [24].

У порівнянні зі стандартами ДСТУ 4145 і ДСТУ 9041, стандарт ДСТУ ISO/IEC 15946-5:2023 має кілька переваг. Він надає більш широкий набір параметрів для генерації кривих, що дозволяє вибирати криві з різними характеристиками залежно від конкретних потреб застосування. Крім того, цей стандарт використовує найсучасніші методи генерації еліптичних кривих, що забезпечує їхню стійкість та ефективність у сучасних криптографічних системах.

**Атаки на ECC.** Незважаючи на високий рівень стійкості, ECC, як і будь-яка криптографічна система, не є абсолютно захищеною від атак. З розвитком обчислювальних технологій зростає й потреба в постійному вдосконаленні методів захисту. Розглянемо деякі види можливих атак на ECC:

1. Атака грубою силою - це найпростіший метод атаки на будь-яку криптографічну систему, включаючи ECC, яка полягає у переборі всіх можливих

комбінацій для знаходження приватного ключа. Хоча ECC рекомендує використовувати ключі довжиною не менше сто двадцяти восьми біт для захисту від атак грубої сили, зростання обчислювальних потужностей може зробити цей захист вразливим у майбутньому. Тому важливо обирати ключі достатньої довжини та ретельно підбирати параметри кривих [27].

2. Атака по бічному: моніторинг фізичних параметрів криптосистеми (споживання енергії, електромагнітне випромінювання) під час виконання криптографічних операцій для отримання інформації про ключ. Якщо мінімізувати електричне споживання та випромінювання під час математичних операцій, наприклад, шумові імпульси, то це буде захистом від цієї атаки [27].

3. Квантова атака з використанням квантових обчислювальних систем. Використання квантових обчислювальних систем у квантовій атаці може становити загрозу для алгоритмів ECC, таких як ECDSA та ECDH, які ефективно розв'язують задачу дискретного логарифмування в групі точок еліптичної кривої за допомогою алгоритму Шора. Це може створити серйозні проблеми для безпеки ECC, тому зусилля спрямовані на створення постквантових криптографічних алгоритмів, що залишаються стійкими до квантових атак. Необхідно підкреслити, що різні еліптичні криві можуть мати різний рівень захисту від криптоаналізу, різну ефективність та використовувати різні методи та розміри ключів. [27].

Для вибору певної еліптичної кривої важливо враховувати потреби та вимоги конкретної системи. Рекомендується використовувати стандартизовані криві, щоб забезпечити сумісність з іншими протоколами та системами. Як приклад можна навести такі криві як NIST P-256, Curve25519, BrainpoolP256r1 [25].

**Висновки.** Криптографія на еліптичних кривих (ECC) на сьогодні є одною із основ для розробки сучасних криптографічних алгоритмів з відкритим ключем. ECC здобула визнання в криптографії, через забезпечення високого рівня безпеки за умови використання більш коротких довжин ключів (порівняно з іншими криптографічними підходами), високу швидкість, економію ресурсів та універсальність, що дає їй перевагу над іншими методами, такі як RSA та інші. Вона забезпечує безпечне мережеве з'єднання, генерує секретні ключі для TLS-серверів та їх клієнтів, а також використовується для створення цифрових підписів, які гарантують автентичність транзакцій у криптовалютних системах.

ECC також застосовується в мобільних додатках для шифрування голосових викликів, відеодзвінків та обміну повідомленнями. Окрім цього, ECC використовується для захисту зв'язку, забезпечення цілісності даних та автентифікації пристроїв IoT. Завдяки своїй стійкості та ефективності, ECC стає все більш популярним інструментом для забезпечення кібербезпеки.

Алгоритми і протоколи ECC включені до різних міжнародних та американських стандартів, таких як ANSI X9.62, ANSI X9.63, IEEE 1363, FIPS 186, та ISO/IEC 15946. Ці стандарти встановлюють формати повідомлень, рекомендовані криві та методи для підпису та обміну ключами на еліптичних кривих, забезпечуючи високий рівень безпеки та ефективності. Крім них є документи RFC, зокрема RFC 7748 та RFC 8032, які описують використання еліптичних кривих у протоколах обміну ключами та цифрового підпису. У нашій країні закріплені в таких державних стандартах як ДСТУ 4145-2002, ДСТУ 9041-2020 та ДСТУ 15946-2023.

Еліптична криптографія (ECC) представляє собою нове покоління криптосистем з відкритим ключем, що базується на зрозумілих математичних принципах і забезпечує більш високий рівень безпеки порівняно з традиційними системами. На сьогоднішній день не існує алгоритмів з субекспоненційною складністю для знаходження дискретного логарифму в групі точок еліптичних кривих над скінченними полями, що

забезпечує надійність ЕСС. Однак, криптографія на еліптичних кривих також стикається з викликами і проблемами. Розробка безпечних криптосистем на основі еліптичних кривих вимагає додаткових знань і експертизи порівняно з традиційними алгоритмами криптографії. Вибір вірних параметрів кривих є критично важливим для забезпечення безпеки ЕСС. Крім того, з часом алгоритми на еліптичних кривих можуть втратити свою криптостійкість через квантові обчислення. Алгоритм Шора, наприклад, може швидко зламати алгоритм на основі ЕСС за допомогою гіпотетичного квантового комп'ютера. Таким чином, майбутні дослідження в області криптографії на еліптичних кривих будуть спрямовані на аналіз забезпечення стійкості ЕСС перед квантовими атаками і розробку нових квантовостійких алгоритмів, протоколів і рішень, що підвищать безпеку та ефективність криптосистем на еліптичних кривих.

## Список літератури

1. Дичка А. І. Модифікований метод багатократного скалярного множення точок еліптичної кривої у скінченних полях: магістерська дисертація. 2018 URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23653/1/Dychka\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23653/1/Dychka_magistr.pdf)
2. Горбенко Ю., Горбенко І. Інфраструктури відкритих ключів. Електронний цифровий підпис. Теорія та практика : монографія. Харків : Форт, 2010. 608 с.
3. Koblitz N. Elliptic Curve Cryptosystems. *Mathematics of Computation*. 1987. Vol. 48, № 177. P. 203-209.
4. Blake I. F., Smart N. P., Seroussi G. *Advances in elliptic curve cryptography*. Cambridge University. 2009.
5. Diffie W., Hellman M. E., *New directions in cryptography*. 1976. Vol. 22, No 6. P. 644-654. URL: <https://ee.stanford.edu/~hellman/publications/24.pdf>
6. Rivest R. L., Shamir A., Adleman L., A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems, 1985. URL: <https://people.csail.mit.edu/rivest/Rsapaper.pdf>
7. ElGamal T. Public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. 1985. URL: <https://caislab.kaist.ac.kr/lecture/2010/spring/cs548/basic/B02.pdf>
8. Arjen K. Lenstra, H. W. Lenstra. The development of the number field sieve. *Lecture Notes in Mathematics (LNM)*. 1993. Vol. 1554.
9. Dan Boneh, and Victor Shoup, *A Graduate Course in Applied Cryptography*, 2023. URL: <http://toc.cryptobook.us/book.pdf>
10. Koblitz, N. Elliptic curve cryptosystems. *Mathematics of computation*, 1987. Vol.48, № 177. P. 203. URL:<https://doi.org/10.1090/s0025-5718-1987-0866109-5>.
11. Miller, V.S. Use of elliptic curves in cryptography. *Lecture notes in computer science*. 2000. Vol. 218P. 417–426. URL:[https://doi.org/10.1007/3-540-39799-x\\_31](https://doi.org/10.1007/3-540-39799-x_31).
12. ANSI X9.62. Public key cryptography for the financial services industry: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). American National Standards Institute, Washington. 1999
13. ANSI X9.63. Public key cryptography for the financial services industry: Key agreement and key transport using elliptic curve cryptography. American National Standards Institute, Washington. 2001.
14. IEEE P1363/D9(Draft Version 9). Standard Specifications for Public Key Cryptography, 1999
15. Digital Signature Standard (DSS). National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Washington. URL:<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.186-5.pdf>.
16. ISO/IEC 15946-4. Information technology. Security techniques. Cryptographic techniques based on elliptic curves. Part 4: Digital signatures giving message recovery, Geneva.
17. ISO/IEC 15946-5. Information technology. Security techniq
18. Saho, N.J.G., Ezin, E.C. Comparative study on the performance of elliptic curve cryptography algorithms with cryptography through RSA algorithm. 2020. CARI. URL:<https://hal.science/hal02926106/document?ref=panther-protocol-blog>
19. Elliptic Curves for Security RFC 7748. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7748> (дата звернення: 15.03.2024)
20. Edwards-Curve Digital Signature Algorithm (EdDSA) RFC 8032. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8032> (дата звернення: 15.03.2024)
21. ДСТУ 4145-2002. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Цифровий підпис, що ґрунтується на еліптичних кривих. Формування та перевіряння. [Чинний від 1 липня 2003 року]. Київ, Держстандарт України.
22. ДСТУ 9041-2020. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм шифрування коротких повідомлень, що ґрунтується на скручених еліптичних кривих Едвардса. [Чинний від 01.11.2020 року]. Київ, Держстандарт України.

23. Забенько Ю. І., Ковтанюк Ю. С. Концепція планування життєвого циклу електронних документів. *Архіви України*. 2013. Вип. 4. С. 5-38.
24. ДСТУ ISO/IEC 15946-5:2023 Інформаційні технології. Криптографічні методи на основі еліптичних кривих. Частина 5. Генерування еліптичних кривих (ISO/IEC 15946-5:2022, IDT). [Чинний від 25 червня 2023 року]. Київ, Держстандарт України.
25. SafeCurves: [choosing safe curves for elliptic-curve cryptography]. URL: <https://safecurves.cr.yyp.to/>
26. Циганкова, О.В. Методи підвищення швидкодії асиметричних криптосистем з використанням еліптичних кривих у формі Едвардса: дис... канд. техн.: 28.04.2021/ Київ, 154 с.
27. Щур, Н., Покотило, О., Байлюк, Є. Криптографія на еліптичних кривих та її практичне застосування. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2023. Вип. 1(21), С. 48–64. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.4864>

## References

1. Dychka, A. I. (2018). Modified method of multiple scalar multiplication of elliptic curve points in finite fields: master's thesis [Modyfikovanyj metod bahatokratnoho skaliarnoho mnozhenia tochok eliptychnoi kryvoi u skinchennykh poliakh]. *Master's thesis* URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23653/1/Dychka\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23653/1/Dychka_magistr.pdf) [in Ukrainian].
2. Horbenko, Yu. & Horbenko, I. (2010). *Infrastruktury vidkrytykh kliuchiv. Elektronnyj tsyfrovij pidpys. Teoriia ta praktyka : monohrafiia* [Public key infrastructures. Electronic digital signature. Theory and practice]. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
3. N.Koblitz. (1987) Elliptic Curve Cryptosystems // *Mathematics of Computation*. Vol. 48, № 177. P. 203-209.
4. Blake, I. F., Smart, N. P., Seroussi, G.(2009) *Advances in elliptic curve cryptography*. Cambridge University.
5. Diffie W., Hellman M. E.. (1976) *New directions in cryptography*. URL: <https://ee.stanford.edu/~hellman/publications/24.pdf>
6. Rivest R. L., Shamir A., Adleman L..(1985) A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. URL: [https:// people.csail.mit.edu/rivest/Rsapaper.pdf](https://people.csail.mit.edu/rivest/Rsapaper.pdf)
7. ElGamal T.. (1985) Public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. URL: <https://caislab.kaist.ac.kr/lecture/2010/spring/cs548/basic/B02.pdf>
8. Arjen K., Lenstra H.. (1993) The development of the number field sieve. *Lecture Notes in Mathematics (LNM)*, Vol. 1554.
9. Boneh D., Shoup V./ (2023) *A Graduate Course in Applied Cryptography*. URL: <http://toc.cryptobook.us/book.pdf>
10. Koblitz, N.. (1987) Elliptic curve cryptosystems. *Mathematics of computation*, Vol.48, № 177. P. 203. URL: <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-1987-0866109-5>.
11. Miller V.S. (2020) Use of elliptic curves in cryptography. *Lecture notes in computer science*, P. 417–426. URL: [https://doi.org/10.1007/3-540-39799-x\\_31](https://doi.org/10.1007/3-540-39799-x_31).
12. ANSI X9.62. Public key cryptography for the financial services industry: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). American National Standards Institute, Washington. 1999
13. ANSI X9.63. Public key cryptography for the financial services industry: Key agreement and key transport using elliptic curve cryptography. American National Standards Institute, Washington. 2001.
14. IEEE P1363/D9(Draft Version 9). Standard Specifications for Public Key Cryptography, 1999
15. Digital Signature Standard (DSS). National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Washington. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.186-5.pdf>.
16. ISO/IEC 15946-4. Information technology. Security techniques. Cryptographic techniques based on elliptic curves. Part 4: Digital signatures giving message recovery, Geneva.
17. ISO/IEC 15946-5. Information technology. Security techniq
18. Saho, N.J.G., Ezin, E.C.. (2020) Comparative study on the performance of elliptic curve cryptography algorithms with cryptography through RSA algorithm. CARI. URL: <https://hal.science/hal02926106/document?ref=panther-protocol-blog>
19. Elliptic Curves for Security RFC 7748. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7748>
20. Edwards-Curve Digital Signature Algorithm (EdDSA) RFC 8032. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8032>
21. Informatsijni tekhnolohii. Kryptohrafichnyj zakhyst informatsii. Tsyfrovij pidpys, scho gruntuiet'sia na eliptychnykh kryvykh. Formuvannia ta perevirannia [Information Technology. Cryptographic protection of information. Digital signature based on elliptic curves. Formation and verification] (2003). *DSTU 4145-2002 from July 1, 2003*. Kyiv: State Standard of Ukraine [in Ukrainian].
22. Informatsijni tekhnolohii. Kryptohrafichnyj zakhyst informatsii. Alhorytm shyfruvannia korotkykh povidomlen', scho gruntuiet'sia na skruchenykh eliptychnykh kryvykh Edvardsa [Information Technology. Cryptographic protection of information. Short Message Encryption Algorithm Based on

- Twisted Edwards Elliptic Curves] (2020). *DSTU 9041-2020 from November 1, 2020*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
23. Zaben'ko, Yu. I. & Kovtaniuk, Yu. S. (2013). Kontsepsiia planuvannia zhyttievoho tsykladu elektronnykh dokumentiv [The concept of planning the life cycle of electronic documents]. *Arkhivy Ukrainy – Archives of Ukraine*, 4, 5-38 [in Ukrainian].
  24. Informatsijni tekhnolohii. Kryptohrafichni metody na osnovi eliptychnykh kryvykh. Chastyna 5. Heneruvannia eliptychnykh kryvykh [Information technologies. Cryptographic methods based on elliptic curves. Part 5: Generation of elliptic curves] (2023). *DSTU ISO/IEC 15946-5:2023 from June 25, 2003*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
  25. SafeCurves: [choosing safe curves for elliptic-curve cryptography]. URL: <https://safecurves.cr.yp.to/>
  26. Tsyhankova, O.V. (2021). Metody pidvyschennia shvydkodii asymetrychnykh kryptosystem z vykorystanniam eliptychnykh kryvykh u formi Edvardsa [Methods of increasing the speed of asymmetric cryptosystems using elliptic curves in the form of Edwards]. *Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
  27. Schur, N., Pokotylo, O. & Bajliuk, Ye. (2023). Kryptohrafiia na eliptychnykh kryvykh ta ii praktychne zastosuvannia [Elliptic curve cryptography and its practical application.]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika – Cyber security: education, science, technology*, 1(21), 48–64. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.4864> [in Ukrainian].

**Oleksandr Ulichev**, PhD tech. sci., **Kostyantyn Zadorozhny**, student  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Standardization of elliptic curves: analysis and implementation in cryptographic protocols**

The purpose of the article is to consider the current state of elliptic cryptography, the prerequisites for its use, as well as the requirements of modern standards related to the use of elliptic cryptography

The use of elliptic curves in cryptography is considered one of the most promising areas of development of modern security algorithms. This mathematical approach is based on the complexity of solving the discrete logarithm problem in a group of points of an elliptic curve over a finite field. The use of cryptography on elliptic curves allows you to ensure the security of data exchange using effective encryption algorithms and the creation of digital signatures (DI). This study examines elliptic curves for cryptographic purposes, and provides basic operations on the point group of elliptic curves. Special attention is paid to Elliptic curve Diffie-Hellman (ECDH) and Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA) key exchange algorithms. The standards regulating the use of elliptic curves in cryptographic systems are also analyzed, and the advantages of this cryptographic paradigm compared to the main asymmetric algorithms are considered. Potential threats and vulnerabilities of cryptographic algorithms based on elliptic curves are investigated. Examples of popular standardized curves recommended by relevant organizations, such as NIST, used in real-world cryptographic applications are also provided.

Elliptic curve cryptography (ECC) is currently one of the foundations for the development of modern public-key cryptographic algorithms. ECC has gained recognition in cryptography for providing a high level of security with shorter key lengths (compared to other cryptographic approaches), high speed, resource savings, and versatility, giving it an advantage over other methods such as RSA and others. It provides a secure network connection, generates secret keys for TLS servers and their clients, and is also used to create digital signatures that guarantee the authenticity of transactions in cryptocurrency systems.

**cryptography on elliptic curves, asymmetric cryptosystems, digital signature on elliptic curves, ECC (Elliptic Curve Cryptography), ECDH, ECDSA, RFC**

*Одержано (Received) 22.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 08.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.74:669.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.27-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.27-36)

**В.М. Кропівний**, проф., канд. техн. наук, **М.В. Босий**, ст. викл., **О.В. Кузик**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропівна**, доц., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост**, викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: bosiymv@ukr.net; kuzykov1985@gmail.com*

## Термодинамічні закономірності структуроутворення високоміцного чавуну при модифікуванні та різних умовах кристалізації розплаву

У статті проведено результати аналізу термодинамічних закономірностей структуроутворення високоміцного чавуну при модифікуванні та різних умовах кристалізації розплаву. Запропоновано концепцію утворення зародків графіту у високоміцному чавуні. Визначено наступне: завдяки суттєвому перерозподілу всіх елементів, які розчиняються в розплаві чавуну при його модифікуванні стається очищення від сірки, фосфору та ін., а це дозволяє одержати структуру чавуну з кулястим графітом при застосуванні модифікаторів. Під час кристалізації чавуну з виділенням аустеніту відповідна пряма мікроліквіація кремнію з коефіцієнтом розподілу буде меншою за одиницю, проте марганець буде більш рівномірно розподілятися у металі, а, відповідно, карбідостабілізуючі елементи ліквідувати у рідку фазу. Наведено термодинамічний розрахунок теплових ефектів реакцій виділення графіту з розчиненого в залізі вуглецю, переходу кремнію та марганцю з рідкого стану в твердий в процесі утворення високоміцного чавуну. Визначено фізичну та приховану теплоту кристалізації високоміцного чавуну ентальпійним методом.

**високоміцний чавун, структуроутворення чавуну, кулястий графіт, флуктуація, дифузія, енергія Гіббса, тепловий ефект, теплота кристалізації**

**Постановка проблеми.** В галузі матеріалознавства високоміцний чавун з кулястим графітом є прогресивним литим конструкційним матеріалом, який має широкі можливості застосування у сфері сучасних конструкцій та обладнанні. Властивості високоміцного чавуну визначаються особливостями утворення його структури, в першу чергу – це графітні включення в навколографітній матриці. Тому закономірності процесу формування графітних включень, а також причини різноманітностей форм графіту на сьогодні однозначно не встановлені.

При введенні будь-якого десфероїдизуючого елемента в чавун змінюються термодинамічні умови кристалізації та формування кулястого і вермикулярного графіту. А складний комплекс фізико-хімічних процесів, які відбуваються при графітізації магнієвого чавуну, не дозволяє дослідникам досягти єдиної точки зору щодо механізму формування включень кулястої та вермикулярної форми графіту [1-5, 8, 9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Структура матриці високоміцного чавуну з вермикулярним графітом формується по-різному: наприклад, коли ЧВГ модифікуємо магнієвою лігатурою ЖКМ-2 у кількості 1,35 % за температури 1435 °С. Температура заливки складає 1385 °С. З первинної структури впливає, що кристалізація відбувається за типом доевтектичного чавуну: спочатку кристалізуються ділянки аустеніту, які збільшуються в розмірі в міру охолодження. Перші зерна

аустеніту пересичені вуглецем, тому в процесі кристалізації всередині аустенітних областей виділяються графітні включення, що мають більш-менш компакту форму через труднощі дифузійного переміщення вуглецю з рідкого розплаву до зростаючого включення через тверду оболонку аустеніту [6-9,10-16].

При розгляді гомогенного процесу зародження центрами кристалізації графіту в чавуні є мікрівкраплення графіту, які можуть потрапляти з шихти або модифікаторів, при припущенні, що такі мікрівкраплення графіту або не повністю розчинилися в розплаві, або можуть з'являтися в результаті протікання реакцій в рідкому чавуні. А тому в роботах [1-4] відзначається, що відома класична теорія гетерогенного зародкоутворення, яка заснована на принципах структурної та розмірної відповідності, не може бути використана до кристалізації графіту у чавунах. Виключення теорії гетерогенного зародкоутворення базується на тому принципі, що параметри решітки неметалевих вкраплень не повинні відрізнятися від графіту більше, ніж на 15 %. Усі неметалеві вкраплення, крім BN, що утворюється при температурах вище 1650°C, мають більшу різницю. А при цьому повністю виключається роль оксисульфідних або оксидних неметалевих вкраплень на утворення зародків графіту. Тому у рідкому чавуні немає центрів гетерогенного зародження графіту [5,6, 8].

В процесі кристалізації чавуну графітна фаза виділяється безпосередньо з рідкого розплаву. Деякі автори також в роботах [10-16] стверджують, що утворення графіту може відбуватися на базі фазових флуктацій групи атомів вуглецю (гомогенне зародження) або на різних домішках, що присутні у чавунах (гетерогенне зародження).

Процес зародження графітної фази у чавунах під час кристалізації та її подальшого зростання підкорюється загальним уявленням і закономірностям кристалізації рідких металів шляхом утворення зародків графіту та їх швидкості зростання, але все-таки залишається до кінця не з'ясованою проблемою.

**Постановка завдання.** Метою роботи є встановлення термодинамічних закономірностей структуроутворення чавуну при модифікуванні та різних умовах кристалізації розплаву для розробки технології отримання виливків з високоміцного чавуну.

**Виклад основного матеріалу.** Термодинамічне дослідження закономірностей структуроутворення чавуну при модифікуванні та різних умовах кристалізації розплаву проводимо для модифікованого чавуну наступного складу: 3,30–3,33 % C; 2,0–2,4 % Si; 0,60 % Mn; 0,015 % Mg. Вуглецевий еквівалент для цього чавуну дорівнює близько 3,35.

При використанні термодинамічної теорії фазових перетворень, утворення зародків графіту можна пояснити зменшенням вільної енергії системи, повний диференціал якої має наступний вираз:

$$dG = dU - TdS - SdT, \quad (1)$$

де  $dU$  – зміна внутрішньої енергії ядра;  $T$  – температура;  $S$  – ентропія.

При узагальненні першого та другого законів термодинаміки рівняння має такий вигляд

$$TdS = dU + dA, \quad (2)$$

де  $A$  – робота розширення, що дорівнює добутку тиску  $P$  на зміну об'єму  $dV$ , тобто  $A = PdV$ .

Наприклад, для ізохорних процесів при  $V = \text{const}$ ,  $dA = 0$  і  $TdS = dU$ .

Враховуючи рівняння (1) та (2), отримуємо

$$(\partial G / \partial T)_V = -S. \quad (3)$$

Так як ентропія завжди позитивна, то  $(\partial G/\partial T)_V$  є негативною величиною. Отже, зі зростанням температури вільна енергія зменшується, на що вказує наступне рівняння.

$$(\partial^2 G/\partial^2 T) = - (\partial S/\partial T)_V. \quad (4)$$

А з підвищенням температури ентропія зростає,  $(\partial^2 G/\partial^2 T)$  є негативною величиною.

Враховуючи ймовірність гомогенної флуктуації, а також дифузійного приєднання атомів вуглецю до зародків графіту швидкість зародження центрів кристалізації буде визначатися наступним виразом:

$$I = A e^{-\Delta F_{кр}/K} \cdot e^{-Q/RT}, \quad (5)$$

де  $e^{-\Delta F_{кр}/KT}$  – ймовірність флуктуаційних скупчень атомів вуглецю;  $e^{-Q/RT}$  – ймовірність дифузійних переміщень атомів вуглецю до зародків графіту критичного розміру;  $A$  – коефіцієнт, що залежить від складу розплаву.

Проведемо термодинамічний аналіз для визначення в замкнутій системі джерела енергії утворення зародків графіту критичних розмірів. Наприклад, відомо, що рушійною силою термодинамічного перетворення є різниця вільних енергій  $\Delta G$  між вихідним розплавом і фазами, утвореними при переохолодженні, яка визначається за наступним рівнянням

$$\Delta G = -V\Delta f + F_n\sigma, \quad (6)$$

де  $V$  – об'єм нової фази;  $\sigma$  – поверхневий натяг на межі розділу фаз;  $F_n$  – площа поверхні утвореної фази;  $\Delta f$  – різниця питомих вільних енергій між вихідною і фазою, яка утворюється, тобто зростає при збільшенні переохолодження.

Розмір критичного зародка  $r_{кр}$  зменшується і визначається за таким виразом  $r_{кр} = 4\sigma/\Delta f$ , звідки

$$\Delta f = 4\sigma/r_{кр}. \quad (7)$$

Виконавши перетворення виразів (6) і (7), отримуємо, що робота на утворення критичного зародку зі зростанням переохолодження буде пропорційна квадрату  $\Delta f$ , тобто

$$G_{кр} = 32 \sigma^3/\Delta f^2. \quad (8)$$

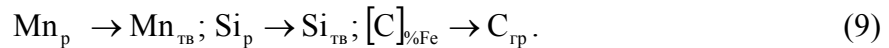
З аналізу термодинамічних та дифузійних закономірностей видно, що утворення в розплаві зародків графіту шляхом гомогенної флуктуації мало ймовірно без утворення проміжних метастабільних фаз. Утворення нових фаз буде регулюватися не тільки рівнем вільної енергії згідно переохолодження або концентраційної флуктуації, а також і величиною енергетичного бар'єру, яка залежить від поверхневої енергії на міжфазній границі. Утворення більш стабільної фази має вплив на розчинення раніше утвореної менш стабільної фази. На цих положеннях базуються висновки ряду науковців про визначальну роль у формоутворенні компактних форм графіту розпаду малостійких карбідів глобуляризуючих елементів.

Тому існування метастабільних (проміжних) фаз кінетично більш вигідно при великих переохолодженнях, коли уповільнені дифузійні процеси.

Необхідно зазначити, що експериментальних даних, які переконливо підтверджують викладені вище гіпотези і теорії утворення зародків вільного графіту недостатньо.

Таким чином, перерозподіл компонентів між фазами залежить не тільки від кристалізаційних і дифузійних процесів, а також і від теплових процесів.

Тому для термодинамічного опису структуроутворення кремнію, марганцю і вуглецю у високоміцному чавуні виконаємо розрахунок теплових ефектів наступних реакцій за теплотами утворення реагентів:



Згідно з методикою розрахунку теплових ефектів реакцій по теплотах утворення реагентів [17] та на основі вихідних даних табл. 1 проведемо термодинамічний розрахунок визначення теплових ефектів вищенаведених реакцій.

Таблиця 1 – Термодинамічні дані для розрахунку теплових ефектів наведених реакцій [17]

Реагент	$\Delta H_{\text{утв}}^{\circ} 298,$ кДж МОЛЬ	T, К	$\Delta H_{\text{пр}}^{\circ},$ кДж МОЛЬ	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + b \cdot 10^{-3} T + c \cdot 10^5 T^{-2}$		
				a	b	c
$[\text{C}]_{\% \text{Fe}}$	-	1674	22,626	-	-	-
$\text{C}_{\text{ГР(ТВ)}}$	-	4020	138,16	16,75	4,27	-8,37
$\text{Mn}_p$	-	2368	224,83	6,05	-	-
$\text{Mn}_{\text{ТВ}}$	-	1517	14,7	47,31	-	-
$\text{Si}_p$	-	2750	297,26	30,98	-	-
$\text{Si}_{\text{ТВ}}$	-	1683	46,47	23,86	4,27	-4,44

Джерело: розроблено авторами на підставі [17]

Знаходимо  $\Delta H_{298}^{\circ}$  для реакції  $[\text{C}]_{\% \text{Fe}} \rightarrow \text{C}_{\text{ГР}}: \Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{\text{C}_{\text{ГР}}}^{\circ} - \Delta H_{[\text{C}]_{\% \text{Fe}}}^{\circ} = 0;$

для реакції  $\text{Mn}_p \rightarrow \text{Mn}_{\text{ТВ}}: \Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{\text{Mn}_{\text{ТВ}}}^{\circ} - \Delta H_{\text{Mn}_p}^{\circ} = 0;$

для реакції  $\text{Si}_p \rightarrow \text{Si}_{\text{ТВ}}: \Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{\text{Si}_{\text{ТВ}}}^{\circ} - \Delta H_{\text{Si}_p}^{\circ} = 0.$

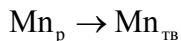
Розраховуємо зміни коефіцієнтів температурної залежності  $\Delta C_p$  при протіканні реакції  $[\text{C}]_{\% \text{Fe}} \rightarrow \text{C}_{\text{ГР}}.$

$$\Delta a = 16,75 - 0 = 16,75; \Delta b = 4,27 - 0 = 4,27; \Delta c = -8,37 - 0 = 8,37$$

Зміна теплоємності системи внаслідок протікання реакції  $[\text{C}]_{\% \text{Fe}} \rightarrow \text{C}_{\text{ГР}}$

$$\Delta C_p = 16,75 + 4,27 \cdot 10^{-3} \cdot T + (-8,37) \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Зміни коефіцієнтів температурної залежності  $\Delta C_p$  при протіканні реакції

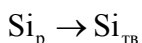


$$\Delta a = 44,79 - 46,05 = -1,26; \Delta b = 0 - 0 = 0; \Delta c = 0 - 0 = 0$$

Зміна теплоємності системи внаслідок протікання реакції  $\text{Mn}_p \rightarrow \text{Mn}_{\text{ТВ}}$

$$\Delta C_p = 1,26 + 0 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Зміни коефіцієнтів температурної залежності  $\Delta C_p$  при протіканні реакції



$$\Delta a = 23,86 - 30,98 = -7,12; \Delta b = 0 - 0 = 0; \Delta c = 0 - 0 = 0$$

Зміна теплоємності системи внаслідок протікання реакції  $\text{Si}_p \rightarrow \text{Si}_{\text{ТВ}}$

$$\Delta C_p = -7,12 + 0 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Розраховуємо  $\Delta H_T^0$  для реакції  $[C]_{\%Fe} \rightarrow C_{гр}$  в інтервалі температур 1425-1621 К (1152 °С-1348 °С):

$$\Delta H_{1425K}^0(1152^\circ C) = 46,228 \text{ кДж/моль}; \Delta H_{1621K}^0(1348^\circ C) = 50,712 \text{ кДж/моль};$$

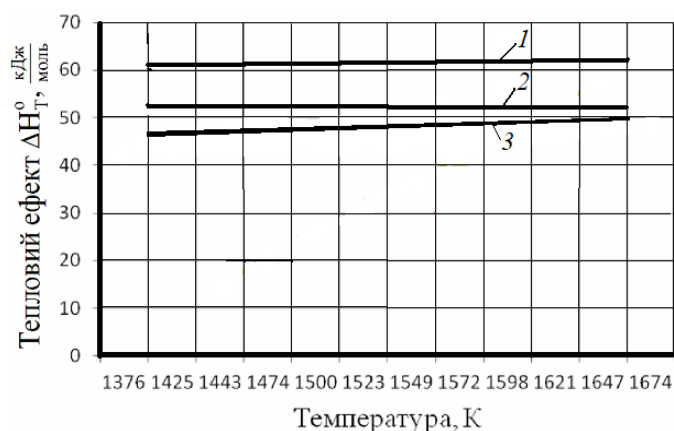
Визначаємо  $\Delta H_T^0$  (теплові ефекти) для реакції  $Mn_p \rightarrow Mn_{тв}$  для заданого температурного інтервалу 1376-1674 К (1103 °С-1401 °С):

$$\Delta H_{1376K}^0(1103^\circ C) = 60,816 \text{ кДж/моль}; \Delta H_{1674K}^0(1401^\circ C) = 61,187 \text{ кДж/моль}$$

Визначаємо  $\Delta H_T^0$  (теплові ефекти) для реакції  $Si_p \rightarrow Si_{тв}$  для заданого температурного інтервалу 1376-1674 К (1103 °С-1401 °С):

$$\Delta H_{1376K}^0(1103^\circ C) = 51,842 \text{ кДж/моль}; \Delta H_{1674K}^0(1401^\circ C) = 51,604 \text{ кДж/моль}$$

Результати оцінки теплових ефектів реакцій за різних діапазонів температур наведено на рис. 1.



1– реакція:  $Mn_p \rightarrow Mn_{тв}$ ; 2– реакція:  $Si_p \rightarrow Si_{тв}$ ; 3– реакція:  $[C]_{\%Fe} \rightarrow C_{гр}$

Рисунок 1 – Залежність теплових ефектів реакцій 1, 2, 3 від температурного фактору  
Джерело: розроблено авторами

Однією з найбільш важливих характеристик процесу кристалізації є послідовне виділення твердої фази при фазовому переході багатокомпонентних сплавів із рідкого стану в твердий стан, що має безпосередній вплив на хід теплових процесів, формування структури литого металу і виникнення ліквіації, механізм утворення яких пов'язаний з процесом кристалізації  $m(t)$  і темпом виділення твердої фази  $dm/dt(t)$  і, відповідно, прихованою теплотою кристалізації  $\Delta H(dm/dt)$ .

З урахуванням теплових ефектів послідовних фазових перетворень, які відбуваються у високоміщному чавуні виділення теплоти кристалізації  $Q_{кр}$  визначається за таким рівнянням у вигляді

$$Q_{кр} = \Delta H + Q_{\phi} + \Delta H_n, \quad (10)$$

де  $\Delta H$  – тепловий ефект перетворення рідкої фази в тверду, тобто прихована теплота кристалізації сплаву;

$Q_{\phi}$  – кількість теплоти фізичної складової кристалізації сплаву;

$\Delta H_n$  – стрибкоподібна зміна ентальпії при нонваріантних перетвореннях.

За виразом (10) можна розрахувати не тільки повну теплоту кристалізації сплаву при  $T=T_s$ , але й виявляти внесок в неї теплових ефектів різних процесів.

При використанні результатів термодинамічних розрахунків можна виконувати дослідження процесу кристалізації по зміні кількості і складу фаз, які утворюються у відповідності з виділенням теплоти фазових перетворень.

Термодинамічний аналіз процесів, які відбуваються при кристалізації чавуну на основі даних про зміну ентальпії для системи Fe-C- $X_i$  ( $X_i = \text{Si}, \text{Mn}$ ) вказує на те, що зі збільшенням вуглецю зміна ентальпії в інтервалі кристалізації змінюється не суттєво – на рівні 16 кДж/моль.

Також на основі розрахованих значень ентальпії сплаву Fe-C- $X_i$  можна визначити значення прихованої і фізичної теплоти в процесі кристалізації (рис. 2, 3, 4). При аналізі зміни фізичної теплоти, що виділяється під час кристалізації сплавів Fe-C- $X_i$  ( $X_i = \text{Si}, \text{Mn}$ ) на різних етапах виділення твердої фази (рис. 2) видно, що величина фізичної теплоти  $Q_\phi$  і її доданків ( $Q_\phi^\delta$ ,  $Q_\phi^P$ ,  $Q_\phi^\gamma$ ) залежить від інтервалу кристалізації сплаву  $\Delta T = (T_l - T_s)$  і співвідношення етапів виділення різних структурних складових ( $\Delta T_\delta$ ,  $\Delta T_P$  і  $\Delta T_\gamma$ ).

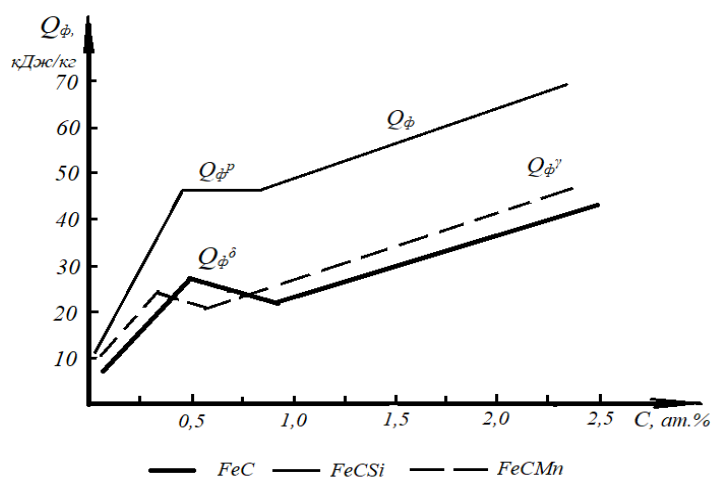


Рисунок 2 – Зміна фізичної теплоти  $Q_\phi$  кристалізації сплаву Fe-C- $X_i$  (при  $X_i = 3\%$  ат.) в залежності від вмісту вуглецю

Джерело: розроблено авторами

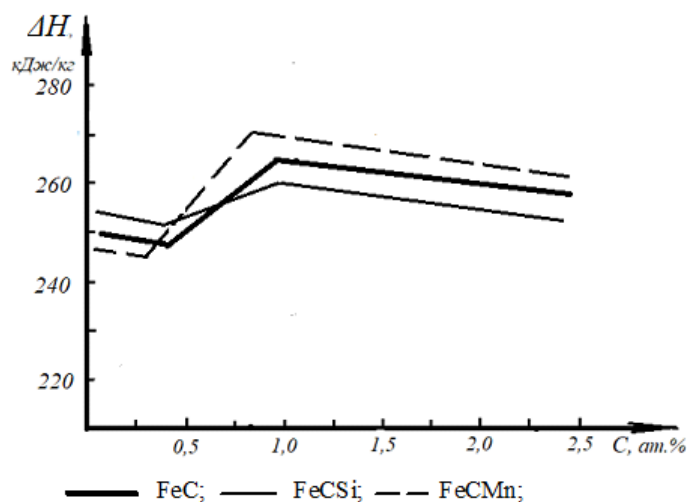


Рисунок 3 – Зміна прихованої теплоти  $\Delta H$  кристалізації сплаву Fe-C- $X_i$  (при  $X_i = 3\%$  ат.) в залежності від вмісту вуглецю

Джерело: розроблено авторами

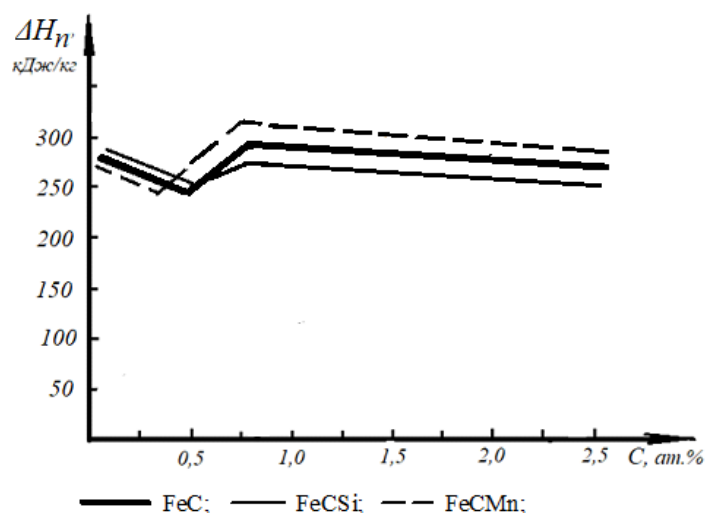


Рисунок 4 – Зміна прихованої ентальпії при нонваріантних перетвореннях  $\Delta H_n$  кристалізації сплаву Fe-C- $X_i$  (при  $X_i = 3\%$  ат.) в залежності від вмісту вуглецю  
*Джерело: розроблено авторами*

На основі термодинамічного аналізу зміни прихованої теплоти кристалізації сплаву Fe-C- $X_i$  ( $X_i = 3\%$  ат.) в залежності від вмісту вуглецю встановлено, що для передперитектичних сплавів I групи деяке зменшення виділення прихованої теплоти кристалізації пов'язано зі збільшенням вмісту вуглецю при виділенні  $\delta$ -фази. При збільшенні концентрації вуглецю в передперитектичних сплавах, а також зі зменшенням виділення  $\delta$ -фази відбувається збільшення загальної величини прихованої теплоти кристалізації сплаву завдяки розвитку перитектичної реакції, що досягає свого максимального ступеня в сплавах перитектичного складу (при  $C = C_f$ ).

Прихована теплота кристалізації буде зменшуватися зі збільшенням вмісту вуглецю у сплавах при зміні темпу виділення і кількості утворюваних твердої  $\delta$ - і  $\gamma$ -фаз. Відповідно до діаграми стану (рис. 2), значний вплив на зміну величини повної теплоти кристалізації сплаву Fe-C- $X_i$ , порівняно зі сплавом Fe-C, має і фізична теплота кристалізації, яка залежить від інтервалу кристалізації сплаву.

При проведенні термодинамічних розрахунків було виявлено залежність теплових характеристик сплавів Fe-C- $X_i$  при рівноважній кристалізації від положення на діаграмі стану: співвідношення величин  $Q^\delta$ ,  $Q^\gamma$  і  $Q^P$  знаходиться у прямій залежності від кількості твердої фази, що виділяється  $m_\delta$ ,  $m_\gamma$ ,  $m_P$ . При збільшенні вмісту вуглецю у сплаві повна теплота кристалізації збільшуватиметься, а тому, значний вплив на її зміну має фізична теплота графітизації, яка пов'язана з параметрами діаграми стану (інтервалом кристалізації тощо), що змінюються при введенні елементу  $X_i = \text{Si}, \text{Mn}$  (рис. 2).

Введення кремнію в заевтектичні сплави (1 і 5 % ат.) сприяє незначному зниженню прихованої теплоти кристалізації первинного графіту (до 3 % на кожен атомний відсоток кремнію). При зміні температурного інтервалу його виділення зменшує сумарну фізичну теплоту кристалізації  $(Q_\phi)_g$  відповідно до зменшення температурного інтервалу кристалізації сплаву, а також зростання теплоти кристалізації евтектики. Повна теплота кристалізації  $Q_{кр}$  збільшується на 2 ... 4% при додаванні 1% кремнію (рис. 2, 3, 4).

Значення теплофізичних параметрів, що одержані на основі термодинамічної моделі, сприяють уточненню розрахунків, а також, надають широкі можливості для термодинамічного аналізу впливу елементів та домішок при дослідженні потрійних та багатокомпонентних сплавів будь-якого складу.

Прихована теплота кристалізації, яка приймається при моделюванні затвердіння сплаву, коливається в межах від 100 до 285 кДж/кг для чавунів різного складу та структури.

**Висновки.** 1. Виконані термодинамічні розрахунки та визначені теплові ефекти реакцій (9) в розплаві високоміцного чавуну від їх концентрацій і температури розплаву. Використання результатів термодинамічних розрахунків дає можливість дослідити процес кристалізації по зміні кількості і складу фаз, які утворюються під впливом виділення теплоти фазових перетворень.

2. З'ясовано, що введення Si в заевтектичні сплави (від 1 до 5 % ат.) призводить до незначного зниження прихованої теплоти  $\Delta H$  кристалізації первинного графіту (до 3 % на кожен атомний відсоток Si). Внаслідок зміни температурного інтервалу його виділення викликає зменшення сумарної фізичної теплоти кристалізації  $Q_{\phi}$ .

3. Показано, що термодинамічний аналіз процесів, які відбуваються при кристалізації чавуну на основі даних про зміну ентальпії для системи Fe-C- $X_i$  ( $X_i = Si, Mn$ ) вказує на те, що зі збільшенням вуглецю зміна ентальпії в інтервалі кристалізації змінюється приблизно на 16 кДж/моль.

4. Суттєвий вплив на зміну величини повної теплоти кристалізації чавуну  $Q_{кр}$  Fe-C- $X_i$  ( $X_i = Si, Mn$ ) у порівнянні зі сплавом Fe-C має фізична теплота кристалізації. Прихована теплота кристалізації при затвердінні високоміцного чавуну знаходиться в межах від 245 до 275 кДж/кг.

## Список літератури

1. Чавун з вермикулярним графітом: навч. посіб.: навч.-метод. комплекс для студ. денної і заочної форм навчання / Кропивний В.М. та ін.; за ред. В.М. Кропивного. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. 222 с.
2. Савуляк В.І., Янченко О. Б. Економічні технології високоміцних графітізованих сплавів заліза: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 160с.
3. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: монографія. Х: Діса плюс. 2019. 282с.
4. Бубликов В.Б., Ясинський О.О., Берчук Д.М., Ясинська О.О., Моїсєєва Н.П. Вплив вмісту кремнію та марганцю на структуру високоміцного чавуну. *Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві*: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції, 21-24 вересня 2013р. Краматорськ: ДДМА, 2021. С. 29-31.
5. Структурування гетерофазних сплавів на основі чавунів / Гусачук Д.А та ін. Луцьк: ЛНТУ, 2022. 177с.
6. Високоміцний чавун зі зміцненим кремнієм та нікелем твердим  $\alpha$ -розчином / Бубликов В.Б. та ін. *Метал і литво України*. 2020. Т.28. №3(322). С.63-68.
7. Легований кремнієм високоміцний чавун та його застосування / Бубликов В.Б. та ін. *Процеси лиття*. 2020. №1. С.20-29.
8. Doherty R.D., Ferrante V., Chen Y.H. Scripta. Metall. 1986.
9. Бубликов В. Б., Бачинський Ю. Д., Берчук Д. М., Ясинський О. О. Дослідження впливу складу магнієвих лігатур і методів модифікування на структурування і механічні властивості високоміцного чавуну. *Литво. Металургія*. Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції, 21-23 травня 2019 р. Запоріжжя: АА Тандем, 2019. С. 38-39.
10. Костіна Л.Л. Чавун з вермикулярним графітом: деякі закономірності структурування і підвищення міцності. *Вестник ХНАДУ*. 2011. Вип. 54. С. 142-148.
11. Аулін, В.В., Кропивний В.М., Кузик О.В. З'ясування природи процесів структурних та фазових перетворень в залізобуглецевих сплавах на основі утворення молекулярної форми вуглецю. *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. Вип. 29. С. 94-104
12. Aulin V., Kropivny V., Kuzyk O., Lyashuk O., Bosyi M., Vovk Y., Kropivna A., Sokol V., Senyk A., Slobodyan L. The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Vermicular Graphite. *Tribology in Industry*. 2021. Vol. 43. No. 4. pp. 654-666.

13. Кропивний В.М., Босий М.В., Кузик О.В., Кропивна А.В. Термодинамічні процеси при кристалізації і формуванні ліквациї у виливках з високоміцного чавуну. *Центральноукраїнський науковий вісник: Технічні науки*. 2019. № 1(32). С. 79-86.
14. Kropivnyy V.M., Bosyi M.V., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. Specific Distribution of Thermal Effects of Graphite Forming Reactions in High-strength Cast Iron. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 48-53.
15. Аулін В.В., Кропивний В.М., Кузик О.В., Кропивна А.В., Босий М.В. Роль теплофізичних процесів формування структури високоміцних чавунів. *Вісник інженерної академії України*. 2017. №3. С.133-137.
16. Кропивний В.М., Босий М.В., Кузик О.В., Кропивна А.В., Молокост Л.А. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «FeSi», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg». *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38). ч.ІІ. С. 34-42.
17. Сабірзянов Т.Г., Кропивний В.М. Теплотехніка ливарних процесів. Кіровоград: КНТУ, 2005. 403 с.

## References

1. Kropivnyy, V.M. et al. (2019). *Chavun z vermykuliarnym hrafitom [Cast iron with vermicular graphite]*. Kropivnyy V.M. (Ed.). Kropyvnyts'kyj: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Savuliak, V.I. & Yanchenko, O.B. (2014). *Ekonomichni tekhnolohii vysokomitsnykh hrafityzovanykh splaviv zaliza [Economic technologies of high-strength graphitized iron alloys]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
3. Skoblo, T.S., Sidashenko, O.I. & Sajchuk, O.V. (2019). *Korpusni detali z chavuniv ta ikh iakisni pokaznyky [Body parts made of cast iron and their quality fasteners]*. Kh: Disa plus [in Ukrainian].
4. Bublykov, V.B., Yasyns'kyj, O.O., Berchuk, D.M., Yasyns'ka, O.O., & Moiseieva, N.P. (2021). Vplyv vmistu kremniiu ta marhantsiu na strukturu vysokomitsnoho chavunu [Influence of silicon and manganese content on the structure of high-strength cast iron]. Promising technologies, materials and equipment in foundry production: *VIII mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (21-24 veresnia 2013 roku) – the 8th international scientific and technical conference* (pp.29-31). Kramators'k: DDMA [in Ukrainian].
5. Husachuk, D.A. et al. (2022). *Strukturoutvorennia heterofaznykh splaviv na osnovi chavuniv [Structure formation of heterophase alloys based on cast iron]*. Luts'k: LNTU [in Ukrainian].
6. Bublykov, V.B. et al. (2020). Vysokomitsnyj chavun zi zmitsnenym kremniem ta nikelom tverdym  $\alpha$ -rozchynom [High-strength cast iron with hardened silicon and nickel solid  $\alpha$ -solution]. *Metal i lytvo Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 28, 3(322), 63-68 [in Ukrainian].
7. Bublykov, V.B. et al. (2020). Lehovanyj kremniem vysokomitsnyj chavun ta joho zastosuvannia [Silicon-alloyed high-strength cast iron and its application]. *Protsesy lyttia – Casting processes*, 1, 20-29 [in Ukrainian].
8. Doherty R.D., Ferrate V., & Chen Y.H. (1986). *Scripta Metall* [in English].
9. Bublykov, V.B., Bachyns'kyj, Yu.D., Berchuk, D.M. & Yasyns'kyj O.O. (2019). Doslidzhennia vplyvu skladu mahniievkykh lihatur i metodiv modyfikuvannia na strukturoutvorennia i mekhanichni vlastyvoli vysokomitsnoho chavunu [Study of the influence of the composition of magnesium ligatures and modification methods on the structure formation and mechanical properties of high-strength cast iron]. Casting. Metallurgy: *XV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (21-23 travnia 2019 roku) – The XV International Scientific and Practical Conference* (pp. 38-39). Zaporizhzhia: AA Tandem [in Ukrainian].
10. Kostina, L.L. (2011). Chavun z vermykuliarnym hrafitom: deiaki zakonmirnosti strukturoutvorennia i pidvyschennia mitsnosti [Cast iron with vermicular graphite: some regularities of structuring and increasing strength]. *Vestnyk KhNADU - Herald of the Khnadu*, 54, 142-148 [in Ukrainian].
11. Aulin, V.V., Kropivnyy, V.M. & Kuzyk, O.V. (2016). Z'iasuvannia pryrody protsesiv strukturykh ta fazovykh peretvoren' v zalizovuhletsevkykh splavakh na osnovi utvorennia molekuliarnoi formy vuhletsii [Elucidation of the nature of the processes of structural and phase transformations in iron-carbon alloys based on the formation of the molecular form of carbon]. *Zbirnyk naukovykh prats' KNTU. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of KNTU. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 29, 94-104. [in Ukrainian].
12. Aulin, V., Kropivnyy, V., Kuzyk, O., Lyashuk, O., Bosyi, M., Vovk, Y., Kropivna, A. et al. (2021). The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Vermicular Graphite. *Tribology in Industry. Vol. 43. No. 4*. pp. 654-666 [in English].

13. Kropivnyj, V.M., Bosyj, M.V., Kuzyk, O.V. & Kropivna, A.V. (2019). Termodynamichni protsesy pry krystalizatsii i formuvanni likvatsii u vylyvkakh z vysokomitsnoho chavunu [Thermodynamic processes during crystallization and liquation formation in high-strength cast iron castings]. *Tsentrал'noukrains'kyj naukovyj visnyk: Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin: Technical sciences*, 1(32), 79-86 [in Ukrainian].
14. Kropivnyi, V.M., Bosyi, M.V., Kuzyk, O.V. & Kropivna, A.V. (2020). Specific Distribution of Thermal Effects of Graphite Forming Reactions in High-strength Cast Iron. *Tsentrал'noukrains'kyj naukovyj visnyk: Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin: Technical sciences*, 3(34), 48-53 [in English].
15. Aulin, V.V., Kropivnyj, V.M., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V. & Bosyj, M.V. (2017). Rol' teplofizychnykh protsesiv formuvannia struktury vysokomitsnykh chavuniv [The role of thermophysical processes in the formation of the structure of high-strength cast irons]. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 3, 133-137 [in Ukrainian].
16. Kropivnyj, V.M., Bosyj, M.V., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V. & Molokost L.A. (2023). Do pyttannya strukturoutvorennia vysokomitsnoho chavunu pry vykorystanni diahram stanu system «FeSi», «Mg-Si» ta «Fe-Si-Mg» [On the question of structure formation of high-strength cast iron when using state diagrams of the "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg" systems]. *Tsentrал'noukrains'kyj naukovyj visnyk: Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin: Technical sciences*, 7(38), II. 34-42 [in Ukrainian].
17. Sabirzianov, T. H. & Kropivnyj, V.M. (2005). Teplotekhnika lyvarnykh protsesiv [Heat engineering of foundry processes]. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].

**Volodymyr Kropivnyi**, Prof., PhD tech. sci., **Mykola Bosyi**, Senior Lecturer, **Olexandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Alena Kropivna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ludmyla Molokost**, Lecturer  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Thermodynamic patterns of structure formation of high-strength cast iron during modification and under different conditions of melt crystallization**

The article presents the results of the analysis of thermodynamic regularities of structure formation of high-strength cast iron during modification and under different conditions of melt crystallization. The concept of the formation of graphite nuclei in high-strength cast iron is proposed. It has been established that during the modification of molten iron, as a result of a significant redistribution of all elements dissolved in it, impurities (sulfur, phosphorus, etc.) are removed, which makes it possible to obtain the structure of cast iron with nodular graphite with the use of modifiers. During the crystallization of cast iron with the release of austenite, direct microliquation of silicon with a distribution coefficient less than one is characteristic, manganese is more evenly distributed in the metal, and carbide stabilizing elements are treated in the liquid phase. A thermodynamic calculation of the thermal effects of the reactions of the release of graphite from carbon dissolved in iron, the transition of silicon and manganese from a liquid state to a solid state in the process of forming high-strength cast iron is presented. The physical and latent heat of crystallization of high-strength cast iron was determined by the enthalpy method.

Thermodynamic calculations were performed and the thermal effects of reactions (9) in the melt of high-strength cast iron were determined, depending on their concentrations and the temperature of the melt. Using the results of thermodynamic calculations makes it possible to study the crystallization process by changing the number and composition of phases that are formed under the influence of heat release of phase transformations. It was found that the introduction of Si into pre-eutectic alloys (from 1 to 5% at.) leads to a slight decrease in the latent heat  $\Delta H$  of crystallization of primary graphite (up to 3% for each atomic percentage of Si). As a result of the change in the temperature interval, its release causes a decrease in the total physical heat of crystallization  $Q_F$ . It is shown that the thermodynamic analysis of the processes that occur during the crystallization of cast iron based on the data on the change in enthalpy for the system Fe-C-Xi (Xi = Si, Mn) indicates that with an increase in carbon, the change in enthalpy in the crystallization interval changes approximately by 16 kJ/mol. The physical heat of crystallization has a significant effect on the change in the value of the total heat of crystallization of cast iron  $Q_{kr}$  Fe-C-Xi (Xi = Si, Mn) in comparison with the Fe-C alloy. The latent heat of crystallization during solidification of high-strength cast iron is between 245 and 275 kJ/kg.

**high-strength cast iron, structuring of cast iron, spheroidal graphite, fluctuation, diffusion, Gibbs energy, thermal effect, heat of crystallization**

*Одержано (Received) 25.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.02.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.81

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.37-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.37-42)

Ю.А. Невдаха, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук,  
В.В. Пирогов, доц., канд. ф.-м. наук, Н.А. Невдаха, асист., М.О. Васильковський, студ.  
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,  
e-mail: uanevdakha@ukr.net

## Визначення запасу міцності деталей при нестандартній зміні напружень

В сучасному машинобудуванні широко використовують машини, механізми, верстати та інше обладнання, яке працює при змінних навантаженнях. Під час виконання роботи від дії змінних навантажень в деталях машин відповідно виникають і зміни напруження. Невірно визначений запас міцності деталей при нестандартній зміні напружень призведе до поломок та руйнування, а також і аварій машин. Таким чином виникає необхідність в більш точному визначенні запасу міцності у деталях, в яких максимальні напруження циклу, змінюються за ступінчастим законом.

**міцність, напруження, число циклів, запас міцності, руйнування деталі, навантаження**

**Постановка проблеми.** При виконанні розрахунків деталей, в більшості випадків, запас міцності визначають при одночасній дії змінних за величиною нормальних та дотичних напружень, що мають різні характеристики циклів напружень. Ці розрахунки справедливі у випадку, коли амплітуди зміни напружень не змінюються в часі, тобто для встановленого або стаціонарного режиму. Однак у ряді випадків можна зустрітися з таким становищем, коли амплітуди циклів зміни напруження у часі не залишаються постійними, тобто так званими нестаціонарними режимами. Тому виникає необхідність у більш детальному дослідженні запасу міцності при нестандартній зміні напружень.

**Аналіз попередніх досліджень.** Дослідженню запасу міцності присвячено багато робіт вітчизняних і зарубіжних науковців. В роботах В.С. Павлова [1, 2, 3] виведено формули для визначення коефіцієнта запасу та граничного значення критерію найбільшого дотичного напруження, а також запропоновано визначати коефіцієнт запасу шляхом порівняння критеріїв міцності, що відповідають подібним граничному і робочому напруженим станам. В роботах Ю.А. Невдахи, [4, 5] досліджено розрахунок міцності зтягнутого різьбового з'єднання, що працює при змінних навантаженнях, конкретизовано і доповнено загальні відомості за основними видами руйнування зубчастих коліс. В працях Л.М. Березіна [6, 7] приведено систематизацію традиційних методів розрахунку деталей на міцність, довговічність та надійність, запропоновано стратегію вибору методу поділу деталей на певні групи, що сприяє забезпеченню заданого рівня надійності та мінімізації маси деталей. У працях Ф.М. Бурдекіна [8, 9] узагальнено основні принципи методів проектування допустимого напруження та граничного стану, а також пояснюється спосіб впливу різних рівнів невизначеності, які враховуються шляхом використання часткових коефіцієнтів безпеки при проектуванні граничного стану та розглянуто загальний вплив динамічного навантаження на конструкції деталей. Результатів дослідження по визначенню міцності при нестандартних напруженнях у літературних джерелах не виявлено.

**Постановка завдання.** Метою є дослідження процесів нестандартного режиму зміни напружень, які змінюються за ступінчастим законом та отримання числа циклів, після яких відбувається руйнування деталі. Завдання полягає в дослідженні величини еквівалентного напруження, за параметрами якого визначається коефіцієнт запасу міцності.

**Результати вирішення основних завдань проблеми.**

Найбільш загальний випадок нестандартного режиму зміни нормального напруження наведено на рис. 1. У режимі, що розглядається, максимальні напруження циклу змінюються за ступінчастим законом, причому кожній величині максимального напруження відповідає певна кількість циклів його дії. Так, наприклад, число циклів  $N_1'$  відповідає дії максимального напруження  $\sigma_{\max 1}$ ,  $N_2'$  відповідає  $\sigma_{\max 2}$  і так далі. Окремі значення максимального напруження можуть бути вищими за межу витривалості. Вважаємо лише, що вони завжди менші за межу плинності.

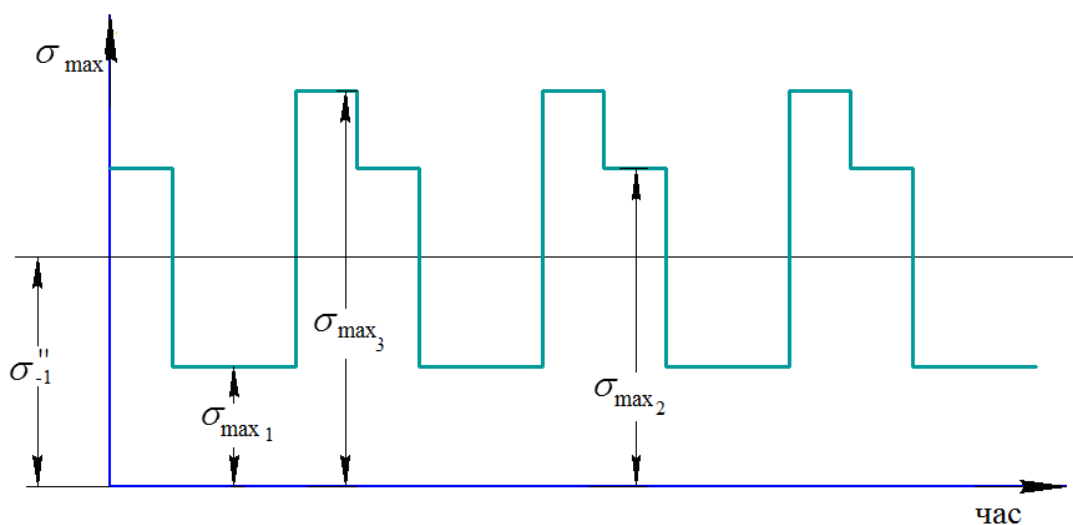


Рисунок 1- Загальний випадок нестаціонарного режиму зміни напружень

*Джерело: розроблене авторами*

Позначимо через  $N_i'$  загальне число циклів дії напружень ( $\sigma_{\max i}$ ), а через  $N_i$  – число циклів, що відповідає руйнуванню деталі при дії того самого максимального напруження ( $\sigma_{\max i}$ ).

В процесі розрахунку між цими величинами була прийнята наступна залежність:

$$\sum_{i=1}^m \frac{N_i'}{N_i} = 1, \quad (1)$$

де  $m$  – число різних за величиною максимальних напружень, що характеризують навантаження, за один період.

Введемо еквівалентне напруження  $\sigma_{екв}$ , тобто таке максимальне напруження симетричного циклу при стаціонарній зміні напружень, що дає ту ж міцність деталі, що і діюче напруження при нестаціонарному режимі зміни. Число циклів  $N_{\sigma}$ , відповідає напруженню  $\sigma_{екв}$ , і є базовим числом циклів.

Скориставшись рівнянням кривої витривалості

$$\sigma_{i \max}^n N_i = \text{const},$$

де  $N_i$  - загальна кількість циклів дії максимального напруження  $\sigma_{i \max}$ , яке витримує зразок;

$n$  - показник ступеня, що характеризує нахил лівої гілки кривої втоми.

Можна записати таку рівність (рис. 2):

$$\sigma_{екв}^n N_{\sigma} = (\sigma_{\max})_i^n N_i = \text{const}. \quad (2)$$

Помноживши чисельник і знаменник лівої частини рівняння (1) на  $(\sigma_{\max})_i^n$  і враховуючи рівність (2) отримуємо:

$$\sum_{i=1}^m \frac{(\sigma_{\max})_i^n \cdot N_i'}{\sigma_{екв}^n \cdot N_{\sigma}} = 1.$$

Звідси можна знайти величину еквівалентного напруження:

$$\sigma_{екв} = \sqrt[n]{\frac{1}{N_{\sigma}} \sum_{i=1}^m (\sigma_{\max})_i^n N_i'}.$$

Тоді коефіцієнт запасу міцності може бути визначений за параметрами еквівалентного циклу навантаження як відношення межі витривалості  $\sigma_{-1}''$  до еквівалентного напруження  $\sigma_{екв}$ , тобто

$$n = \frac{\sigma_{-1}''}{\sigma_{екв}} = \frac{\sigma_{-1}''}{\sqrt[n]{\frac{1}{N_{\sigma}} \sum_{i=1}^m (\sigma_{\max})_i^n N_i'}}. \quad (3)$$

Оскільки еквівалентний стаціонарний режим зміни напруження забезпечує той же запас міцності, що і нестационарний режим, що розглядається, тоді за формулою (3) маємо можливість визначити запас міцності і для останнього режиму. Показник ступеня  $n$  і базове число циклів  $N_{\sigma}$  визначаються кривою витривалості. Як уже вказувалося, формула (3) справедлива для того випадку, коли максимальні напруження не перевищують межі текучості.

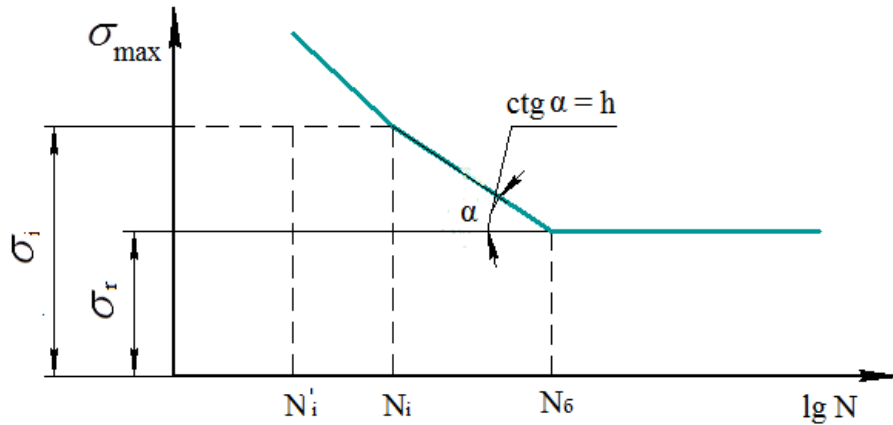


Рисунок 2 – Крива витривалості

Джерело: на підставі [10]

Визначаємо коефіцієнт запасу довговічності. Для цього позначимо через  $v_i$  відносну тривалість навантаження з максимальним напруженням ( $\sigma_{\max i}$ ), тобто

$$v_i = \frac{N_i'}{N_{\text{заг}}},$$

де  $N_{\text{заг}}$  - загальна кількість циклів до руйнування деталі при нестационарному режимі зміни напружень. Тоді

$$\sum_{i=1}^m \frac{N_i'}{N_i} = N_{\text{заг}} \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{N_i} = 1.$$

Звідки

$$N_{\text{заг}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{v_i}{N_i}}. \quad (4)$$

За формулою (4) можна розрахувати число циклів, після яких відбувається руйнування деталі при наявності навантаження, характерних для нестационарних режимів. При цьому повинні бути відомі  $v_i$  і  $N_i$ . Величина  $N_i$  визначається по кривій витривалості.

Якщо із умови експлуатації деталі відомо, що вона повинна витримувати без руйнування  $N$  циклів, то коефіцієнт запасу по довговічності дорівнює:

$$n_d = \frac{N_{\text{заг}}}{N} = \frac{1}{N \sum_{i=1}^m \frac{v_i}{N_i}}. \quad (5)$$

Формули (3), (4) і (5) можуть бути використанні для будь яких нестационарних режимів зміни напружень, незалежно від характеру останніх. Аналогічно можуть бути записані і відповідні формули для дотичних напружень.

**Висновки.** В результаті теоретичних досліджень розрахували число циклів, після яких відбувається руйнування деталі при дії навантажень, характерних для нестационарних режимів роботи та визначили коефіцієнт запасу міцності по довговічності.

## Список літератури

1. Павлов В.С. Визначення коефіцієнта запасу при використанні критерію найбільшого дотичного напруження. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. №2. С. 19-25.
2. Павлов В.С. Вибір критерію міцності в машинобудуванні. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2006. №6. С. 172-176.
3. Павлов В.С. Визначення коефіцієнта запасу при використанні критерію найбільшого дотичного напруження. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. №1. С. 25-31.
4. Невдаха Ю.А., Пирогов В.В., Невдаха Н.А. та ін. Збільшення запасу міцності різьбових з'єднань, що працює при змінних навантаженнях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6 (37). С. 30-36.
5. Невдаха, Ю. А., Пукалов В. В., Невдаха А. Ю. До руйнування зубців зубчастих коліс. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25. ч. 1. С. 224-229.
6. Березін Л.М. До розрахунків деталей на міцність, довговічність та надійність. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2018. Вип. 63. С. 22-26.
7. Березін Л.М. Розрахунки деталей на надійність та довговічність за критерієм втомленісної міцності. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2018. Вип. 5(126). С. 56-62.
8. Burdekin F.M. General principles of the use of safety factors in design and assessment. *Engineering failure analysis*. 2007. Vol. 14. № 3. P. 420-433.
9. Burdekin F.M, Zhao W., Kuntiyawachai K., Xu W.G. Assessment of Structural Integrity under Dynamic Loading. *Holovna Osnovni inzhenerni materialy Klyuchovi inzhenerni materialy*. 2001. Vol. 204-205. P. 3-16.
10. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: підручник. Київ: «Вища школа». 1993. 550 с.

## References

1. Pavlov, V.S. (2011). Vyznachennia koefitsiienta zapasu pry vykorystanni kryteriiu najbil'shoho dotychnoho napruzhenia [Determination of the margin factor when using the criterion of the largest tangential stress]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 2, 19-25 [in Ukrainian].
2. Pavlov V.S. (2006). Vybir kryteriiu mitsnosti v mashynobuduvanni [Selection of strength criteria in mechanical engineering] *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu - Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 6, 172-176 [in Ukrainian].
3. Pavlov V.S. (2010). Vyznachennia koefitsiienta zapasu pry vykorystanni kryteriiu najbil'shoho dotychnoho napruzhenia [Determination of the margin factor when using the criterion of the largest tangential stress]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu - Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 1, 25-31 [in Ukrainian].
4. Nevdaha, Yu.A., Pirogov, V.V., Nevdaha, N.A. et al. (2022). Zbil'shennia zapasu mitsnosti riz'bovykh z'iednan', scho pratsiuie pry zminnykh navantazhenniakh [Increasing the margin of safety of threaded connections operating under variable loads]. *Tsentralkoukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian Scientific. Technical sciences*, 6, (37), 30-36 [in Ukrainian].
5. Nevdaha, Yu. A., Pukalov V. V. & Nevdaha A. Yu. (2012). Do rujnuvannia zubtsiv zubchastykh kolis. [Before the destruction of the teeth of the gear wheels]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil'skohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia - Collection of scientific papers of the Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 25, 1, 224-229 [in Ukrainian].

6. Berezin, L.M. (2018). Do rozrakhunkiv detalej na mitsnist', dovhovichnist' ta nadijnist' [To the calculations of details for strength, durability and reliability]. *Mizhvuzivs'kyj zbirnyk «Naukovi notatky» - Interuniversity collection "Scientific notes"*, 63, 22-26 [in Ukrainian].
7. Berezin, L.M. (2018). Rozrakhunky detalej na nadijnist' ta dovhovichnist' za kryteriiem vtomlenisnoi mitsnosti [Calculations of parts for reliability and durability according to the criterion of fatigue strength]. *Visnyk Kyivs'koho natsional'noho universytetu tekhnolohij ta dyzajnu - Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design*, 5, (126), 56-62 [in Ukrainian].
8. Burdekin, F.M. (2007). General principles of the use of safety factors in design and assessment. *Engineering failure analysis*, Vol. 14. № 3. P. 420-433 [in English].
9. Burdekin F.M., Zhao W., Kuntiyawachai K., Xu W.G. (2001). Assessment of Structural Integrity under Dynamic Loading. *Holovna Osnovni inzhenerni materialy Klyuchovi inzhenerni materialy*, Vol. 204-205, P. 3-16. [in English].
10. Pavlyshe, V.T. (1993). *Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalej mashyn [Fundamentals of design and calculation of machine parts]*. Kyiv: «Vyscha shkola» [in Ukrainian].

**Yurii Nevdakha**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Pirogov**, Assoc. Prof., PhD f.-m. sci., **Natalia Nevdakha**, assistant, **Mykhailo Vasylykovskyy**, student  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi*,

### **Determination of the safety margin of parts with non-standard stress changes**

In modern mechanical engineering, the search for machines, mechanisms, machine tools and other equipment that works under variable loads is widely conducted. During work from the actions of variable loads in machine parts according to the result and changes in stress. Incorrectly defined margin of safety of parts with non-standard changes will lead to breakdowns and destruction, as well as machine accidents. Thus, a more precisely defined safety margin is required in parts in which the maximum stress cycles vary according to a step law. The purpose of the article is to study the processes of a non-standard mode of voltage change, which change according to a step law and receive the number of cycles after which the destruction of the part occurs. The task takes place in the investigated values of the equivalent stress, according to the parameters of which the coefficient of production of the safety margin under the action of non-standard stresses.

When performing the calculations of the parts, ultimately, the margin of safety during simultaneous action is changed to the value of normal and tangential stresses, which have different characteristics of stress cycles. These calculations are valid in the case when the amplitude changes do not vary over time, that is, for the established or stationary mode. However, in a number of reports, one can encounter such a situation when changes in the amplitude of stress cycles over time do not remain constant, that is, the so-called non-stationary regimes. Therefore, in a more detailed study, there is a margin of safety for non-standard stress changes.

As a result of theoretical studies, the number of cycles after which parts are destroyed under the action of a load, characteristic of non-stationary modes of operation, is calculated and the coefficients of the safety margin of durability are determined.

**strength, stress, number of cycles, margin of safety, destruction of the part, load**

*Одержано (Received) 12.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.316.722

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.43-54](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.43-54)**О.Ф. Баранюк**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,**м. Кропивницький, Україна**e-mail: baranyuk60@gmail.com***В.М. Каліч**, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: vmk041954@gmail.com*

### Розробка цифрового інтерфейсу для керування імпульсним блоком живлення

Викладено результати розробки цифрового інтерфейсу до імпульсних блоків живлення з аналоговим контуром керування. Показано, що регулювання напруги блоку живлення можна здійснити шляхом ін'єкції струму у вихідний вимірювальний подільник напруги. Запропонований метод дозволяє одержати лінійну залежність приросту вихідної напруги від величини додаткового струму. Для цифрового керування блоком живлення може бути використаний набір ключів на польових транзисторах або цифро-аналоговий перетворювач.

**імпульсний блок живлення, керування, інтерфейс, зворотний зв'язок, цифровий код**

**Постановка проблеми.** Сучасна людина використовує багато електронних та побутових пристроїв, які потребують електричного живлення. Блоки живлення з фіксованою вихідною напругою використовуються для живлення пристроїв, які потребують чітко визначеної напруги, зокрема, ноутбуків, планшетів, сканерів, роутерів та ін. Вони можуть бути лінійними або імпульсними, хоча останнім часом використовують переважно імпульсні блоки живлення як більш ефективні і менш габаритні. Лабораторні блоки живлення є універсальними приладами, призначеними для розробників електронної апаратури, інженерів і науковців. Вони дозволяють плавно змінювати вихідну напругу в заданому діапазоні, мають ряд додаткових корисних функцій, таких як, вимірювання та індикація напруги, струму, потужності, обмеження струму, захист від перевантажень та коротких замикань. Отже, такі прилади, відповідно, більш складні і значно дорожчі.

Імпульсні блоки живлення (ІБЖ) з аналоговим контуром зворотного зв'язку відомі вже кілька десятиліть, їх теорія, схемотехніка і елементна база добре відпрацьовані. Провідні виробники електронних компонентів пропонують широкий асортимент напівпровідникових приладів, у тому числі спеціалізованих контролерів, а також програмні засоби для проектування блоків живлення. Аналогові системи керування імпульсними блоками живлення це перевірені часом, доступні, надійні і стабільні рішення. Вони добре знайомі інженерам, відносно просто діагностуються і ремонтуються.

Незважаючи на очевидні переваги, аналогове керування джерелом живлення не має деяких корисних можливостей, які могли б запропонувати відповідні цифрові системи. Найважливішим недоліком є те, що вони негнучкі. Внесення будь-яких змін до параметрів вимагає зміни схеми, конструкції або заміни обладнання. Такі блоки живлення найкраще підходять для автономних застосувань, які не вимагають модифікацій, моніторингу та зовнішнього керування.

Імпульсні блоки живлення з аналоговим керуванням погано пристосовані для зміни напруги. Вони або взагалі не мають регулювання вихідної напруги, або допускають незначне підлаштування напруги за допомогою регулювального потенціометра. Будь-який інтерфейс для зовнішнього керування відсутній. Разом з тим, бувають випадки, коли потрібно мати недорогий блок живлення з можливістю керувати його вихідною напругою за заданою програмою. Такі рішення стають привабливими й актуальними у зв'язку з доступністю на ринку численних мікроконтролерів, які можна використовувати для керування різними електронними пристроями, у тому числі для побудови автоматизованих зарядних пристроїв.

Системи під керуванням мікроконтролера можуть контролювати та зберігати технологічні параметри, керувати обладнанням, змінювати налаштування та алгоритми роботи, їх легко модифікувати та перепрограмувати. Джерела живлення з цифровим керуванням мають багатшу функціональність, гнучкість та універсальність. Вони допускають дистанційне керування, довгостроковий моніторинг та сигналізацію, встановлення обмежень на струм та потужність. Звичайно, є й певні труднощі, пов'язані з переходом на цифрові технології. Цифрові системи з програмним забезпеченням значно дорожчі, їх складніше розробляти, тестувати, обслуговувати й ремонтувати.

Існує також компромісний підхід, який поєднує переваги як аналогового, так і цифрового керування. Цей підхід передбачає використання аналогового контролера блоку живлення, доповненого цифровим інтерфейсом. Аналоговий контролер забезпечує надійну і стабільну роботу, тоді як цифровий інтерфейс надає канал зв'язку для моніторингу та керування за допомогою мікроконтролера.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема розробки, аналізу, дослідження, ремонту та модернізації імпульсних джерел живлення присвячено досить багато публікацій вітчизняних і зарубіжних дослідників і практиків. Однією з кращих в галузі електроніки можна, без сумніву, назвати книгу Пола Горовіца та Вінфілда Хілла «Мистецтво електроніки» [1], відому всебічним висвітленням питань електроніки та безліччю прикладів практичних схем. Глава 9 цієї книги повністю присвячена лінійним та імпульсним джерелам живлення.

Відомі потужні виробники електроніки Microchip Technology Inc., Texas Instruments Inc., Analog Devices, Inc., ON Semiconductor періодично випускають довідкові та методичні матеріали для розробників електронних пристроїв (Application Report, Reference Manual), у тому числі так звані Нотатки щодо застосування (Application Notes), в яких детально висвітлюють окремі питання теорії та розробки імпульсних блоків живлення [2–4].

Сучасні імпульсні джерела живлення являють собою досить складні і ретельно розраховані системи стабілізації із зворотними зв'язками. В роботах [2, 5, 6] розглядаються різні методи керування імпульсними перетворювачами постійної напруги, зокрема керування за напругою VMC, керування за струмом CMC, пропорційно-інтегрально-диференціальне керування PID, ковзне керування SM та керування з нечіткою логікою FLC.

Загальні питання побудови ІБЖ зворотного ходу (Flyback), режими неперервного та розривного струму, способи керування на первинній і вторинній стороні викладені в публікаціях [2, 4, 5, 7].

Ряд робіт присвячено питанням теорії та розробки аналогових пристроїв керування ІБЖ. Зокрема роботи [8, 9] розглядають принципи побудови та частотної корекції зворотного зв'язку ІБЖ з гальванічною ізоляцією, побудованих на основі високоточного програмованого джерела опорної напруги TL431 та більш сучасного ATL431LI з низьким споживанням.

В роботі [10] представлено опис лабораторного джерела живлення з регулюванням вихідної напруги в межах 1,3–30 В з дискретністю 0,1 В, що складається з попереднього DC-DC перетворювача на LM2576, регулятора на ОП та мікроконтролера STM32, модуля управління та індикації. В цій схемі контролер реалізує алгоритм роботи і використовується для подачі установки на основний конвертор.

У статті [11] наведена реалізація блоку живлення 0–25 В з цифровим керуванням на основі доступної елементної бази з використанням лінійного стабілізатора напруги LM317 та мікросхеми цифро-аналогового перетворювача MCP4725 з опорною напругою живлення +5 В. Для того, аби основний регулятор LM317 менше грівся, на його вхід подається напруга від імпульсного перетворювача на XL4005, яка завжди вища від вихідної напруги LM317 лише на 2,5 В.

Останнім часом значна кількість публікацій присвячена питанням розробки ІБЖ з цифровими регуляторами, роль яких виконує мікроконтролер, процесор цифрових сигналів або спеціалізований контролер ІБЖ з вбудованим мікроконтролером. З'явився навіть новий термін «цифрова енергія» (Digital Power), який насправді позначає цифрове керування джерелом живлення.

Питання розробки ІБЖ на основі мікроконтролера розглядаються в публікаціях [4, 7, 12, 13] та багатьох інших.

Так, в роботі [4] детально розглядається процес проектування ІБЖ на основі контролера PIC16F1768 як основного ШІМ-регулятора, описано режими керування за напругою і струмом.

Стаття [7] пропонує цифровий контролер для ІБЖ зворотного ходу з м'яким перемиканням ключів з обох сторін трансформатора. Схема забезпечує контроль переходу через нуль за струмом ZCS на первинній стороні і напругою ZVS на вторинній, що дає суттєву економію енергії.

Стаття [12] присвячена розробці цифрового блоку керування на основі продуктивного МК STM32G474RET6 як універсальної основи для потужних джерел живлення зі складними топологіями. В системі використано ПІД-алгоритм керування перетворювачем, фільтрацію із скінченою імпульсною характеристикою в каналі зворотного зв'язку, 16-розрядний таймер для формування ШІМ-сигналу та 12-розрядний АЦП мікроконтролера.

В роботі [13] представлено результати розробки і моделювання понижуючого DC-DC перетворювача на основі МК Arduino, драйвера IR2110 та MOSFET-ключа K2837. Використання МК забезпечує кращу гнучкість у проектуванні системи керування для різних напруг живлення та навантаження, а також низьку вартість і кращу реакцію системи на збурення.

Разом з тим, в [4] наголошується, що далеко не кожний МК доцільно використовувати для керування ІБЖ, тому, що типовий МК з чисто програмним керуванням не завжди встигає своєчасно реагувати на зовнішні події. Значно кращі результати дають МК, що мають незалежну від ядра периферію (Core Independent

Peripheral, CIP), зокрема компаратори, конфігуровані логічні елементи (Configurable Logic Cell, CLC), апаратні таймери (HLT), детектор нульового переходу (ZCD), тощо.

Є також певна кількість публікацій, у яких розглядаються питання програмованого керування існуючими аналоговими ІБЖ.

В роботі [10] представлено опис лабораторного джерела живлення, у якому мікроконтролер STM32 керує режимом основного імпульсного перетворювача напруги. Контролер вимірює напругу на виході і струм споживання та формує опорну напругу для підсилювача сигналу похибки, побудованого на операційному підсилювачі. Сигнал з контролера виводиться через вихід ШІМ та низькочастотний фільтр.

У доповіді про застосування від Texas Instruments [14] як загальний підхід розглядається подача струму у дільник вихідної напруги. Пропонується здійснювати це двома способами: через звичайний АЦП і через струмовий АЦП. З метою формування заданої величини струму [15] пропонує схему програмованого споживача струму на основі ЦАП, операційного підсилювача (ОП), транзистора і резисторного датчика струму.

В [16] описано приклади застосування цифрових потенціометрів, проаналізовано їх особливості та недоліки, показано як можна замінити схеми з цифровими потенціометрами на відповідні схеми з ЦАП сімейства DACx3401, які мають вбудоване джерело опорної напруги та вихідний буферний ОП.

Огляд літератури показує, що наукові публікації та технічні рекомендації виробників електроніки більшою мірою зосереджені на питаннях розробки нерегульованих джерел живлення із заданими параметрами, в той час як питанням керування вихідною напругою приділяється значно менше уваги.

**Постановка завдання.** Бувають випадки, коли потрібно змінювати вихідну напругу існуючого імпульсного джерела живлення. Завданням дослідження є розробка практичної схеми інтерфейсу для цифрового керування вихідною напругою імпульсного блоку живлення.

**Виклад основного матеріалу.** Переважна більшість імпульсних джерел живлення призначені для використання з конкретними приладами, мають постійну стабілізовану вихідну напругу і не пристосовані для регулювання вихідної напруги. Деякі з ІБЖ допускають підлаштування вихідної напруги в незначних межах. Досить часто виникає необхідність програмно змінювати вихідну напругу ІБЖ.

Імпульсний блок живлення з аналоговим контролером являє собою замкнену систему автоматичного керування вихідною напругою, в якій зворотний зв'язок організовано шляхом вимірювання вихідної напруги, визначення величини і знаку її відхилення від заданої (похибки) з метою подальшої зміни стану регулюючого силового елемента, роль якого, у більшості випадків, виконує польовий або біполярний транзистор з імпульсним трансформатором.

Розглянемо структурну схему типового імпульсного блоку живлення зворотного ходу (Flyback) ізольованого типу, представлену на рис. 1. На схемі опущено вхідні кола змінного струму, що зазвичай включають ЕМІ-фільтр та випрямляч.

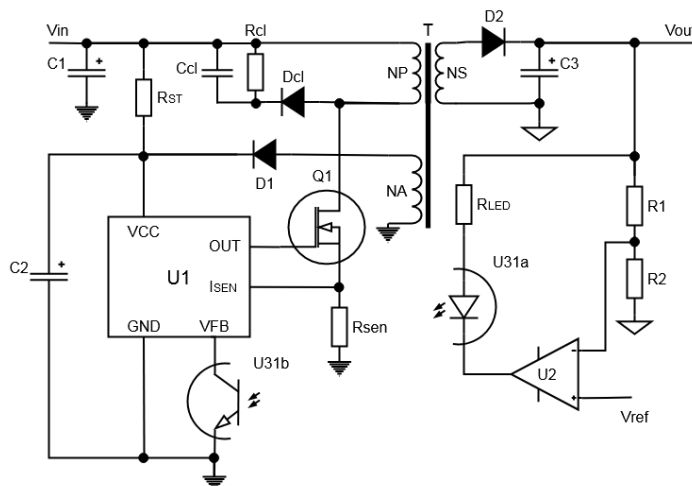


Рисунок 1 – Структурна схема зворотного імппульсного блока живлення

*Джерело: розроблено авторами*

Випрямлена діодним мостом напруга мережі заряджає високовольтний накопичувальний конденсатор C1. Починаючи з цього конденсатора всі імппульсні блоки живлення можна вважати перетворювачами постійної напруги (DC-DC). Основними елементами ІБЖ є імппульсний трансформатор Т, силовий транзистор Q1 та вторинний діодний випрямляч D2. Насправді, ІБЖ зворотного ходу використовує обмотку NP як накопичувальний дросель, але він має також одну або кілька ізольованих вторинних обмоток, тому його часто називають трансформатором. Усіма процесами перетворювача керує контролер U1. Він має вбудований генератор і схему формування ШІМ-сигналу на виході OUT. Вихідний сигнал контролера періодично відкриває і закриває ключовий транзистор Q1. Коли транзистор відкритий (прямий хід), енергія з конденсатора C1 передається і накопичується в первинній обмотці NP. Коли транзистор закривається, енергія вивільняється, передається у вторинну обмотку NS, напруга вторинної обмотки випрямляється діодом D2 і подається на вихід. Конденсатор C3 згладжує пульсації вихідної напруги.

З метою стабілізації вихідної напруги схема має головний контур зворотного зв'язку, утворений подільником напруги R1–R2, підсилювачем сигналу похибки U2, джерелом опорної напруги (ДОН) Vref, оптронним ізолятором U3, входом зворотного зв'язку VFB основного контролера U1. Оскільки більшість високоточних джерел опорної напруги мають напругу 2,5 В (рідше 1,25 В або іншу), вихідна напруга ІБЖ ділиться подільником напруги R1–R2 до величини, рівної напрузі ДОН. В такому разі робота системи стабілізації напруги зводиться до підтримки напруги в середній точці подільника напруги, рівної напрузі ДОН. Таким чином, головний контур зворотного зв'язку забезпечує керування вихідним сигналом за напругою.

Схема має ще один контур зворотного зв'язку, утворений датчиком струму Rsen, входом Isen, ШІМ-контролером основного контролера U1, транзистором Q1. Це контур керування за струмом ключового транзистора. Він виконує обмежувальні та захисні функції для транзистора Q1. Коли струм транзистора перевищує задану величину, падіння напруги на резисторі Rsen перевищує поріг спрацювання, визначений для Isen, і транзистор Q1 примусово закривається. Цей контур працює в кожному циклі роботи ШІМ-контролера.

Якщо компоненти схеми, крім контуру зворотного зв'язку, представити як перетворювач однієї постійної напруги в іншу DC-DC, то отримаємо узагальнену схему будь-якого блоку живлення із зворотним зв'язком за напругою (рис. 2).

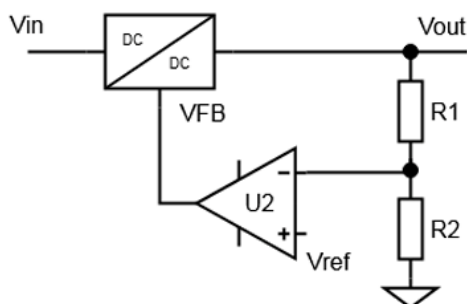


Рисунок 2 – Узагальнена схема блока живлення

Джерело: розроблено авторами

Ця схема є базовою для побудови інтерфейсу керування блоком живлення. Слід відзначити, що у більшості сучасних ІБЖ дуже рідко використовують окреме ДОН і операційний підсилювач. Існують прості, дешеві і надійні схеми на зразок програмованого стабілізатора TL431 [8, 9], що містить вбудоване прецизійне ДОН, операційний підсилювач і транзистор (рис 3, а).

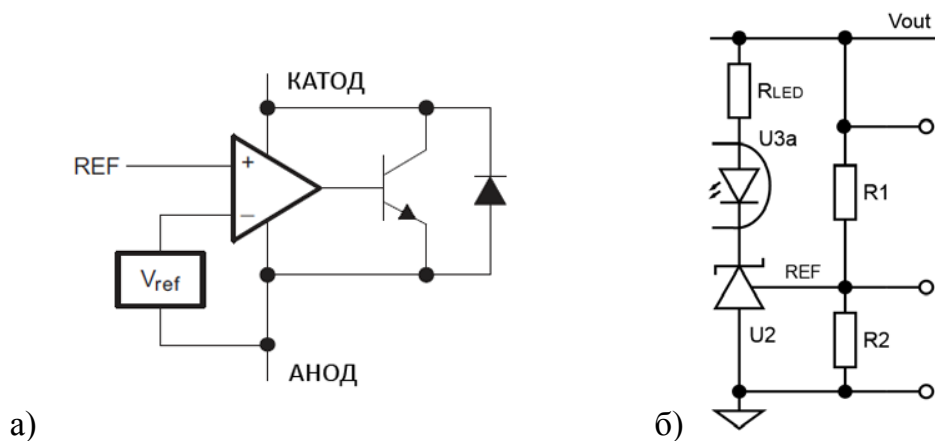


Рисунок 3 – Програмоване ДОН (а) та його застосування в блоці живлення (б)

Джерело: розроблено авторами на підставі [8]

Напруга вбудованого ДОН TL431 дорівнює 2,5 В, отже, схема на рис. 3, б веде себе таким чином, щоб підтримувати на вході REF напругу 2,5 В, оскільки ОП, охоплений від'ємним зворотним зв'язком намагається утримувати між своїми входами напругу, близьку до 0. Основний контур зворотного зв'язку включає оптрон U3, основний контролер ІБЖ U1, транзисторний ключ Q1, трансформатор Т і випрямляч D2 (рис. 1). При зменшенні вихідної напруги блоку живлення TL431 збільшує провідність внутрішнього транзистора і струм, який проходить через світлодіод оптрона. Фототранзистор оптрона U3, підключений до входу зворотного зв'язку VFB основного регулятора ІБЖ, зменшує напругу VFB, у відповідь контролер U1 збільшує робочий цикл ШІМ-контролера і відновлює напругу на виході БЖ.

Оскільки вбудоване ДОН знаходиться всередині мікросхеми і недоступне для регулювання, єдино можливим залишається впливати на схему через вхід REF TL431

або з'єднаний із ним подільник напруги R1–R2. Змінюючи значення резисторів R1, R2 дільника, можна змінювати вихідну напругу всього БЖ. Резистори подільника напруги можна теоретично збільшувати або зменшувати. Практично нас цікавлять методи, що передбачають мінімальне втручання в схему існуючого БЖ. Тому розглянемо лише методи, що використовують зменшення резисторів шляхом паралельного під'єднання іншого резистора. Схемотехнічно простіше підключати резистор на «низькій стороні», тобто паралельно нижньому резистору R2. Розглянемо, до якого ефекту призводить таке підключення.

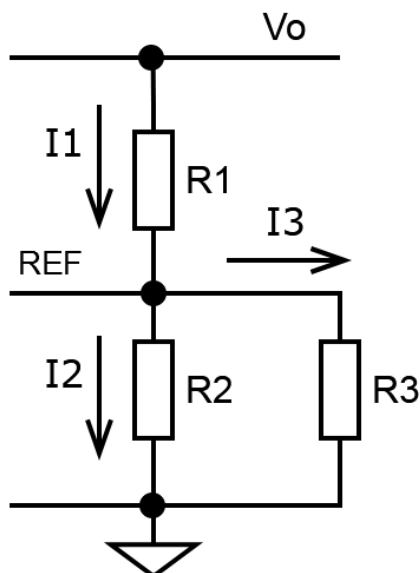


Рисунок 4 – Зміна параметрів подільника напруги

Джерело: розроблено авторами

Визначимо, як впливає на вихідну напругу БЖ додатковий струм  $I_3$ , створений резистором R3. Виходимо з того, що в точці REF за рахунок зворотного зв'язку завжди підтримується напруга  $V_{ref}$ , що дорівнює опорній (2,5 В). Розглянемо два випадки.

1) Зовнішній резистор відсутній.  $R_3 = \infty$ . Знайдемо вихідну напругу  $U_{out}$ :

$$U_{out} = U_{ref} + U_1 = U_{ref} + I_1 R_1 = U_{ref} + I_2 R_1. \quad (1)$$

2) Зовнішній резистор R3 підключено паралельно нижньому R2.

$$U'_{out} = U_{ref} + U'_1 = U_{ref} + I'_1 R_1 = (I_2 + I_3) R_1 = U_{ref} + I_2 R_1 + I_3 R_1. \quad (2)$$

Приріст вихідної напруги  $\Delta U_{out}$  буде становити:

$$\Delta U_{out} = U_{ref} + I_2 R_1 + I_3 R_1 - U_{ref} - I_2 R_1 = I_3 R_1, \text{ де } I_3 = U_{ref} / R_3. \quad (3)$$

Саме в такому вигляді зручно керувати вихідною напругою, отримавши лінійну залежність приросту напруги від додаткового струму через додатковий резистор R3 нижнього плеча подільника (рис. 5).

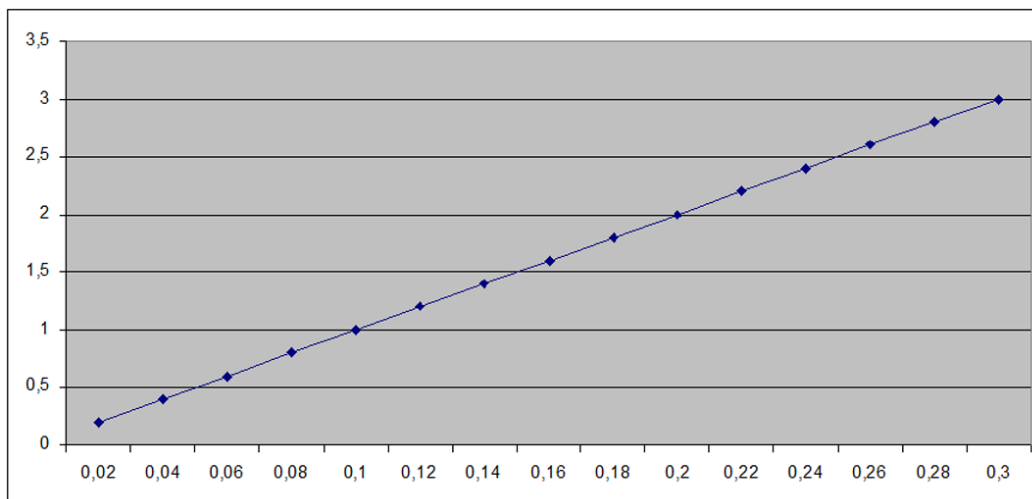


Рисунок 5 – Графік залежності приросту напруги від струму через резистор R3

Джерело: розроблено авторами

Якщо потрібно отримати кілька значень напруги на виході, достатньо підключити кілька резисторів потрібного опору. Для цього можна скористатися ключами на польових транзисторах, подавши на їх затвори сигнали з цифрових виходів МК, як на рис. 6.

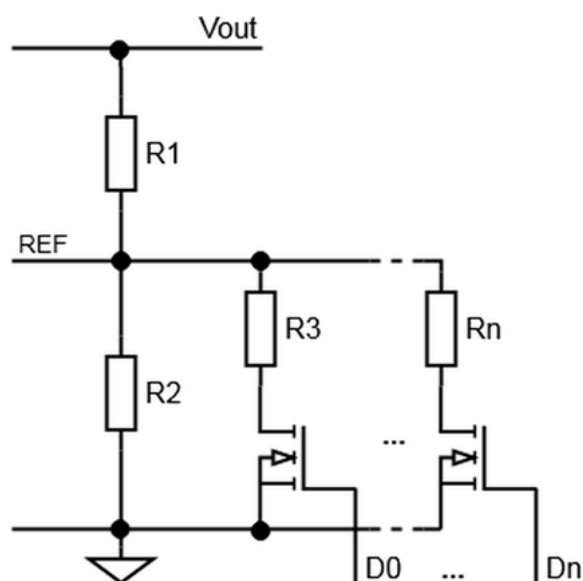


Рисунок 6 – Цифрове керування подільником напруги

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо на прикладі ІБЖ R-80-12, як одержати на виході потрібні напруги.

*Приклад 1.* ІБЖ R-80-12 потужністю 80 Вт і вихідною напругою 12 В має верхній резистор подільника 10 кОм, нижній складається з постійного і регульованого, що в сумі дають значення 2–3 кОм. При значенні  $R_2 = 2,63$  кОм маємо на виході 12 В. Якщо нам потрібно одержати напругу 12,6 В, то  $R_3 = (U_{ref}/\Delta U_{out}) \cdot R_1 = 41,67$  кОм. Аналогічно, для напруги 13,6 В потрібен  $R_3 = 15,625$  кОм, для 14,4 В  $R_3 = 10,42$  кОм. Для прикладу взято напруги, які часто зустрічаються в зарядних пристроях.

*Приклад 2.* Припустимо, що потрібно змінювати напругу ІБЖ в межах 12–15 В з дискретністю 0,1 В. Тоді маємо всього  $3/0,1 = 30$  рівнів напруги, а отже 30 значень додаткового струму через R3. У цьому випадку доцільно обрати  $\log_2 30 \approx 5$  значень струму, пропорційних вагам розрядів двійкової системи числення. При цьому струм наймолодшого розряду дорівнює 10 мкА, інших 20 мкА, 40 мкА, 80 мкА, 160 мкА. Для цього потрібні резистори опором 250 кОм, 125 кОм, 62,5 кОм, 31,25 кОм, 15,625 кОм, які доведеться підібрати або використати цифровий потенціометр. Максимальний струм I3 дорівнює 310 мкА, що дає максимальний приріст напруги 3,1 В. 5-розрядний двійковий код в діапазоні 00000–11110 дає приріст напруги в межах 0–3 В, тобто на виході можна отримати напругу 12–15 В.

І все ж, для деяких задач наявність кількох десятків рівнів напруги може бути недостатньою. В такому випадку слід використати інший підхід. Додатковий струм в середню точку подільника напруги можна сформувати за допомогою ЦАП. Тоді ЦАП виступає як джерело прецизійної напруги, а додатковий струм визначається різницею Uref БЖ і вихідної напруги ЦАП Udac (рис. 7). При нульовій напрузі на виході ЦАП приріст напруги на виході БЖ, аналогічний попередньому випадку. Якщо напруга Udac = Uref, ЦАП не впливає на роботу БЖ. Перевага використання ЦАП у тому, що можна не тільки збільшувати, а й зменшувати вихідну напругу БЖ. Для цього Udac повинна бути більшою від Uref.

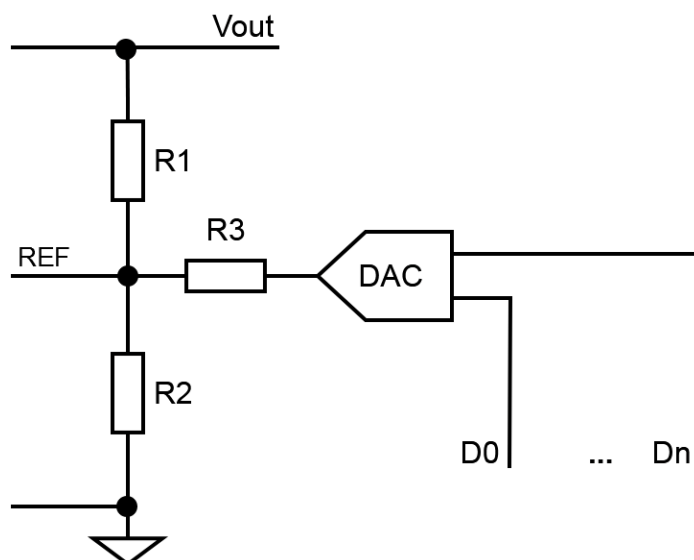


Рисунок 7 – Керування ІБЖ через ЦАП

*Джерело: розроблено авторами*

Приріст напруги на виході БЖ визначається за формулою (3). Але, на відміну від попередньої схеми, додатковий струм подільника напруги залежить від Udac:

$$I_3 = (U_{ref} - U_{dac}) / R_3. \quad (4)$$

*Приклад 3.* Нехай потрібно змінювати напругу ІБЖ R-80-12 в межах  $12 \pm 2,5$  В з дискретністю 5 мВ. Отже, нам потрібно одержати  $5/0,005=1000$  рівнів напруги від ЦАП. Візьмемо 10-розрядний ЦАП з опорною напругою 5 В. Він має 1024 рівні напруги в діапазоні 0–5 В. Візьмемо 1000 рівнів напруги відносно середнього значення 2,5 В, тобто діапазон  $2,5 \pm 2,4414$  В. При максимальній різниці  $U_{ref} - U_{dac} = 2,4414$  В,

одержимо:  $I_3 = 2,5/10 = 0,25$  мА.  $R_3 = 2,4414/0,25 = 9,766$  кОм. При цьому цифрові коди на входах ЦАП обираються в діапазоні 12–1011 (двійкові коди 1100–111110011).

Залежність приросту напруги на виході БЖ від напруги ЦАП подано на рис. 8.

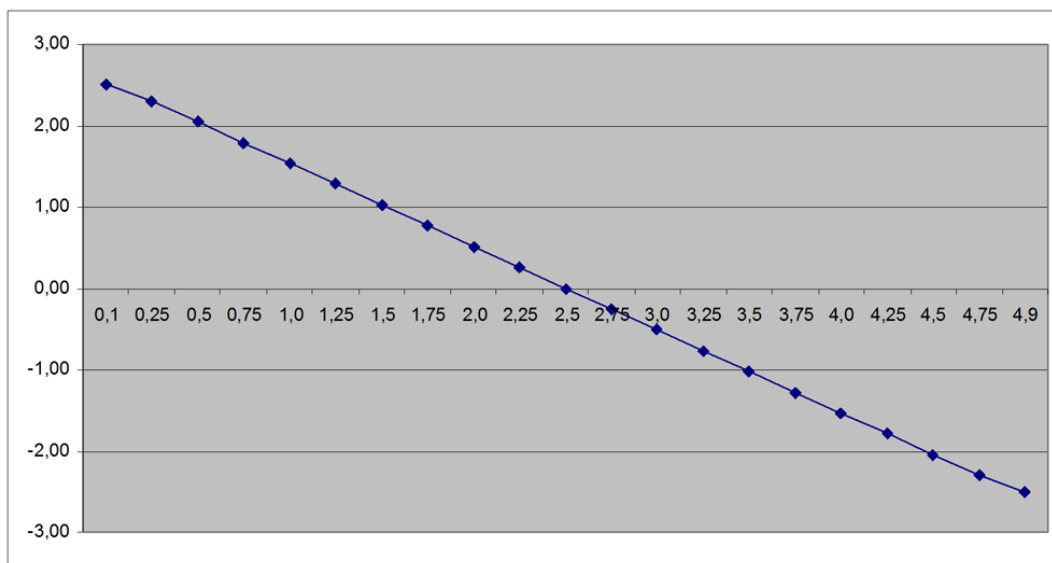


Рисунок 8 – Графік залежності приросту напруги БЖ від напруги ЦАП

*Джерело: розроблено авторами*

Слід зазначити, що таким чином не можна одержати будь-яку потрібну напругу на виході БЖ. Існують певні обмеження. ШІМ-контролер U1 (рис. 1) живиться від додаткової обмотки NA того самого трансформатора T, що й основний вихід БЖ, тому напруга живлення контролера змінюється одночасно з вихідною напругою БЖ. Мікросхема контролера має обмеження за напругою живлення. Так, контролер UC3842 БЖ R-80-12 вимикається при напрузі  $V_{CC\text{OFF}}$ , меншій 9 В. Напруга живлення контролера у даного блоку приблизно дорівнює вихідній. Отже, даний блок живлення не може працювати при напрузі на виході меншій, ніж 9 В. З іншого боку, є також верхня межа вихідної напруги, яка, у першу чергу, визначається максимальною допустимою напругою конденсаторів вихідного фільтру. У блоку живлення R-80-12 вихідні конденсатори розраховані всього на 16 В, тому потрібно обережно підходити до регулювання вихідної напруги. Для розширення діапазону регулювання напруги потрібна модифікація схеми блоку живлення, що не завжди видається доцільним.

**Висновки.** У дослідженні викладено результати розробки цифрового інтерфейсу до імпульсних блоків живлення зворотного ходу з аналоговим контуром керування. Встановлено, що для досягнення задач керування вихідною напругою достатньо здійснити ін'єкцію або відведення струму у вихідному вимірювальному подільнику напруги блоку живлення. Відведення струму призводить до підвищення вихідної напруги, а ін'єкція струму до зниження. Запропонований метод дозволяє одержати лінійну залежність приросту вихідної напруги від величини струму відведення. Показано, що схема цифрового інтерфейсу залежить від кількості дискретних рівнів необхідної вихідної напруги. При невеликій кількості рівнів для керування блоком живлення можуть бути використані ключі на польових транзисторах, що управляються позиційним або двійковим кодом, а при значній кількості рівнів доцільно використати готові цифро-аналогові перетворювачі.

## Список літератури

1. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2015. 1220 p.
2. An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. Monolithic Power Systems. 2023. 7 p. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-converters-parameters-topology-and-controllers>
3. Switch-Mode Power Supply. Reference Manual. Denver : ON Semiconductor, 2014. 72 p.
4. Turcan G. Flyback SMPS Using a Microcontroller as Control Unit. Microchip Technology, 2016. 72 p.
5. Betten J. Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments, 2024. 4 p.
6. Verma S., Singh S.K., Rao A.G. Overview of control Techniques for DC-DC converters. *Research Journal of Engineering Sciences*, 2013. Vol. 2, No. 8. P. 18–21.
7. Mahdavihah B., Prodić A. A Digitally Controlled DCM Flyback Converter With a Low-Volume Dual-Mode Soft Switching Circuit. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC 2014*. Fort Worth, 2014. P. 63–68. DOI: 10.1109/APEC.2014.6803290.
8. TL431, TL432 Precision Programmable Reference. Dallas: Texas Instruments, 2023. 84 p.
9. Zamora M. Designing with the ATL431LI in Flyback Converters. Dallas : Texas Instruments, 2018. 7 p.
10. Поліщук М.М., Гринюк С.В., Білоус М.В. Лабораторний блок живлення на базі мікроконтролера STM32F103VET6. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2018. Вип. № 30–31. С. 251–256.
11. Юрко О.О., Мосьпан Д.В., Кухаренко Д.В. Блок живлення з програмним керуванням. *Виклики та проблеми сучасної науки : зб. наук. пр.* 2023. Т. 1. С. 294–298. DOI: 10.6084/m9.figshare.22886720.
12. Деркач М.В., Єрьоменко А.Ю. Цифровий блок керування імпульсними джерелами живлення на основі мікроконтролера STM32G474RET6. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*, 2022. № 1–2 (7–8). С. 65–77. DOI: 10.20998/2411-0558.2022.02.07.
13. Viswanatha V., Reddy R.V.S., Digital Control of Buck Converter Using Arduino Microcontroller for Low Power Applications. *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, Bengaluru, India, 2017. P. 439–443, DOI: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358412.
14. How to Dynamically Adjust Power Module Output Voltage. Application Report SLVA861. Dallas: Texas Instruments, 2016. 5 p.
15. Satterfield G. Programmable low-side current sink circuit. SLAA868. Dallas: Texas Instruments, 2018. 6 p.
16. Replacing Digital Potentiometers with Precision DACs. Dallas: Texas Instruments, 2019. 4 p.

## References

1. Horowitz, P. & Hill, W. (2015). The Art of Electronics. (3rd ed.). New York: Cambridge University Press.
2. Monolithic Power Systems. (2023). An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. MPS. Retrieved from: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-converters-parameters-topology-and-controllers>
3. ON Semiconductor (2014). Switch-Mode Power Supply. Reference Manual. Denver: SCILLC.
4. Turcan G. (2016). Flyback SMPS Using a Microcontroller as Control Unit. AN2122. Chandler: Microchip Technology.
5. Betten, J. (2024). Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments.
6. Verma, S., Singh, S.K. & Rao, A.G. (2013). Overview of control Techniques for DC-DC converters. *Research Journal of Engineering Sciences*. 2(8), 18–21.
7. Mahdavihah, B & Prodić, A.A. (2014). Digitally Controlled DCM Flyback Converter With a Low-Volume Dual-Mode Soft Switching Circuit. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC 2014*. Fort Worth, 63–68. DOI: 10.1109/APEC.2014.6803290.
8. Texas Instruments (2023). TL431, TL432 Precision Programmable Reference. Dallas: Texas Instruments.
9. Zamora, M. (2018). Designing with the ATL431LI in Flyback Converters. Dallas: Texas Instruments.
10. Polishchuk M.M., Hryniuk S.V., Bilous M.V. (2018). Laboratornyi blok zhyvlennia na bazi mikrokontrolera STM32F103VET6 [Laboratory power supply based on STM32F103VET6 microcontroller]. *Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo – Computer-integrated technologies: education, science, production*, 30–31, 251–256 [in Ukrainian].
11. Yurko, O.O., Mos'pan, D.V. & Kukharenko, D.V. (2023). Blok zhyvlennia z prohramnym keruvanniam [Power supply unit with software control]. *Vyklyky ta problemy suchasnoi nauky : zb. nauk. pr. –*

- Challenges and problems of modern science: coll. of science Ave, 1*, 294–298. DOI: 10.6084/m9.figshare.22886720 [in Ukrainian].
12. Derkach, M.V. & Yer'omenko, A.Yu. (2022). Tsyfrovyy blok keruvannia impul'snyy dzherelamy zhyvlennia na osnovi mikrokontrolera STM32G474RET6 [Digital control unit for switching power supplies based on the STM32G474RET6 microcontroller]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI" – Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 1–2 (7–8), 65–77. DOI: 10.20998/2411-0558.2022.02.07 [in Ukrainian].
  13. Viswanatha V., Reddy R.V.S. (2017). Digital Control of Buck Converter Using Arduino Microcontroller for Low Power Applications. *International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*. Bengaluru, India. 439–443. DOI: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358412.
  14. Texas Instruments (2016). How to Dynamically Adjust Power Module Output Voltage. Application Report SLVA861. Dallas: Texas Instruments.
  15. Satterfield G. (2018). Programmable low-side current sink circuit. SLAA868. Dallas: Texas Instruments.
  16. Texas Instruments (2019). Replacing Digital Potentiometers with Precision DACs. Dallas: TI.

**Oleksandr Baraniuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Viktor Kalich**, Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine*

### **Development of a Digital Control Interface for a Switching Power Supply**

Most switching power supplies are not designed to change their output voltage. However, situations arise where a different voltage from the power source is needed. The purpose of this article is to develop a practical interface scheme for digitally controlling the output voltage of a switching power supply with an analog feedback loop.

The article presents the results of the research of isolated flyback switch-mode power supply (SMPS) circuits, determines the method of controlling the output voltage of the SMPS, and proposes a digital interface for controlling the output voltage of the power supply. The emphasis was on using readily available, inexpensive components with minimal modification to the existing design. The study revealed limitations in existing switching power supply designs regarding effective output voltage control. Modifying the internal reference source is often not an available option. Therefore, influencing the feedback circuit emerges as a simple and viable control method. All power supply feedback loops include a voltage divider measuring the output voltage of switching power supply. This research demonstrates that controlling output voltage can be achieved by injecting or draining current within or from output voltage divider of power supply. Draining current increases the output voltage, while injecting decreases it. The additional resistor only requires a single connection point within the existing circuit.

The proposed method provides a linear dependence of the output voltage increase on the value of the injected/drained current. It is shown that the digital interface scheme depends on the number of discrete levels of the required output voltage. For a small number of levels, field-effect transistors controlled by a positional or binary code can be used to control the power supply, and with a significant number of levels, it is advisable to use ready-made digital-to-analog converters.

**switching power supply, control, interface, feedback, digital code**

*Одержано (Received) 24.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.02.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

**Sergey Osadchy**, Prof., DSc.

*Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Larisa Vikhrova**, Prof., PhD tech. sci., **Victor Kalich**, Prof., PhD tech. sci.,

**Mariia Miroshnichenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

*e-mail: srg2005@ukr.net, vihrovalg@ukr.net, marymir@ukr.net*

## Combined system of automatic flow stabilization bread mass at the entry of the thresher of the grain harvester

The research conducted in this article is devoted to solving the actual problem of loading the grain harvester with bread mass at the entrance of the thresher. It is possible to achieve the minimum level of fluctuations in the flow of bread mass at the entrance of the threshing-separating device only in appropriately designed optimal multidimensional stabilization systems. At the same time, the methods of dynamic design and analytical design should be used for the construction of similar systems.

We proposed to extend the experimental and analytical approach to the design of optimal stabilization systems to the case when minimal fluctuations in the flow of bread mass occur at the entrance to the thresher of the grain harvester. As a result, we developed and implemented an optimal combined system of automatic stabilization with feedback on the deviation from the average value of the flow of bread mass and correction according to the change in output.

To carry out the above studies, the method of analyzing the quality of stabilization under random steady-state effects was used, and this made it possible to calculate normalized indicators of the quality of stabilization.

**grain mass flow stabilization, automatic stabilization system, standardized quality indicators, hydraulic transmission, average yield, control signal vector**

**Formulation of the problem.** The search for ways to increase the efficiency of grain cultivation in the world and in Ukraine led to the emergence of a system of precision agriculture. This system [6], on the one hand, provides maximum yields on certain agricultural areas, and on the other hand, it is aimed at maintaining the fertility of land.

Harvesting is the crown of production of any agricultural crop production. It is difficult to overestimate its importance and significance. This is the most costly technological operation. It accounts for 25 to 40% of total direct technical costs spent on technology as a whole. Non-performance or poor performance for one reason or another of the technological assembly operation turns the costs of all previous operations into direct losses. The quality of the performance of this technological operation is determined by many factors that characterize the design, condition and reliability of grain harvesting equipment, the degree of training of personnel, technology and harvesting conditions.

**Analysis of recent research and publications.** As we can see from the analysis of the design features of grain harvesting equipment [3], there are several ways to improve the quality of grain harvesting. Work on the development of new designs of elements of grain-harvesting equipment and grain-threshing technologies is constantly underway. But in order to achieve the maximum quality of grain collection, both for new developments and for existing grain harvesting equipment, it is necessary to provide optimal operating modes. One of the problems, the solution of which coincides with the trends in the development of grain harvesting equipment, is the stabilization of the flow of bread mass at the entrance to the

thresher of the combine. Since any new developments in the designs of elements of grain harvesting equipment and grain threshing technologies are nullified by significant fluctuations in the flow of bread mass, and on the other hand, ensuring a stable flow makes it possible to maximize the quality of harvest for a given design and technology of grain collection.

Achieving the minimum level of fluctuations in the bread mass flow at the entrance of the threshing-separating device is possible [4,7], only in appropriately designed optimal stabilization systems. Therefore, the design and implementation of optimal grain flow stabilization systems is an important factor in maximizing the quality of the harvesting process.

**Setting objectives.** A characteristic feature of the modern development of automation systems for controlling technological processes on domestic and foreign harvesters [1,2,5] is the use of the latest methods, techniques and means of developing on-board control systems. The latest methodologies for creating control systems allow you to take into account the real stochastic nature of the change in signals acting in the control loops and to determine the structure, and not only the parameters, of the on-board controller that deliver the extremes of the selected quality criterion. Therefore, the development and implementation of a new method of automated synthesis of the optimal system for stabilizing the flow of bread mass at the entrance of the thresher of the grain harvester will allow to ensure the most complete use of achievements in the field of improving the design of threshing-separating devices and threshing technology.

A necessary condition for justifying the choice of a method of creating a particular automation system is the study of information about useful signals, disturbances and interferences acting on the system in the real conditions of its operation.

**Presenting main material.** In order to achieve the maximum quality of stabilization of the flow of bread mass at the entrance to the thresher of the grain harvester, it is necessary to apply the methods of dynamic design and analytical construction in the construction of the optimal system. Before developing the system, it is necessary to analyze the factors, the consideration of which will make it possible to achieve the required quality. These factors can be divided into three groups: dynamic characteristics of the elements of the automatic stabilization system; dynamic characteristics of disturbances acting in the system; meter noises.

From the point of view of dynamic characteristics, the most complex element of the system is the control object, the input of which is the angle of inclination of the washer of the hydraulic pump cylinder block, and the output is the flow of bread mass at the entrance to the thresher. A combine harvester is a rather complex object that includes non-linear elements, non-stationary elements and complex relationships between elements.

In the literature [2,5,8], a large number of mathematical models of both individual nodes and large aggregates and even the entire combine are described. These models are designed to solve various problems. From the point of view of the problem of stabilization of the grain mass flow, it is necessary to obtain a model of the generalized control object "the angle of inclination of the washer of the cylinder block - the flow of grain mass at the entrance to the thresher" (Fig. 1), which includes a hydraulic transmission that changes the frequency of revolutions of the hydraulic motor shaft  $\omega$  depending on from the angle of inclination of the washer of the cylinder block of the hydraulic pump  $\gamma$ , the transmission of the combine, which converts the rotation of the hydraulic motor shaft into the translational movement of the combine, and the mathematical relationship connecting the flow of bread mass  $Q$  with the translational speed of the combine  $V$

$$Q = VBV(1 + \varepsilon), \quad (1)$$

where  $Q$  is the flow of bread mass at the entrance to the combine thresher, kg/s;

$V$  is the speed of the combine, m/s;

$B$  – harvesting width, m;

$V$  – crop productivity, kg/m<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  – is the ratio of grain to the non-grain part of the bread mass.

The first bread mass flow stabilization systems were built using mechanical, pneumatic, and hydraulic engine operating modes control links [3]. These systems could not give high accuracy of flow stabilization because they implemented simple control laws, so their implementation was hampered by a small gain in the quality of harvesting.

The relevance of the issue of stabilizing the flow of bread mass caused the further development of methods, techniques and means of developing systems of this class. New sensors of non-electric quantities for grain harvesters, circuit solutions and regulation principles were developed. A review of literary sources [3,6] showed a wide variety of methods and devices for regulating the loading of a grain harvester.

The analysis of the considered methods and devices for regulating the flow of bread mass showed that a common drawback is that they do not take into account the real dynamic properties of the control object and disturbances acting in the system.

A new impetus for the development of grain mass flow stabilization systems was given by the use of hydraulic transmission to regulate the speed of movement of the grain harvester. This made it possible to adjust the speed without affecting the operation of all other units of the grain harvester.

Taking into account the significant change in the average yield of fields in different regions of Ukraine, which is associated with the imperfection of grain growing technologies, the main drawback of the considered automatic systems for stabilizing the loading of the combine thresher is that they lack the adaptation of the parameters of the regulation laws to the change in the average yield. The consequence of this is the deterioration of the quality of harvesting with a decrease in the average yield of the field. Therefore, there is a need to create a system of automatic stabilization of the grain mass flow adapted to the conditions of domestic fields and adapted to the average yield of the field.

The development of modern technologies for managing technological operations in agriculture makes it possible to combine precision farming systems with the global positioning system and the capabilities of aerospace photography, therefore there is an opportunity to improve the quality of harvesting due to the construction based on the functional scheme of the system of the combined system of stabilizing the flow of bread mass at the entrance of the thresher (Fig. 1).

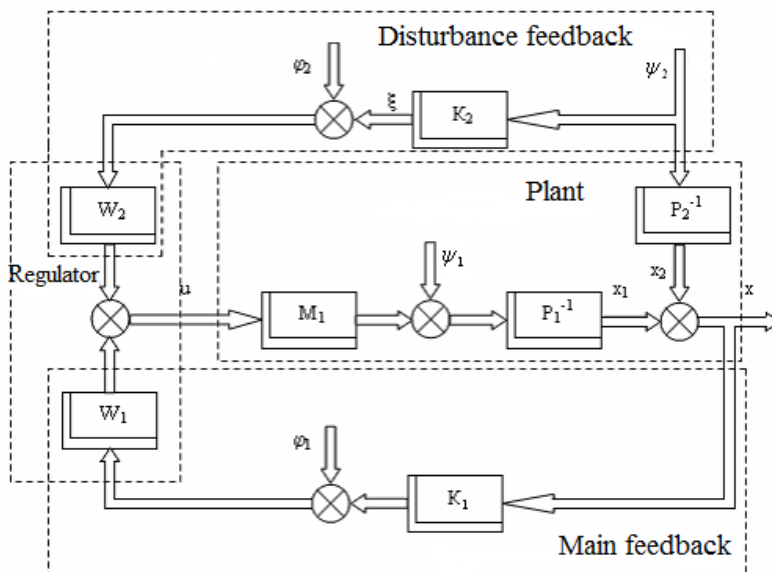


Figure 1 – Structural diagram of the combined automation system

Source: developed by the author Osadchyj, S. I., Miroshnichenko M. S.

The structural scheme of such a combined, moreover, multidimensional stabilization system (Fig. 1.) proposed by us consists of a number of elements. First of all, it is a control object, the dynamics of which is described by a system of equations

$$\begin{cases} P_1 x_1 = M_1 u + \psi_1 \\ P_2 x_2 = \psi_2 \\ x = x_1 + x_2 \end{cases}, \tag{2}$$

where  $x, x_1, x_2$  –  $n$ -dimensional vectors of the initial coordinates of the control object;

$u$  –  $m$ -dimensional vector of control signals;

$P_1, P_2$  – polynomial matrices from the differentiation operator  $s=d/dt$  size  $n \times n$ , which determine the change in the initial coordinates of the object when the disturbance vectors  $\psi_1, \psi_2$  change and are equal to

$$P_1 = (s + 1.2)(s + 0.206), P_2 = 3,85 \cdot 10^{-2}, \tag{3}$$

$M_1$  – polynomial matrix from the differentiation operator  $s$  of size  $n \times m$

$$M_1 = 144, \tag{4}$$

which characterizes the sensitivity of the control object to changes in the components of the vector  $u$ .

The deviation feedback consists of a sensor system, the dynamics of which is characterized by the transfer function matrix  $KI$ , and the measurement errors by the noise vector  $\phi I$ , and the first channel of the regulator with the transfer function matrix  $WI$

$$W_1 = -\frac{12.3(s + 319)(s + 3.91)(s + 0.2063)}{(s + 332)(s + 0.4108)(s^2 + 25s + 318)}. \tag{5}$$

The disturbance correction includes sensors with a matrix of transfer functions  $K_2$  and a vector of measurement disturbances  $\varphi_2$  and the second channel of the regulator, the dynamics of which is described by the matrix  $W_2$

$$W_2 = -\frac{12.33(s + 0.2063)(s^2 - 2.44s + 0.993)}{(s + 332)(s + 0.4108)(s^2 + 25s + 318)}. \quad (6)$$

Since the sources of disturbances acting on the generalized object do not coincide (Fig. 1.), the structure of the combined system differs from the standard one [2]. The main distinguishing feature of the structural diagram in Fig. 1. there is the presence of a circle of correction for only one disturbance - field yield fluctuations.

In order to ensure the possibility of implementing this principle of regulation, work should be carried out aimed not only at the development of field yield assessment systems and the construction of yield maps even before grain harvesting, but also at the creation of new methods, principles and means of synthesis of optimal combined stabilization systems with correction for disturbance, which act on their output.[8,9]

To ensure the maximum quality when harvesting grain, it is worth creating an optimal combined system of stabilization of the volume of bread mass at the entrance to the thresher. The structure and parameters of the specified systems must be chosen taking into account the dynamics model of the stabilization object (polynomials  $M_1$ ,  $P_1$ , Fig. 1.), primary measuring transducers in the feedback circuits for the deviation  $K_1$  and in the correction circuit for the disturbance  $K_2$ , disturbances  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  and interference  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , which corresponds to the real operating conditions of the harvester, taking into account the latest effective methods of automated creation of control systems.

This approach to the design of automatic control systems is based on the fact that, as a result of finding a solution to the problem of analytical design, even before starting the main design of the system, it is necessary to assess the limits of improving its quality, as well as to create an optimal structure, not only the parameters of the regulator, but also establish the expediency of starting work that will lead to the creation of a new system. At the same time, the main material and time costs for the design, manufacture and testing of the product arise only after a positive decision has been made regarding the feasibility and quality of the system.

Such an experimental and analytical way makes it possible to significantly reduce costs for the development of an automatic control (stabilization) system by reducing the terms of testing and debugging work, determining the maximum limits of maximizing the quality of control even when a technical proposal was created, formalizing the methods of synthesizing the stabilization system and analyzing its quality, carrying out the final design to reproduction of optimal control laws invented analytically.

Studying the features of the procedures for the creation and construction of modern existing systems for stabilizing the flow of bread mass according to literary sources [1,3,6] allows us to identify a number of reasons that do not allow to dramatically increase the competitive capabilities of this agricultural technique. First, the differential equations of the grain harvester do not take into account the dynamic properties and design features of hydraulic transmissions operating in the mode of constant load changes. Secondly, traditional approaches to determining the structure and parameters, which are used for the development of control systems for technological processes on the harvester, are designed for the action of only regular external influences, while real disturbances and disturbances are of a stochastic nature [2]. Thirdly, the existing methods of synthesis of optimal combined stabilization systems allow to successfully determine the structure and

parameters of a two-channel controller, if the system has only one controlled source of disturbances at the input of the stabilization object.

To overcome the identified shortcomings, we propose to spread the effect of the experimental and analytical approach [2,5] to the development of optimal stabilization systems in case of minimization of fluctuations in the flow of bread mass at the entrance of the thresher of the grain harvester through the development and implementation of the optimal combined stabilization system with feedback based on the deviation of the bread mass mass from the average value and correction for changes in yield.

In accordance with the design plan of the optimal combined system of stabilization of the volume of bread mass before entering the thresher of the grain harvester, a study was conducted of changes in the dispersion of the flow of bread mass  $e_x$ , the angle of inclination of the washer of the hydraulic pump cylinder block  $e_u$  and the stabilization quality indicator  $e$ , which arise in the adaptive optimal combined stabilization system when changing constant ratios  $\mu, \mu_1, \mu_2$ , which characterize the operating conditions of the system and when the average yield of the field  $Y_0$  changes.

The ratio  $\mu, \mu_1, \mu_2$  determine the operating conditions in which the system should function. They can vary widely when the characteristics of the field surface and the noise intensity of the sensors change.  $\mu$  is the "relief-yield" ratio. [4,7]

To carry out the study, the method of analyzing the quality of stabilization under random steady-state effects [2] was used, which made it possible to calculate normalized indicators of the quality of stabilization:

$$\bar{e} = \frac{e}{\sigma_{\bar{e}}}, \bar{e}_x = \frac{e_x}{\sigma_{Q0}}, \bar{e}_u = \frac{e_u^2}{\sigma_{\gamma0}}, \tag{7}$$

where  $\sigma_{\bar{e}}$  is a coefficient equal to  $\sigma_{\bar{e}} = \sqrt{e_0}$ , and the variable  $e_0$  is equal to the quality indicator of the adaptive stabilization system, synthesized at the value of the weight coefficient  $C = 1$ , the average yield  $Y_0 = 0.35 \text{ kg/m}^2$  and the ratios  $\mu = 1,06 \cdot 10^4, \mu_1 = 0,5, \mu_2 = 0,5, e_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ , are summarized by one value as an example in Table 1.

Table 1 –Standard indicators of the quality of stabilization at  $\mu_1=\mu_2=1$

			$Y_0, \text{ kg/M}^2$						
			0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
$\mu$	$1,06 \cdot 10^3$	$\bar{e}_x$	1.59	1.28	1.11	1.02	0.97	0.93	0.92
		$\bar{e}_u$	1.68	1.32	1.14	1.01	0.96	0.92	0.91
		$\bar{e}$	3.27	2.6	2.25	2.03	1.93	1.85	1.83
	$1,06 \cdot 10^4$	$\bar{e}_x$	1.72	1.39	1.21	1.1	1.05	1.01	1
		$\bar{e}_u$	1.82	1.43	1.23	1.1	1.04	1	0.98
		$\bar{e}$	3.54	2.82	2.44	2.2	2.09	2.01	1.98
	$1,06 \cdot 10^5$	$\bar{e}_x$	1.89	1.53	1.36	1.22	1.15	1.11	1.09
		$\bar{e}_u$	2.01	1.59	1.39	1.23	1.15	1.1	1.07
		$\bar{e}$	3.9	3.12	2.75	2.45	2.3	2.21	2.16

Source: developed by the author Osadchyj, S. I., Miroshnichenko M. S.

Consideration of the quality change surfaces of fig. 2, constructed according to the data of table 1, allows us to draw several conclusions.

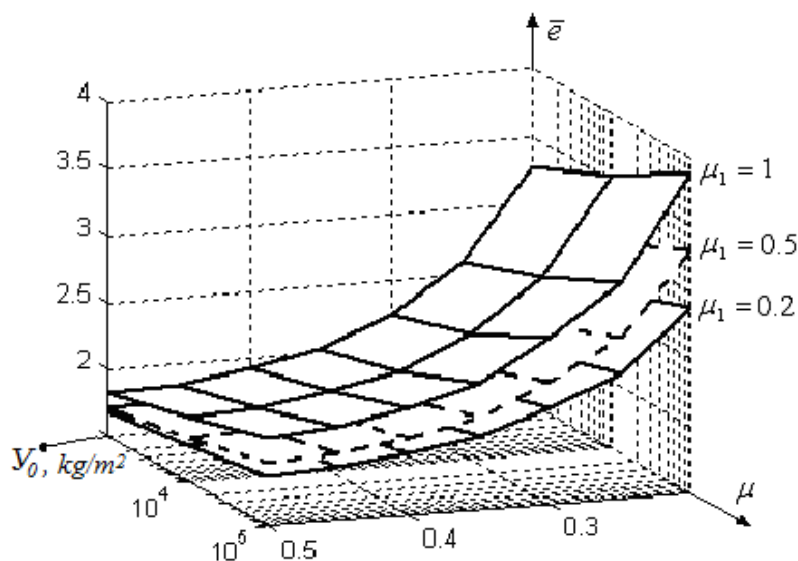


Figure 2 – Surface changes of the standardized system quality criterion

Source: developed by the author Osadchyj, S. I., Miroshnichenko M. S.

**Conclusions.** The main influence on the quality of maintenance of the set value of the flow of bread mass by the optimal combined system with adaptation is exerted by the change in the average yield of the field. When it changes from 20 to 50 c/ha, the change in normalized root mean square deviations of the flow of bread mass is almost 80%. A change in the driving conditions of the harvester during harvesting within very wide limits (the coefficient  $\mu$  is ten times) causes a change in the normalized root mean square deviation of the bread mass flow by a maximum of 15%.

The inclusion of an optimal two-channel regulator in the feedback circuit, the parameters of which are adapted to the average yield of the field, ensures the stability of the closed control system and limits the root mean square deviation of the flow of bread mass at the entrance to the thresher in the amount of  $5.2 \cdot 10^{-2}$  kg/s at the root mean square deviation of the control signal - the angle of inclination of the washer of the cylinder block of the hydraulic pump, which is  $3.48^\circ$ , in the worst conditions of minimum yield and maximum intensity of sensor noise.

## List of references

1. Інформаційна технологія проектування системи автоматичної стабілізації потоку хлібної маси на вході до молотарки зернозбирального комбайну / Осадчий С. І. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5 (36). ч. 2. С. 103–109.
2. Осадчий С.І. Автоматизація динамічного проектування оптимальних багатовимірних робастних систем стохастичної стабілізації. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2010. Вип. 40. С.25-34.
3. Сисолін П. В., Коваль С. М., Іваненко І. М. Машини для збирання зернових культур методом обчисування колосків. Кіровоград : КОД, 2010. 112 с.
4. Осадчий С. І., Віхрова Л. Г., Мірошніченко М. С. Аналіз автоматичної системи стабілізації потоку хлібної маси на вході молотарки зернозбирального комбайну. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 9 листопада 2023 р. Харків: Держ. біотехнологічний ун-т, 2023. С.127-128. URL: <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/>.*
5. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2023. 292 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13584>.

6. Practical Precision Livestock Farming. Hands-on experiences with PLF technologies in commercial and R&D settings / Banhazi T., Halas V., Maroto-Molina F. (Eds). Wageningen academic Publisher. 2022. P. 442. URL: <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-934-3>.
7. Методи сучасної теорії управління: навч. посіб. / Ладанюк А.П., В.Д. Кищенко, Н.М.Луцька, В.В. Іващук. К.: НУХТ, 2010. 196 с.
8. Osadchy S., Zozulya V., Timoshenko A. Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation. Chapter 2. The Dynamic Characteristics of the Manipulator With Parallel Kinematic Structure Based on Experimental Data. River Publishers. 2015. pp. 27-48.
9. Блохін Л.М., Буриченко Н.Ю. Статистична динаміка систем управління: підручник для вузів. К.: НАУ. 2003. 208 с.

## References

1. Osadchyj, S. I. et al. (2022). Informatsijna tekhnolohiia proektuvannia systemy avtomatychnoi stabilizatsii potoku khlibnoi masy na vkhodi do molotarki zernozbyral'noho kombajnu [Information technology for the design of a system of automatic stabilization of the flow of bread mass at the entrance to the thresher of a grain harvester]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin*, 5(36), 103-109 [in Ukrainian].
2. Osadchyj, S.I. (2010). Avtomatyzatsiia dynamichnoho proektuvannia optymal'nykh bahatovymirnykh robastnykh system stokhastychnoi stabilizatsii [Automation of dynamic design of optimal multidimensional robust systems of stochastic stabilization]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohopodars'kykh mashyn Design, production and operation of agricultural machines*, 40, 25-34 [in Ukrainian].
3. Sysolin, P. V., Koval', S. M. & Ivanenko, I. M. *Mashyny dlia zbyrannia zernovykh kul'tur metodom obchisuvannia koloskiv [Machines for harvesting grain crops by combing ears]*. Kirovohrad : KOD [in Ukrainian].
4. Osadchyj, S. I., Vikhrova, L. H. & Miroshnichenko, M. S. (2023). Analiz avtomatychnoi systemy stabilizatsii potoku khlibnoi masy na vkhodi molotarki zernozbyral'noho kombajnu [Analysis of the automatic system of stabilizing the flow of bread mass at the entrance of the thresher of the grain harvester]. *Electric power, electromechanics and technologies in agriculture: Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (9 lystopada 2023 r.) – International science and practice conf* (pp. 127-128). Kharkiv: Derzh. biotekhnolohichnyj un-t. Retrieved from: <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/> [in Ukrainian].
5. Blokhin, L. M. et al. (2023). *Tekhnolohii konstruiuvannia suchasnykh konkurentospromozhnykh kompleksiv keruvannia stokhastychnym rukhom ob'ektiv [Technologies for the construction of modern competitive complexes for controlling the stochastic movement of objects]*. Kropyvnyts'kyj : Lysenko V.F. [in Ukrainian].
6. Banhazi, T., Halas, V. & Maroto-Molina, F. (Eds). (2022). Practical Precision Livestock Farming. Hands-on experiences with PLF technologies in commercial and R&D settings. Wageningen academic Publisher. P. 442. URL: <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-934-3> [in English].
7. Ladaniuk, A.P., Kyshenko, V.D. , Luts'ka, N.M. & Ivaschuk, V.V. (2010). *Metody suchasnoi teorii upravlinnia [Methods of modern management theory]*. K.: NUKhT [in Ukrainian].
8. Osadchy, S., Zozulya, V. & Timoshenko, A. (2015). Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation. Chapter 2. The Dynamic Characteristics of the Manipulator With Parallel Kinematic Structure Based on Experimental Data. River Publishers. pp. 27-48 [in English].
9. Blokhin, L.M. & Burychenko, N.Yu. (2003). *Statystychna dynamika system upravlinnia [Statistical dynamics of management systems: a textbook for universities]*. K.: NAU in Ukrainian].

**С.І. Осадчий**, проф., д-р. техн. наук

*Льотна академія національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна*

**Л.Г. Віхрова**, проф., канд. тех.наук, **В.М. Каліч**, проф., канд. тех.наук, **М.С. Мірошніченко**, доц., канд. тех.наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

### **Комбінована система автоматичної стабілізації потоку хлібної маси на вході молотарки зернозбирального комбайну**

Проведені у даній статі дослідження присвячені вирішенню актуальної проблеми завантаження зернозбирального комбайну хлібною масою на вході молотарки. Досягти мінімального рівня коливань потоку хлібної маси на вході молотильно-сепаруючого пристрою можна тільки у відповідним чином спроектованих оптимальних багатовимірних системах стабілізації. При

цьому слід застосовувати методи динамічного проектування та аналітичного конструювання за побудови подібних систем.

Ми запропонували поширити експериментально-аналітичний підхід до проектування оптимальних систем стабілізації до випадку, коли на вході до молотарки зернозбирального комбайну відбуваються мінімальні коливання потоку хлібної маси. У результаті розробили та впровадили оптимальну комбіновану систему автоматичної стабілізації зі зворотним зв'язком по відхиленню від середнього значення потоку хлібної маси та корекцією відповідно до зміни виходу.

Для виконання наведених досліджень використали метод аналізу якості стабілізації при випадкових стаціонарних впливах, а це дозволило розрахувати нормовані показники якості стабілізації.

З метою мінімізації коливань потоку хлібної маси необхідна розробка якісно нових комбінованих систем автоматичної стабілізації на базі поєднання систем точного землеробства з системами глобального позиціонування рухомих об'єктів, враховуючи можливості аерокосмічної фотозйомки.

Структура та параметри багатовимірних систем стабілізації мають бути знайдені у результаті виконання синтезу оптимальних систем автоматизації, враховуючи при цьому особливості динаміки гідротрансмісії зернозбирального комбайну, змінний характер рельєфу поля, точність та інерцію датчиків, урожайність у реальних умовах збирання урожаю.

**стабілізація потоку зернової маси, система автоматичної стабілізації, нормовані показники якості, гідротрансмісія, середня урожайність, вектор сигналів керування**

*Одержано (Received) 25.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 15.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 692.23:699.86

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.64-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.64-74)

**В.А. Пашинський**, проф., д-р техн. наук, **В.А. Настоящий**, проф., канд. техн. наук, **М.В. Пашинський**, доц., канд. техн. наук, **Д.В. Богатирьов**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: pva.kntu@gmail.com*

### Вплив підвищення нормативних вимог на рівень теплової надійності та втрати тепла через стіни й покриття житлових і громадських будівель

Проаналізовано зменшення річних втрат тепла та імовірної тривалості дії теплових відмов стін і покриттів цивільних будівель на території України з опором теплопередачі згідно ДБН В.2.6-31:2016 і ДБН В.2.6-31:2021. При різних значеннях допустимої різниці температур внутрішнього повітря та внутрішньої поверхні огорожень, тривалість дії теплових відмов може відрізнятись на два порядки. Реалізоване в ДБН В.2.6-31:2021 підвищення опору теплопередачі обумовило зменшення втрат тепла в середньому на 17%, а також зменшення тривалості дії теплових відмов стін на 17% і покриттів на 54%.

**житлові та громадські будівлі, стіни, покриття, втрати тепла, тривалість теплової відмови**

**Постановка проблеми.** Одним з ключових факторів впливу на енергетичну ефективність будівель є опір теплопередачі огорожувальних конструкцій. У вересні 2021 року набула чинності нова редакція Державних будівельних норм України ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [1], у якій істотно підвищені вимоги до опору теплопередачі стін і покриттів житлових і громадських будівель порівняно з попередніми ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель» [2]. Вплив підвищених вимог на щорічні втрати тепла та на рівень теплової надійності огорожувальних конструкцій доцільно проаналізувати шляхом порівняння результатів розрахунків за вказаними нормами з урахуванням даних про температурний режим атмосферного повітря в різних регіонах України. Це дозволить оцінити перспективну економію енергоресурсів на опалення житлових і громадських будівель, які будуть запроєктовані з урахуванням оновлених ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вимоги до теплових характеристик і заходів щодо забезпечення теплової надійності огорожувальних конструкцій сформульовані в ДБН В.2.6-31:2021 [1]. Для непрозорих конструкцій нормується опір теплопередачі, який визначає втрати тепла через огороження, а також різниця температур внутрішньої поверхні огороження та повітря в приміщенні, яка впливає на комфортність перебування в приміщенні. Конкретні методи розрахунків та необхідні довідкові дані викладені в стандарті [3]. ДБН [1] видання 2021 року відрізняються від попередньої редакції [2] підвищеними вимогами до мінімально необхідного опору теплопередачі. Збільшення опору теплопередачі огорожень повинно зменшити втрати тепла та підвищити комфортність перебування в приміщеннях.

Задача вибору раціонального значення опору теплопередачі (раціональних теплових характеристик) огорожувальних конструкцій розв'язувалася в роботах

[4...7]. З урахуванням вартості конструкцій та втраченого тепла для умов України встановлено [4], що при чинному співвідношенні вартості будівельних матеріалів і теплової енергії опір теплопередачі розглянутих огорожувальних конструкцій доцільно збільшити в 1,3...2,5 рази порівняно з мінімально необхідними значеннями, встановленими в нормах [2]. В роботі [5] проаналізовані витрати тепла та обчислені рекомендовані товщини різних типів утеплювачів (екструдований полістирол чи мінеральна вата Rockwool), у будівлях з різними матеріалами огорожувальних конструкцій (цегла, черепашник, газобетон, стіни з повітряними прошарками) при використанні різних джерел отримання тепла (зріджений газ, електроопалення, мазут, вугілля, природний газ, геотермальне опалення) для кліматичних умов різних міст Туреччини. За співвідношенням оптимальної ціни при розрахунковому строкові експлуатації до 12 років визначено оптимальну товщину утеплювача від 0 до 18 см. Аналогічні дослідження проводилися в роботі [6] для кліматичних умов трьох міст Європи. В результаті розрахунків, оптимальна товщина утеплювача склала 5...10 см при розрахунковому строкові експлуатації 20 років. Також визначені заощадження енергії за розрахунковий строк експлуатації утеплювача.

В роботі [7] визначена оптимальна товщина утеплювача для літньої пори року з урахуванням сонячної радіації та витрат на кондиціонування. Розрахунки показали, що у деяких випадках використовувати утеплювач є недоцільно, у регіонах, які знаходяться далі від зон з підвищеною температурою є раціональним використанням утеплювача від 1 до 8 сантиметрів при строкові експлуатації 10 років. В публікації [8] вказано, що результати цих досліджень враховані при оновленні нормативних документів Туреччини. Зокрема, з 1 січня 2023 року мінімальна товщина утеплювача збільшилася з 5 до 8 см для Стамбулу та з 6 до 9 см для Анкари.

Загальні тенденції щодо удосконалення теплової ізоляції будівель, відображені в дослідженнях [4...7], узгоджуються з реалізованим в ДБН [1] підвищенням мінімально необхідних значень опору теплопередачі стін і покриттів цивільних будівель.

Втрати тепла через огорожувальні конструкції на протязі опалювального періоду можна оцінити за відомими залежностями будівельної теплофізики [3, 9] з урахуванням теплових характеристик огорожень, нормативних вимог до температурного режиму приміщень та кліматичних даних по температурі атмосферного повітря, наведених у стандарті [10] та в монографії [11] для великої кількості пунктів спостереження України.

Умова комфортного перебування в приміщенні поблизу зовнішніх огорожень виражена в нормах [1, 2] граничною нерівністю, яка обмежує різницю температур внутрішньої поверхні огороження та повітря в приміщенні величиною, залежною від призначення конструкції та виду огороження. Нормативні документи [1, 2] вимагають виконувати таку перевірку з урахуванням встановлених розрахункових значень усіх впливаючих величин без урахування їх випадкової природи. Методика імовірного оцінювання рівня теплової надійності огорожувальних конструкцій за критерієм комфортності запропонована в роботах [12, 13]. Вона дозволяє визначити імовірну тривалість дії теплової відмови з урахуванням випадкових змін температури зовнішнього повітря та повітря в приміщенні, а також випадкового характеру теплових характеристик огорожувальних конструкцій.

Статистичні характеристики вихідних величин, необхідні для реалізації розробленої в [13] методики оцінювання рівня теплової надійності, можна запозичити з результатів досліджень [11, 14, 15, 16]. В роботі [14] показано, що температура повітря в приміщенні може бути представлена у формі нормально розподіленої випадкової величини з математичним сподіванням, рівним розрахунковому значенню з ДБН [1, 2],

та стандартом, рівним  $0,3...0,6^{\circ}\text{C}$ . В [11] зміни температури атмосферного повітря представлені у вигляді послідовності з 12-ти нормально розподілених випадкових величин, кожна з яких відповідає певному місяцю року. Для пунктів спостереження України середньомісячні значення температури повітря можна запозичити з монографії [11] або з ДСТУ [10]. Стандарти місячних розподілів температури визначаються за наближеною формулою, обґрунтованою в [11]. Опір теплопередачі огорожувальної конструкції також можна представити у вигляді нормально розподіленої випадкової величини за методикою [13]. Необхідні для цього статистичні характеристики теплопровідності деяких будівельних матеріалів отримані в роботах [15, 16] за результатами експериментальних досліджень серій однотипних зразків.

Загалом виконаний огляд останніх досліджень вказує на доцільність вивчення впливу підвищених вимог норм [1] до опору теплопередачі огорожувальних конструкцій на енергоефективність будівель за критеріями втрат тепла та рівня теплової надійності, а також підтверджує наявність вихідних даних для проведення таких досліджень. Результати дослідження дозволять оцінити перспективи підвищення енергоефективності та комфортності житлових і громадських будівель, які будуть запроєктовані й зведені з урахуванням збільшених значень опору теплопередачі, встановлених в ДБН В.2.6-31:2021 [1].

**Постановка завдання.** За результатами порівняльного аналізу втрат тепла та імовірної тривалості теплових відмов стін і покриттів житлових і громадських будівель у різних регіонах України оцінити вплив підвищених вимог ДБН В.2.6-31:2021 до опору теплопередачі на енергетичну ефективність та комфортність будівель.

**Методика та об'єкти дослідження.** Енергетична ефективність огорожувальних конструкцій, запроєктованих згідно з вимогами ДБН [1] і [2], порівнюються за двома критеріями: втрати тепла на протязі опалювального періоду та імовірна річна тривалість дії теплових відмов за критерієм комфортності.

Втрати тепла через один квадратний метр непрозорої конструкції з опором теплопередачі  $R_{\Sigma}$  обчислюються за формулою, отриманою на основі відомих залежностей будівельної теплофізики [13, 21] для стаціонарного теплового режиму:

$$Q = 0,0206 \times \frac{\Theta_{\text{int}} - \Theta_h}{R_{\Sigma}} \times t_h \text{ (Мкал/рік)}. \quad (1)$$

де  $\Theta_{\text{int}}$  – встановлена нормами [1] чи [2] температура повітря в приміщенні;

$\Theta_h$  – середня температура опалювального періоду;

$t_h$  – тривалість опалювального періоду.

Теплова відмова за критерієм комфортності реалізується при перевищенні встановленого в ДБН [1, 2] допустимого значення різниці між температурою внутрішнього повітря в приміщенні та температурою внутрішньої поверхні огороження. Враховуючи випадковий характер основних факторів впливу, в роботах [12, 13] у якості показника теплової надійності використовується імовірна тривалість стану теплової відмови на протязі опалювального періоду. Згідно з [13], цей показник визначається в такому порядку:

- встановлюються описані нижче вихідні дані;
- для кожного з місяців року за формулами з [13] обчислюються математичні сподівання й стандарти  $M_{si}$  та  $S_{si}$  нормально розподілених випадкових величин температури внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції та її різниці з температурою внутрішнього повітря  $M_{\Delta}$  та  $S_{\Delta}$ ;

• для кожного  $j$ -того місяця року через функцію нормального розподілу різниці температур з математичним сподіванням  $M_{\Delta}$  і стандартом  $S_{\Delta}$  визначається імовірна тривалість стану теплової відмови (в хвиликах на місяць)

$$Q_j = 43920 \left[ 1 - F(\Delta\theta_{\max}) \right], \quad (2)$$

де  $\Delta\theta_{\max}$  – допустиме за ДБН [1] чи [2] значення різниці температури повітря в приміщенні та температури внутрішньої поверхні огороження;

43920 – кількість хвилин у місяці з середньою тривалістю 30,5 доби.

• річна тривалість стану теплової відмови (у хвиликах на рік) дорівнює сумі місячних значень (2) для місяців, що відносяться до опалювального періоду:

$$Q_{\text{year}} = \sum_j Q_j. \quad (3)$$

Для більшості території України слід враховувати 7 місяців з жовтня по квітень, на протязі яких середня температура атмосферного повітря не перевищує  $+8^{\circ}\text{C}$ .

Для порівняння енергетичних показників обрані стіни та суміщені покриття будівель, вимоги до яких у нормах [1] і [2] відрізняються лише мінімально необхідним опором теплопередачі при рівних значеннях інших показників. Умови експлуатації та вимоги до обраних для аналізу огорожувальних конструкцій наведені в таблиці 1, де вказані такі дані:

$\theta_{\text{int}}$  – температура внутрішнього повітря в приміщенні;

$\Delta\theta_{\max}$  – допустима різниця температури внутрішньої поверхні огороження та температури повітря в приміщенні згідно з вимогами ДБН [1] і [2];

$R_{\text{qmin}}$ , – мінімально допустимі значення опору теплопередачі огорожень, встановлені в ДБН [1] і [2] для першої та другої температурної зони України.

Таблиця 1 – Вихідні дані для визначення втрат тепла через огороження та оцінювання рівня їх теплової надійності

Призначення будівель	$\theta_{\text{int}}, ^{\circ}\text{C}$	Вид огороження	$\Delta\theta_{\max}$	Опір теплопередачі $R_{\text{qmin}}$ , $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$ для першої / другої зони	
				за ДБН В.2.6-31:2016	за ДБН В.2.6-31:2016
Житлові будівлі та готелі	$+20^{\circ}\text{C}$	стіни	4	3,3 / 2,8	4,0 / 3,5
		покриття	3	6,0 / 5,5	7,0 / 6,0
Лікарні та заклади дошкільної освіти	$+22^{\circ}\text{C}$	стіни	4	3,3 / 2,8	4,0 / 3,5
		покриття	3	6,0 / 5,5	7,0 / 6,0
Нежитлові громадські будівлі	$+20^{\circ}\text{C}$	стіни	5	3,3 / 2,8	4,0 / 3,5
		покриття	4	6,0 / 5,5	7,0 / 6,0

Джерело: розроблено авторами згідно даних [1] і [2]

З таблиці слідує, що втрати тепла через огорожувальні конструкції будівель слід визначати для температури внутрішнього повітря  $+20^{\circ}\text{C}$  і  $+22^{\circ}\text{C}$ , чотирьох значень опору теплопередачі стін (за ДБН 2016 та 2021 року для кожної з двох температурних зон України) та аналогічних стінам чотирьох значень опору теплопередачі покриттів. Імовірна тривалість дії теплових відмов визначається для тих же конструкцій з урахуванням різних значень  $\Delta\theta_{\max}$ , вказаних в таблиці 1 за даними норм [1, 2] для житлових і нежитлових громадських будівель.

**Вихідні дані.** Для визначення втрат тепла за формулою (1) необхідно встановити опір теплопередачі огорожувальної конструкції, температуру повітря в приміщенні

$\theta_{int}$ , середню температуру  $\theta_h$  й тривалість опалювального періоду  $t_h$  в заданому географічному районі. Розрахункові значення температури повітря в приміщенні  $\theta_{int}$  наведені в таблиці 1. Опір теплопередачі стін і покриттів  $R_{\Sigma}$  приймається рівним мінімально необхідним значенням  $R_{qmin}$  за ДБН [1] і [2], які також вказані в таблиці 1. Середня температура опалювального періоду  $\theta_h$  та його тривалість  $t_h$  прийняті за даними стандарту [10], де вони наведені для 57 метеостанцій з різних географічних районів України.

Для визначення показників теплової надійності за методикою [13] і формулами (2), (3) необхідно описати нормальними розподілами випадкові величини опору теплопередачі огороження, температури повітря в приміщенні, а також температури зовнішнього повітря в кожному з місяців року.

Згідно з [13], статистичні характеристики опору теплопередачі огороджувальних конструкцій визначаються за формулами:

$$M_R = \frac{1}{h_{si}} + \frac{1}{h_{se}} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{M_{\lambda i}} ; \quad S_R = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{S_{\lambda i} d_i}{M_{\lambda i}^2} \right)^2} , \quad (4)$$

де  $N$  – кількість шарів огороджувальної конструкції;

$d_i$  – детерміноване значення товщини  $i$ -того шару;

$M_{\lambda i}$  та  $S_{\lambda i}$  – математичне сподівання й стандарт теплопровідності  $i$ -того шару;

$h_{si}$  та  $h_{se}$  – коефіцієнти тепловіддачі для внутрішньої та зовнішньої поверхні огороження за ДСТУ [3].

Для визначення статистичних характеристик опору теплопередачі за формулами (4) необхідно задатися конкретною конструкцією огороження, характерною для сучасного будівництва. Нижче розглядаються самонесучі стіни з ніздрюватого бетону з фасадним утепленням мінераловатними плитами, а також суміщені покриття із залізобетонної плити, мінераловатних плит утеплення та гідроізоляційного шару на основі бітумних матеріалів. Товщина шарів утеплення підібрана таким чином, щоб опір теплопередачі стін і покриттів був близьким до мінімально необхідних значень, встановлених ДБН [1] і [2]. Статистичні характеристики коефіцієнтів теплопровідності матеріалів прийняті за даними [15, 16]. Результати обчислення середніх значень  $M_R$  і стандартів  $S_R$  опору теплопередачі стін і покриттів для двох температурних зон України за ДБН [1] і [2] наведені в таблиці 2. З таблиці видно, що отримані розрахункові значення опору теплопередачі покриттів і стін  $R_{\Sigma}$  максимально наближені до мінімально допустимих значень, встановлених у ДБН [1] і [2].

Таблиця 2 – Статистичні характеристики опору теплопередачі покриттів і стін

Огороджувальні конструкції	$R_{\Sigma}$	$M_R$	$S_R$
Стіна для першої зони за ДБН В.2.6-31:2016	3,254	3,571	0,147
Стіна для другої зони за ДБН В.2.6-31:2016	2,845	3,145	0,117
Стіна для першої зони за ДБН В.2.6-31:2021	4,070	4,422	0,212
Стіна для другої зони за ДБН В.2.6-31:2021	3,458	3,784	0,163
Покриття для першої зони за ДБН В.2.6-31:2016	6,034	6,308	0,507
Покриття для другої зони за ДБН В.2.6-31:2016	5,422	5,670	0,453
Покриття для першої зони за ДБН В.2.6-31:2021	7,055	7,372	0,598
Покриття для другої зони за ДБН В.2.6-31:2021	6,034	6,308	0,507

*Джерело: розроблено авторами*

Середні значення температури повітря в приміщенні приймаються незмінними протягом усього опалювального періоду та рівними розрахунковим значенням  $\theta_{int}$ , які

наведені в таблиці 1 згідно з ДБН [1, 2]. Стандарт цієї температури прийнято рівним  $0,6^{\circ}\text{C}$  за даними роботи [14].

Середньомісячні значення температури атмосферного повітря запозичені з ДСТУ [10] де вони наведені для опорної мережі з 57 метеостанцій, розміщених у різних географічних районах України. Значення стандарту температури для усіх місяців року обчислюються за наближеною формулою, отриманою та використаною в [11]. Таким чином, температура атмосферного повітря представлена у вигляді послідовності з 12-ти нормально розподілених випадкових величин для 12-ти місяців року.

**Втрати тепла** через огорожувальні конструкції обчислені за формулою (1). Розглянуто конструкції, перелічені в таблиці 1, опір теплопередачі яких відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2016 [2] і ДБН В.2.6-31:2021 [1]. Унаслідок ідентичності вимог та умов експлуатації, втрати тепла через огороження житлових і нежитлових будівель є однаковими, тому виконані розрахунки для 114 стін та 114 покриттів. Як при виборі опору теплопередачі за ДБН В.2.6-31:2016, так і за ДБН В.2.6-31:2021, втрати тепла через стіни й покриття дитячих дошкільних закладів та лікарень отримані на 9...14% більшими, ніж для житлових і громадських будівель. Це є наслідком вищої температури внутрішнього повітря в приміщенні. Унаслідок набагато більшого опору теплопередачі, втрати тепла через покриття отримані на 42...49% меншими, ніж через стіни будівель аналогічного призначення.

Порівняння річних втрат тепла через стіни та покриття будівель, опору теплопередачі яких відповідають вимогам норм [1] і [2], виконане на рисунку 1. Спостерігається досить чітка лінійна залежність між втратами тепла через однотипні конструкції, запроектовані за нормами [1] і [2]. Наведена на графіку лінія тренду вказує на те, що втрати тепла через конструкції з опором теплопередачі за ДБН В.2.6-31:2021 у середньому на 17% менші, ніж при використанні ДБН В.2.6-31:2016. Судячи з таблиці 1, різниця в опорі теплопередачі розглянутих конструкцій становить 9...25%, тобто в середньому 18%.

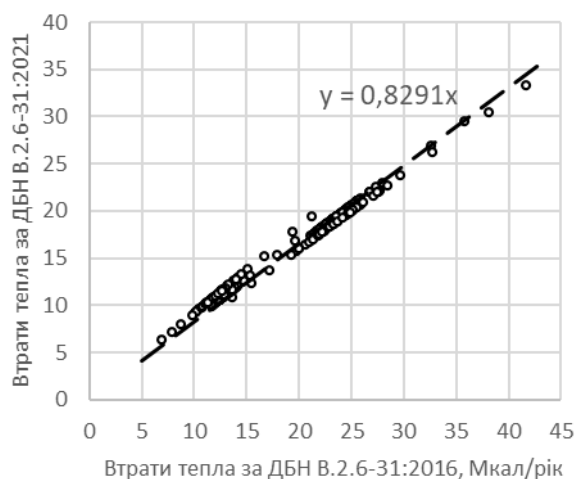


Рисунок 1 – Зміни втрат тепла при переході від ДБН В.2.6-31:2016 до ДБН В.2.6-31:2021

Джерело: розроблено авторами

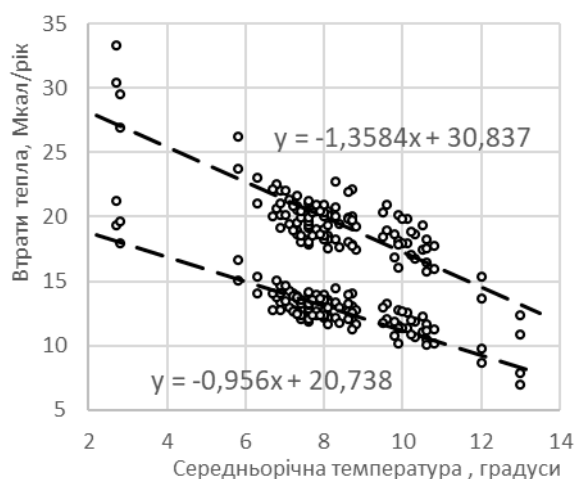


Рисунок 2 – Залежності втрат тепла від середньорічної температури повітря

На рисунку 2 зображена залежність річних втрат тепла від середньорічної температури повітря, яка є узагальненим показником температурного режиму місцевості. На рисунку прослідковуються зменшення втрат тепла через конструкції, що відповідають вимогам ДБН В.2.6-31:2021 [1], при зростанні температури зовнішнього повітря. Верхній графік відображає втрати тепла через стіни, а нижній – через

покриття. Точки з лівого боку обох графіків відповідають гірським місцевостям з низькими середньорічними температурами повітря. Відображена на рисунку 2 мінливість втрат тепла пояснюється змінами температури атмосферного повітря в межах першої та другої температурної зони за ДБН [1, 2].

Вирівнювання втрат тепла по усій території можна добитися за рахунок більш детального районування України за температурою атмосферного повітря, але такий підхід є нераціональним, оскільки він істотно ускладнить проєктування огорожувальних конструкцій. Виняток можна зробити для Південного берега Криму, який можна виділити в окрему температурну зону з меншим опором теплопередачі огорожень. Доцільно також звернути увагу на гірські місцевості з низькими температурами повітря, для яких слід збільшити опір теплопередачі огорожень залежно від географічної висоти розташування будівлі.

**Показники теплової надійності** огорожувальних конструкцій визначені за формулами (2), (3), запозиченими з [13]. За даними 57 метеостанцій України встановлені імовірні тривалості дії теплових відмов за критерієм комфортності огорожувальних конструкцій, перелічених у таблиці 1. Узагальнені результати розрахунків наведені в таблиці 3, яка для кожної з шести конструкцій містить такі дані:

- найменшу  $Q_{\min}$ , найбільшу  $Q_{\max}$ , та середню  $Q_{\text{mid}}$  з 57 метеостанцій імовірні річні тривалості теплових відмов конструкцій, опір теплопередачі яких відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2016 [2];
- те саме для конструкцій, що відповідають вимогам ДБН В.2.6-31:2021 [1];
- середнє відношення імовірної річної тривалості теплових відмов конструкцій з опором теплопередачі за [1] та за [2].

Таблиця 3 – Імовірні тривалості теплових відмов стін і покриттів (хвилин на рік)

Призначення будівель	Конструкції	За ДБН В.2.6-31:2016			За ДБН В.2.6-31:2021			$Q_{21} / Q_{16}$
		$Q_{\min}$	$Q_{\max}$	$Q_{\text{mid}}$	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$	$Q_{\text{mid}}$	
Житлові будівлі та готелі	стіни	4,5	41,7	15,7	2,6	19,2	7,5	0,48
	покриття	111	394	216	100	336	181	0,84
Лікарні та заклади дошкільної освіти	стіни	6,5	57,6	21,5	3,6	25,6	9,8	0,46
	покриття	129	452	247	114	381	203	0,82
Нежитлові громадські будівлі	стіни	0,02	0,25	0,08	0,01	0,09	0,03	0,37
	покриття	0,95	4,04	2,09	0,82	3,25	1,64	0,78

Джерело: розроблено авторами

З таблиці 3 видно, що імовірна тривалість дії теплових відмов покриттів у 12...24 рази більша, ніж для стін. Це пояснюється різними вимогами до допустимого перепаду температур повітря в приміщенні та внутрішньої поверхні огорожень (4°C для стін і 3°C для покриттів житлових будівель, лікарень та закладів дошкільної освіти). Імовірні тривалості дії теплових відмов стін і покриттів нежитлових громадських будівель отримані на два порядки меншими, ніж для стін і покриттів житлових будівель, лікарень та закладів дошкільної освіти, що також пояснюється більшими значеннями допустимого перепаду температур повітря в приміщенні та внутрішньої поверхні огорожень (5°C для стін і 4°C для покриттів).

Відношення найбільших  $Q_{\max}$  значень тривалості теплових відмов до найменших  $Q_{\min}$ , яке характеризує розкид показників надійності однотипних конструкцій в межах території України, змінюється від 3,3 до 12,5. Це вказує на значну різницю умов експлуатації огорожувальних конструкцій в різних регіонах України, яку можна

компенсувати більш точним вибором опору теплопередачі огорожувальних конструкцій залежно від кліматичних умов експлуатації.

Порівняння імовірної тривалості теплових відмов стін і покриттів, опір теплопередачі яких відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2016 [2] та ДБН В.2.6-31:2021 [1], виконано на рисунках 3 і 4. З метою адекватного відображення тривалості теплових відмов огорожень нежитлових та житлових будівель, які відрізняються на два порядки, графіки побудовані в логарифмічному масштабі.

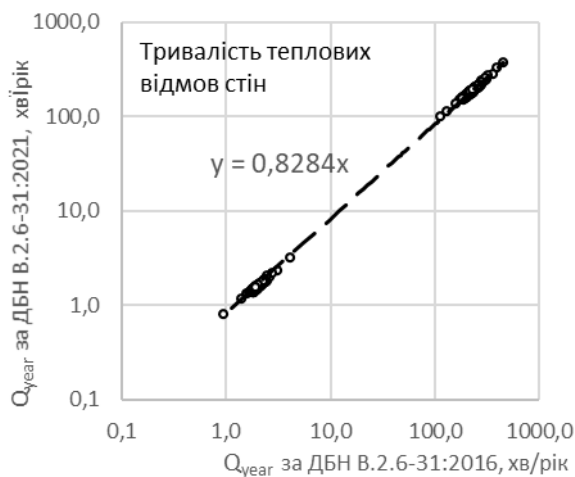


Рисунок 3 – Тривалість теплових відмов стін, що відповідають вимогам норм [1] і [2]

Джерело: розроблено авторами

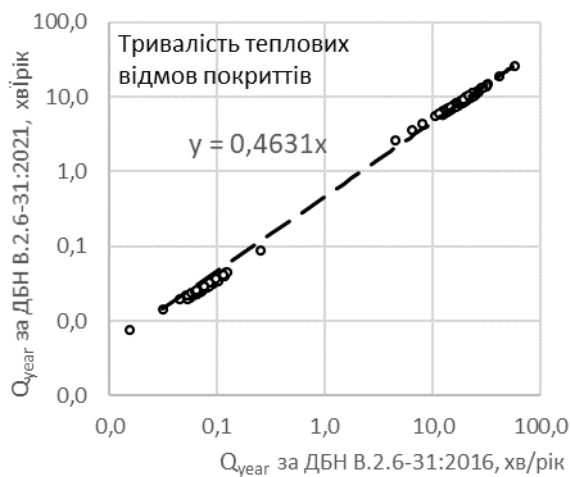


Рисунок 4 – Тривалість теплових відмов покриттів, згідно вимог норм [1] і [2]

З рисунків 3 і 4 видно, що між тривалостями теплових відмов огорожень, опір теплопередачі яких відповідає вимогам ДБН [1] та [2], існують залежності, досить близькі до лінійних. Наведені на рисунках коефіцієнти апроксимуючих ліній тренду вказують на середню різницю показників теплової надійності. У результаті переходу від вимог ДБН В.2.6-31:2016 до вимог ДБН В.2.6-31:2021 імовірні тривалості теплових відмов стін за критерієм комфортності зменшилися в середньому на 17%, а суміщених покриттів – на 54%. Різні ефекти для стін і покриттів можна пояснити відмінностями наведених в таблиці 1 вимог норм [1,2] до допустимої різниці температур внутрішнього повітря та внутрішньої поверхні огорожень для стін і для покриттів.

### Висновки.

1. Ефект від підвищення мінімально допустимого опору теплопередачі стін і покриттів житлових і громадських будівель у ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» порівняно з попередньою редакцією ДБН від 2016 року проаналізовано за двома критеріями: зменшенням річних втрат тепла через огороження та зменшенням імовірної тривалості дії теплових відмов.

2. Імовірна тривалість дії теплових відмов огорожувальних конструкцій за критерієм комфортності вирішальним чином залежить від встановленої в ДБН допустимої різниці температур внутрішнього повітря та внутрішньої поверхні огорожень. Тому цей досить умовний показник доцільно використовувати лише для порівняння рівня теплової надійності огорожень з однаковими значеннями допустимої різниці вказаних температур.

3. Реалізоване в ДБН В.2.6-31:2021 підвищення опору теплопередачі стін і покриттів житлових і громадських будівель на 9...21% обумовило зменшення втрат тепла в середньому на 17%, а також зменшення імовірної тривалості дії теплових відмов стін за критерієм комфортності на 17% та суміщених покриттів – на 54%. Таким

чином, упровадження вимог ДБН В.2.6-31:2021 сприяє істотному підвищенню рівня енергоефективності будівель.

## Список літератури

1. ДБН В.2.6-31:2021 : Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України. 2022. 23 с.
2. ДБН В.2.6-31:2016 : Теплова ізоляція будівель – [Чинний від 2017-04-01]. Київ : Міністерство будівництва України. 2016. 31 с.
3. ДСТУ 9191:2022: Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. ДП «УкрНДНЦ». 2023. 60 с.
4. Пашинський В.А., Карпушин С.О., Карюк А.М. Доцільні значення опору теплопередачі огорожень цивільних будівель в умовах України. *Нові технології в будівництві: Науково-технічний журнал*. 2017. № 33. С. 76–80.
5. Fertelli A. Determination of optimum insulation thickness for different building walls in Turkey. *Transactions of FAMENA*. 2013. Vol. 37 (2). P. 103-113.
6. Scartezzini Jean-Louis, DUMAN Öykü, Koca Aliihsan, Acet Ruşen, ÇETIN Mevlüt, Gemici Zafer. A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings based on degree day approach for 3 different demo-sites in Europe. In *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*, 2015, September 9-11th, Lausanne: LESO-PB, EPFL, 2015. P. 155-160.
7. KAYNAKLI Ömer, Kaynakli Faruk. Determination Of Optimum Thermal Insulation Thicknesses For External Walls Considering The Heating, Cooling And Annual Energy Requirements. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*. 2016. Vol. 21. P. 227-241.
8. NALBANT Önder. Türkiye has introduced a new building code to impose energy efficiency. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/t%C3%BCrkiye-has-introduced-new-building-code-impose-energy-%C3%B6nder-nalbant> (дата звернення: 26.01.2024).
9. Маляренко В.А., Герасимова О.М., Малєєв О.І. Будівельна теплофізика. Курс лекцій для студентів усіх форм навчання будівельних спеціальностей. Харків: ХНАМГ, 2007. 99 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/11314464.pdf> (дата звернення: 26.01.2024).
10. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010 : Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 123 с.
11. Пашинський В.А., Пушкар Н.В., Карюк А.М. Температурні впливи на огорожувальні конструкції будівель. Одеса : ОДАБА, 2012. 180 с.
12. Пашинський В.А., Джирма С.О., Плотніков О.А. Вибір показників теплової надійності огорожувальних конструкцій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : Збірник наукових праць*. 2017. Вип. 7. С. 194-200.
13. Kariuk A., Pashynskiy V., Pashynskiy M., Mammadova F. Methods of Probabilistic Assessment of Building Enclosing Structures Thermal Reliability. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Cham. 2022. Vol. 181. P.179-189. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_18) (дата звернення: 26.01.2024).
14. Pashynskiy V.A., Pashynskiy M.V., Nastoyashchiy V.A., Skrynnyk I.O. Statistical characteristics of wall temperature for assessing thermal reliability and energy efficiency of residential buildings. *Modern engineering and innovative technologies*. 2023. Issue 26 part 2. P. 19-25. URL: <https://doi.org/10.30890/2567-5273> (дата звернення: 26.01.2024).
15. Шульгін В. В., Карюк А. М. Імовірнісне подання технічних характеристик теплоізоляційних матеріалів. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2013. Вип. 4(39). С. 257-262.
16. Leshchenko, M. V., & Semko, V. (2015). Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. Vol. 60(8). P. 44-55. URL: <https://doi.org/10.5862/MCE.60.6> (дата звернення: 26.01.2024).

## References

1. DBN V.2.6-31:2021 : Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist' budivel' [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. Kyiv : Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorij Ukrainy [in Ukrainian].
2. DBN V.2.6-31:2016 : Teplova izoliatsiia budivel' [Thermal insulation of buildings] from April 1, 2017. Kyiv : Ministerstvo budivnytstva Ukrainy [in Ukrainian].

3. DSTU 9191:2022: Teploizoliatsiia budivel'. Metod vyboru teploizoliatsijnoho materialu dlia uteplennia budivel' [Thermal insulation of buildings. The method of choosing heat-insulating material for building insulation]. DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
4. Pashyns'kyj, V.A., Karpushyn, S.O. & Kariuk, A.M. (2017). Dotsil'ni znachennia oporu teploperedachi ohorodzen' tsyvil'nykh budivel' v umovakh Ukrainy [Appropriate values of the heat transfer resistance of the enclosures of civil buildings in the conditions of Ukraine]. *Novi tekhnologii v budivnytstvi: Naukovo-tekhnichnyj zhurnal – New technologies in construction: Scientific and technical journal*, 33, 76-80 [in Ukrainian].
5. Fertelli, A. (2013): Determination of optimum insulation thickness for different building walls in Turkey. *Transactions of FAMENA*, 37 (2), 103-113 [in English].
6. Scartezzini Jean-Louis, DUMAN Öykü, Koca Aliihsan, Acet Ruşen, ÇETIN Mevlüt, Gemici Zafer. A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings based on degree day approach for 3 different demo-sites in Europe. In *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*, 2015, September 9-11th, Lausanne: LESO-PB, EPFL, 2015. P. 155-160 [in English].
7. KAYNAKLI, Ömer & Kaynakli, Faruk. (2016). Determination Of Optimum Thermal Insulation Thicknesses For External Walls Considering The Heating, Cooling And Annual Energy Requirements. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21, 227-241 [in English].
8. NALBANT Önder. Türkiye has introduced a new building code to impose energy efficiency. Retrieved from <https://www.linkedin.com/pulse/t%C3%BCrkiye-has-introduced-new-building-code-impose-energy-%C3%B6nder-nalbant> [in English].
9. Maliarenko, V.A., Herasymova, O.M. & Malieiev, O.I. (2007). *Budivel'na teplofizyka [Thermal physics]*. Kharkiv: KHNAMH. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/11314464.pdf> [in Ukrainian].
10. DSTU-N B V.1.1–27:2010: Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsijnykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivel'na klimatolohiia [Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, and against fire. Building climatology]. Kyiv: Ministerstvo rehional'noho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy [in Ukrainian].
11. Pashyns'kyj, V.A., Pushkar, N.V. & Kariuk, A.M. (2012). *Temperaturni vplyvy na ohorodzhuval'ni konstruktsii budivel' [Temperature effects on the enclosing structures of buildings]*. Odesa : ODABA [in Ukrainian].
12. Pashyns'kyj, V.A., Dzhyrma, S.O. & Plotnikov, O.A. (2017). Vybir pokaznykiv teplovoi nadijnosti ohorodzhuval'nykh konstruktsij [Selection of indicators of thermal reliability of enclosing structures]. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi : Zbirnyk naukovykh prats' – Collection of scientific papers*, 7, 194-200 [in Ukrainian].
13. Kariuk A., Pashynskyi V., Pashynskyi M., Mammadova F (2022). Methods of Probabilistic Assessment of Building Enclosing Structures Thermal Reliability. *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer, Cham. Vol 181. P.179-189. Retrieved from URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_18) [in English].
14. Pashynskyi V.A., Pashynskyi M.V., Nastoyashchii V.A., Skrynnyk I.O (2023). Statistical characteristics of wall temperature for assessing thermal reliability and energy efficiency of residential buildings. *Modern engineering and innovative technologies*, 26, 2. 19-25. Retrieved from <https://doi.org/10.30890/2567-5273> [in English].
15. Shul'hin, V. V. & Kariuk, A. M. (2013). Imovirmisne podannia tekhnichnykh kharakterystyk teploizoliatsijnykh materialiv [Probabilistic presentation of technical characteristics of heat-insulating materials]. *Zbirnyk naukovykh prats' (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) [A collection of scientific papers (industry mechanical engineering, construction)]*, 4 (39), 257-262 [in Ukrainian].
16. Leshchenko, M. V., & Semko, V. (2015). Thermal characteristics of the external walling made of cold-formed steel studs and polystyrene concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 60(8), 44-55. Retrieved from <https://doi.org/10.5862/MCE.60.6> [in English].

**Victor Pashynskyi**, Prof., DSc., **Vladyslav Nastoyaschii**, Prof., PhD tech. sci., **Mykola Pashynskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Bohatyrov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Impact of increasing regulatory requirements on the level of thermal reliability and heat loss through walls and roofs of residential and public buildings**

New edition of the State Building Regulations of Ukraine DBN V.2.6-31:2021 "Thermal insulation and energy efficiency of buildings" significantly increases the requirements for heat transfer resistance of walls and coatings of civil buildings. This study was carried out with the aim of evaluating the impact of the increased requirements of DBN V.2.6-31:2021 on the energy efficiency and comfort of buildings by comparing the thermal reliability characteristics of walls and roofs of civil buildings in different regions of Ukraine.

The walls and combined roofs of residential and non-residential public buildings were analysed, the requirements for which in DBN B.2.6-31:2016 and DBN B.2.6-31:2021 differ in the minimum permissible value of heat transfer resistance, but coincide in other indicators. Climate conditions for the operation of buildings are reflected by data on atmospheric air temperature at 57 weather stations of Ukraine, which are given in DSTU-N B V.1.1–27:2010. The comparison of the same type of enclosing structures is made according to the criteria of reducing annual heat losses due to the enclosing and the probable duration of thermal failures. Annual heat losses in the set of each of the 57 weather stations are calculated according to the known dependencies of thermal physics. The durations of thermal failures of enclosures according to the comfort criterion are determined by the probabilistic method previously developed by the authors, which takes into account random fluctuations in the temperature of the external atmospheric and internal air in the room, as well as the random character of the heat transfer resistance of the enclosures.

The probable duration of thermal failures of enclosing structures according to the comfort criterion, depending on the permissible temperature difference of the internal air and the inner surface of the enclosing structure, established in DBN B.2.6-31, can differ by two orders of magnitude. This indicator should be used only to compare the level of thermal reliability of enclosures with the same values of the permissible temperature difference. The increase in the heat transfer resistance of walls and roofs of residential and public buildings implemented in DBN V.2.6-31:2021 led to a decrease in heat loss by an average of 17%, a decrease in the probable duration of thermal failure of walls according to the comfort criterion by 17%, and combined roofs by 54 %.

**residential and public buildings, walls, roofs, heat loss, the duration of the thermal failure**

*Одержано (Received) 03.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.02.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

УДК 624.014.27:004

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.74-82](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.74-82)

**Г.Д. Портнов**, доц., канд. техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **О. В. Кузик**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: budkom999@gmail.com, vvdarienko@gmail.com*

**Л.В. Гасенко**, доц., канд. техн. наук

*Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон, Україна*  
*e-mail: lin02011@meta.ua*

## Створення бази комплементарних гнutoзварних профілів решітчастих металокопструкцій

Дослідження присвячено розробці бази даних комплементарних гнutoзварних профілів для автоматизованого проектування решітчастих металокопструкцій. Значна увага приділяється урахуванню місцевої стійкості та технологічних обмежень сполучення елементів металевих копструкцій ферм. Описано методику аналізу моделей проміжних вузлів з прямокутних труб у програмі SolidWorks і обробку результатів у Microsoft Excel, що дозволяє групувати елементи в комплементарні поєднання профілів. Результати дослідження демонструють зв'язок технологічних обмежень з міцністю елементів та спрощують процес підбору профілів за ДСТУ EN 10219-2:2009, мінімізуючи недонапруження до 5%.

**металеві копструкції, сталева ферма, трикутна решітка, гнutoзварні профілі, ексцентриситет**

**Постановка проблеми.** Сталеві прокатні профільні елементи широко застосовуються в сучасних металокопструкціях завдяки можливості створення виробів з мінімальною металоємністю [8]. На стадії проектування таких копструкцій необхідно

© Г. Д. Портнов, А.А. Тихий, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов, О. В. Кузик, Л.В. Гасенко, 2024

підбирати їх переріз не тільки із умов міцності та жорсткості, а й вирішувати задачу врахування місцевої стійкості та технологічні обмеження сполучення елементів конструкції. Це знижує ефективність використання систем автоматизованого проектування через відсутність систематизованої бази відповідних даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При задаванні шарнірної схеми поєднання стержневих елементів ферм покриття, однією зі значних їх переваг є робота більшості її елементів на повздовжні зусилля без виникнення згинальних моментів, що дозволяє зробити конструкцію оптимальною за масою [15; 16].

Ферми із замкнутих гнutoзварних профілів проектуються, зазвичай, з вузлами без фасонки та спиранням легкого покриття безпосередньо на верхній пояс або на прогони [13]. Для спрощення конструкції вузлів решітку приймають трикутну без додаткових стійок [14]. В Україні виготовлення кроквяних ферм із таких елементів виконується, зокрема, із урахуванням вимог ДСТУ Б В.2.6-74:2008 «Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу» [6]. Матеріал конструкцій приймається із сталі С245 чи С355 за ДСТУ 8539:2015 «Прокат для будівельних сталевих конструкцій». Пояси та елементи решітки виготовляються із квадратних і прямокутних труб за ДСТУ 8940:2019 «Труби сталеві профільні» [4] або ДСТУ EN 10219-2:2019 «Профілі порожнисті зварні холодного формування нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій» [5].

Ефективним прикладом застосування сталевих конструкцій виробничих будівель, виготовлених із замкнутих гнutoзварних профілів прямокутного перерізу, є ферми покриття типу «Молодечно». У даний час широке розповсюдження отримали ферми типу «Молодечно» з трикутною решіткою. У вузлах таких ферм передбачено безпосереднє з'єднання розкосів із поясами (див. рис.1).

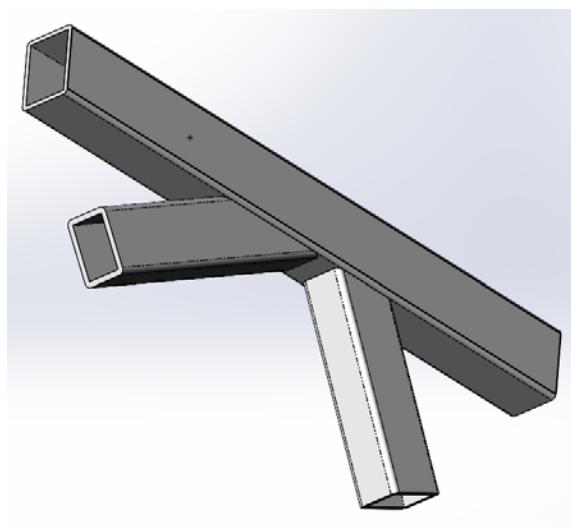


Рисунок 1 – Загальний вигляд проміжного вузла ферми

*Джерело: розроблено авторами*

Фактично у більшості випадків вузли ферм виконуються зварними, тому прийняте в розрахунку шарнірне з'єднання елементів ферм не реалізується. У зварній фермі жорстке сполучення елементів призводить до виникнення згинальних моментів у вузлах утвореної таким чином статично невизначеної конструкції. Значення згинальних моментів в елементах, які поєднуються, зростає, коли їх осі не перетинаються в одній точці (розцентрування осей елементів у вузлі). Це може відбуватися як у результаті похибки виготовлення, так і згідно з проектним рішенням. У цьому випадку елементи

ферм слід розраховувати як позацентрово-стиснуті, що обмежує можливості раціонального використання матеріалу [3; 17].

Вплив розцентрування осей елементів у вузлі на працездатність конструкції може бути різним і залежить від умов навантаження елементів та граничного стану.

Щоб уникнути подвійного різну у розкосах під час влаштування їх стикування у вузлах, допускається розцентрування. При обмеженні величини розцентрування  $e \leq 0,25H$ , де  $H$  – висота панелі елемента пояса в площині ферми, фактична жорсткість вузлів незначно впливає на зусилля в елементах, тому у розрахунковій схемі такі вузли ферм приймаються шарнірними.

Згідно з ДБН В.2.6-198.2014 [3], осі стержнів ферм і решітчастих структур повинні бути, як правило, центрованими в усіх вузлах. Центрування стержнів у фермах слід виконувати у вузлах за центрами ваги їх поперечних перерізів. За наявності ексцентриситетів у вузлах, елементи ферм і решітчастих структур слід розраховувати з урахуванням дії відповідних згинальних моментів (п. 17.3.1 ДБН В.2.6-198.2014) [3].

При розрахунку плоских ферм, з'єднання елементів решітки з поясом у вузлах ферм допускається приймати шарнірними при трубчастих типах поперечних перерізів елементів, якщо відношення  $h/l \leq 0,1$ , де  $h$  – висота перерізу,  $l$  – геометрична довжина елемента. При перевищенні зазначених відношень  $h/l$ , слід враховувати додаткові згинальні моменти, що виникають в елементах ферми від жорсткості вузлів; при цьому допускається враховувати жорсткості вузлів у фермах наближеними методами, а осьові зусилля визначати за шарнірною схемою (п. 17.3.2 ДБН В.2.6-198.2014) [3].

Крім того, існують обмеження співвідношень розмірів контактуючих поверхонь елементів решітчастих структур з міркувань збереження місцевої стійкості елементів.

До технологічних обмежень відносяться співвідношення розмірів перерізів елементів поясу і решітки, кути між осями а також мінімальна відстань між сусідніми зварними швами.

При розрахунку вузлів ферм зі стержнями з прямокутних труб і прикріпленням елементів решітки безпосередньо до поясу необхідно перевіряти несучу здатність:

- стінки поясу при місцевому зминанні (продавлюванні) у місцях примикання елементів решітки;
- бічної стінки поясу в місці примикання стиснутого елемента решітки;
- елементів решітки в перерізі, що примикає до поясу;
- при перевірці міцності стінки необхідно враховувати сумісну дію зусиль у поличці та в прилеглому елементі решітки (п. 17.3.5 ДБН В.2.6-198.2014) [3].

Розрахунок вузлів з вираженим ексцентриситетом в [3] не знайшов чіткого представлення, ферми розраховуються з врахуванням жорсткості вузлів, але методика розрахунку не приводиться. Запропоновані в [2; 10; 11] методи не знайшли відображення в сучасних нормативних документах.

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Зазвичай, розробка конструкції ферм виконується у 4 етапи:

- 1) підбір перерізів елементів за результатами розрахунку ферми за шарнірною схемою;
- 2) креслення вузлів ферми для визначення ексцентриситетів з урахуванням конструктивних і технологічних обмежень;
- 3) уточнення дійсної розрахункової схеми ферми з урахуванням отриманих ексцентриситетів;
- 4) підбір перерізів елементів дійсної розрахункової схеми з урахуванням наявності потрібних профілів.

На практиці навіть при використанні сучасних ПК типу «Ліра» [1; 7; 9] процес підбору перерізів має трудомісткий характер і проводиться у наступній послідовності:

1) після опрацювання розрахункової схеми, ПК «Ліра» визначає розрахункові внутрішні зусилля (за РСЗ чи РСН) в стержнях;

2) ПК «Ліра» пропонує обрати перерізи елементів в рамках визначеної номенклатури профілів;

3) перевірка запропонованих профілів з урахуванням особливостей роботи тонкостінних елементів і технологічних обмежень виробництва, як правило, показує непридатність запропонованого варіанта;

4) конструктор вручну підбирає профілі, спираючись на попередні результати розрахунку з врахуванням обмежень, характерних для тонкостінних конструкцій та наявної номенклатури профілів;

5) підібрані профілі вводяться в розрахункову схему з перерахунком зусиль;

6) при отриманні позитивного результату виконується розрахунок вузлів з урахуванням дійсних ексцентриситетів;

7) як правило, запропоновані профілі потребують корегування виходячи зі значень зусиль, виникаючих в перерізах елементів і зварних швах;

8) процес виконання п.п. 5 і 6 повторюється до досягнення прийнятних результатів.

В умовах обмеження номенклатури наявних профілів рішення приймається на підставі розгляду можливих комбінацій елементів поясу і решітки з оцінюванням економічних показників конструкції, урахуванням логістичних витрат, що потребує перебору багатьох варіантів зі значними витратами часу.

**Завданнями** проведеного авторами дослідження є:

1. Обґрунтування методики визначення сполучень гнutoзварних профілів прямокутного перерізу (комплементарних сполучень), які відповідають як діючим вимогам першого граничного стану, так і технологічним обмеженням виробництва.

2. Розробка таблиці комплементарних сполучень гнutoзварних профілів прямокутного перерізу за ДСТУ EN 10219-2:2019 [5].

**Виклад основного матеріалу.** Геометричні параметри вузла ферми, що розглядається, представлені на рисунках 2 і 3.

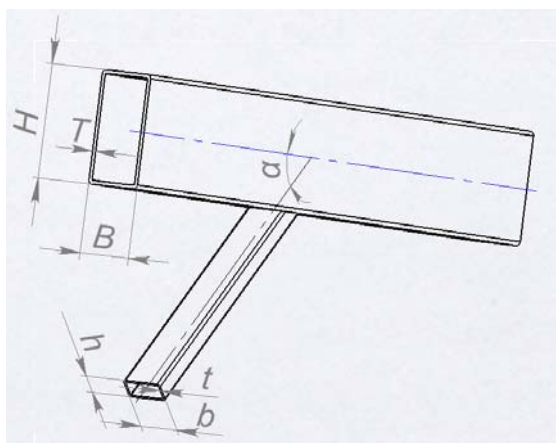


Рисунок 2 – Геометричні параметри сполучення елементів поясу і решітки

*Джерело: розроблено авторами*

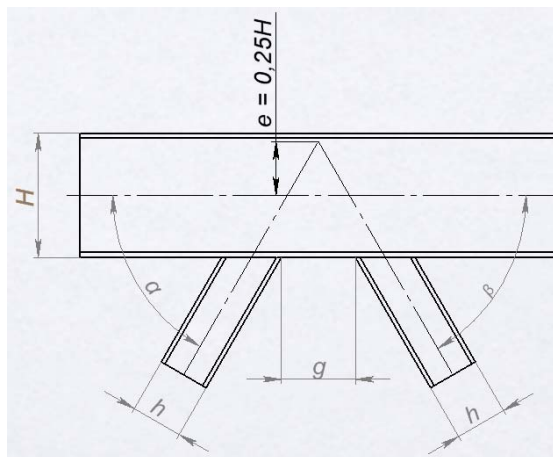


Рисунок 3 – Геометричні параметри вузла ферми з трикутною решіткою

*Джерело: розроблено авторами*

У таблиці 1 представлені граничні умови формування проміжного вузла ферми (креслення див. рису. 2 і 3) з поясненнями.

Таблиця 1 – Обмеження значень геометричних параметрів проміжного вузла ферми

№	Гранична умова	Пояснення
1	$\alpha \geq 30^\circ; \beta \geq 30^\circ$	Забезпечення щільності примикання розкосів
2	$b \leq B - 2(T + t)$	Зручність накладання зварних швів
3	$b \geq 0,6B$	Запобігання продавлюванню
4	$g = 20 \text{ мм}$	Зручність накладання зварних швів
5	$e = 0,25H$	Відповідність шарнірній схемі сполучення стержнів
6	$H \geq B$	Стійкість із площини ферми забезпечується зв'язками
7	$h \leq b$	Розрахункові довжини елементів решітки в головних площинах однакові, раціональна орієнтація обумовлена прагненням максимально зблизити стінки поясу та розкосу
8	$T \leq 3t$	Зварюваність тонкостінних елементів
9	$T \geq 3 \text{ мм}; t \geq 3 \text{ мм}$	Вимоги ДСТУ Б В.2.6-74:2008

Джерело: розроблено авторами

Обмежимо граничну величину розцентрування у вузлі ферми  $e \leq 0,25H$ . Визначимо сполучення  $H$  і  $h$  (див. рис. 2 і 3) із запропонованого сортаменту, для яких є можливість обрання кута нахилу розкоса в межах  $\alpha + \beta \geq 120^\circ$ . Зазначені передумови вибрані з міркувань того, що фактичний ексцентриситет не буде суттєво впливати на розподіл зусиль у вузлі.

На основі граничних умов, приведених в таблиці 1 були обчислені можливі комбінації комплементарних перерізів профілів поясів та решітки з квадратних і прямокутних труб за ДСТУ EN 10219-2:2019 «Профілі порожнисті зварні холодного формування нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій» [5].

Фрагмент таблиці, розроблений в програмі Microsoft Excel, представлений в таблиці 2, у якій  $A_n$  і  $A_p$  – відповідно площі поперечних перерізів поясу і розкоса ферм.

Таблиця 2 – Фрагмент таблиці комплементарних профілів за ДСТУ EN 10219-2:2019

№	Пояс		Розкіс	
	$B \times H \times T$ , мм	$A_n$ , см <sup>2</sup>	$b \times h \times t$ , мм	$A_p$ , см <sup>2</sup>
1	2	3	4	5
1	40×60×3	5,41	25×25×3	2,41
2	40×80×3	6,61	25×25×3	2,41
3	50×70×3	6,61	30×30×3	3,01
4	60×60×3	6,61	40×20×3	3,01
5	40×60×4	6,95	25×25×3	2,41
6	40×100×3	7,81	25×25×3	2,41
7	50×90×3	7,81	30×30×3	3,01
8	60×80×3	7,81	40×20×3	3,01
9	50×100×3	8,41	30×30×3	3,01
10	40×80×4	8,55	25×25×3	2,41
11	50×70×4	8,55	30×30×3	3,01

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
12	60×60×4	8,55	40×20×3	3,01
13	60×100×3	9,01	40×20×3	3,01
14	80×80×3	9,01	50×30×3	4,21
15	80×80×3	9,01	50×30×4	5,35
16	80×80×3	9,01	60×40×3	5,41
17	80×80×3	9,01	60×40×4	6,95
18	80×80×3	9,01	60×40×5	8,36
19	40×100×4	10,1	25×25×3	2,41
20	50×90×4	10,1	30×30×3	3,01
21	60×80×4	10,1	40×20×3	3,01
22	60×120×3	10,2	40×20×3	3,01
23	80×100×3	10,2	50×30×3	4,21
24	80×100×3	10,2	50×30×4	5,35
25	80×100×3	10,2	50×50×3	5,41
26	80×100×3	10,2	50×50×4	6,95
27	80×100×3	10,2	50×50×5	8,36
28	80×100×3	10,2	60×40×3	5,41

Джерело: розроблено авторами

Запропонована методика попереднього визначення робочих варіантів вузлів ферм, за допомогою розробленої бази комплементарних сполучень елементів, дозволяє значно зменшити трудомісткість процесу підбора перерізів за рахунок скорочення п.п. 3...7 процесу підбору перерізів ферм за допомогою ПК типу «Ліра» (див. вище).

Робота з таблицею комплементарних профілів (див. табл. 2) виконується за наступним алгоритмом.

1. За результатами розрахунку розрахункової схеми ферми за допомогою програмних комплексів [1; 7; 9; 12], розробленої без урахування ексцентриситетів, визначаються площі перерізів панелі поясу  $A_n$  і розкосу  $A_p$ .

2. Використовуючи фільтри «МІЖ» таблиці Excel для перерізів панелі поясу  $A_n$  і розкосу  $A_p$  з урахуванням дискретності значень таким чином, щоб можливе недонапруження не перевищувало 5%, отримуємо таблицю допустимих сполучень профілів.

3. Виконується верифікація запропонованих варіантів з розрахунком напружень в елементах і вузлах моделі.

Кількість можливих комбінацій перерізів «Пояс – розкіс»  $N = 4582$ . Діапазони значень  $A_n = 5,41 \dots 235 \text{ см}^2$ ;  $A_p = 2,41 \dots 139 \text{ см}^2$  (в залежності від значення  $A_n$ ).

Зі зростанням значень площі перерізів елементів поясу  $A_n$  і розкосу  $A_p$  можливість обрання варіантів профілів з недонапруженням 5% зникає. Так, наприклад, різниця між найближчими значеннями  $A_n$  235 і 203  $\text{см}^2$  складає 11,5% (див. рис. 4).

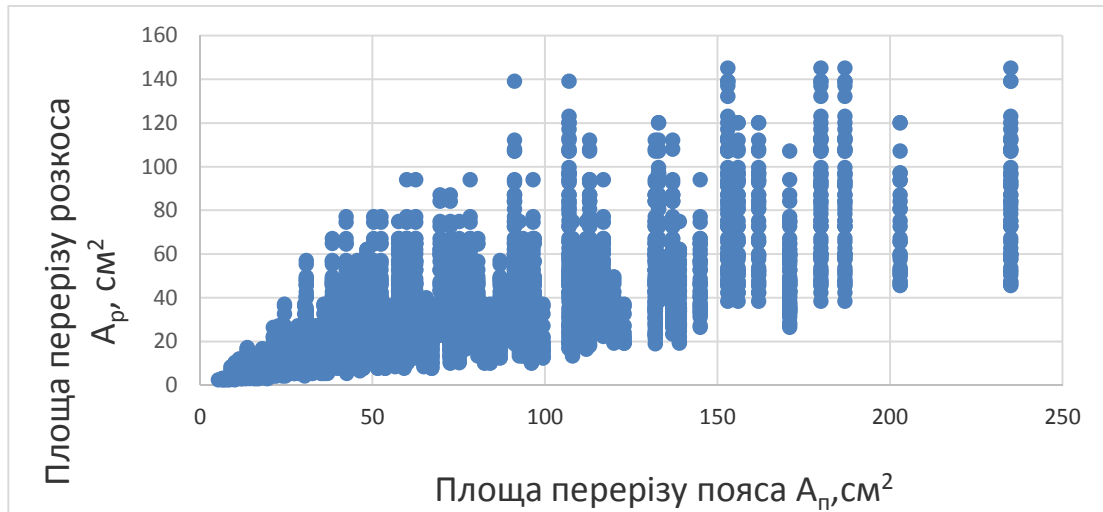


Рисунок 4 – Розподіл комбінацій перерізів комплементарних профілів за ДСТУ EN 10219-2:2019  
Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** У результаті проведених досліджень встановлено наступне.

1. Представлена методика обробки даних параметрів гнutoзварних профілів прямокутного поперечного перерізу зі зведенням результатів в таблицю Microsoft Excel створює передумови удосконалення процесів автоматизації розрахунку і проектування зварних конструкцій за рахунок створення бази комплементарних сполучень.

2. Окремі підібрані значення комплементарних сполучень профілів із заданою номенклатурою перерізів не дозволяють проектування решітчастих конструкцій із мінімальним недонапруженням 5%.

3. Аналіз дискретних площ перерізів комплементарних профілів створює умови для включення в ДСТУ нової номенклатури профілів, які дозволять здійснювати економічно обгрунтований вибір перерізів з 5% недонапруженням.

## Список літератури

1. Григор'єв О.В. Ліра-САПР: Проектування та розрахунок металевих конструкцій. Київ : Вища школа, 2016. 240 с.
2. Григор'єв О.В. Проектування та розрахунок балок і ферм з гнutoзварних труб. *Науковий вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2017. № 834. С. 245-250.
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1. К.: Держбуд України, 2022. 205 с.
4. ДСТУ 8940:2019. Труби сталеві профільні. Технічні умови. К.: Держбуд України, 2021. 42 с.
5. ДСТУ EN 10219-2:2009. Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій. Частина 2. Розміри, граничні відхилення та характеристики (EN 10219-2:2006, IDT). К.: Держбуд України, 2021. 67 с.
6. ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Конструкції будинків і споруд. Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу. Технічні умови. К.: Держбуд України, 2009. 27 с.
7. Іванов М.М., Ковальчук В.П., Іванова І.М. Розрахунок будівельних конструкцій в системі Ліра-САПР. Львів : Світ, 2017. 320 с.
8. Пічугін С.Ф., Семко О.В., Бібік В.М., Трусів Г.М., Бібік М.В., Гасенко А.В. Особливості зміни зусиль в елементах сталевих каркасів промислової будівлі за 80 років експлуатації. *Вісник ОДАБА*. 2016. Вип. 61. С. 339-346.
9. Ткаченко В.М., Ткаченко Б.М., Ткаченко О.В. Ліра-САПР: Посібник користувача. Київ : Академія, 2018. 480 с.
10. Ткаченко В.М., Ткаченко Б.М., Ткаченко О.В. Проектування та виготовлення гнutoзварних трубчастих ферм. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2018. № 854. С. 351-356.

11. Шевченко В.В., Шевченко О.А. Несуча здатність гнutoзварних трубчастих ферм. *Сучасні проблеми науки та освіти*. 2019. № 1. С. 130-134.
12. Шевченко В.В., Шевченко О.А. Проектування та розрахунок металевих ферм з круглих труб на основі програмного комплексу Ansys. *Сучасні проблеми науки та освіти*. 2018. № 4. С. 124-128.
13. Hancock G.J. Tubular Structures: Design and Behaviour. Elsevier, 2013.
14. Richard J.Y., Dubas P. Design of Steel Truss Bridges with Tubular Members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93. P. 14-27.
15. Richard J.Y., Dubas P. Structural Steel Design. London : CRC Press, 2014. 800 p.
16. Sherbourne A.N. Design of Steel Structures. New York : John Wiley & Sons, 2016. 640 p.
17. Sherbourne A.N. Design of Tubular Steel Structures. CRC Press, 2015.

## References

1. Hryhor'iev, O.V. (2016). Lira-SAPR: *Proektuvannia ta rozrakhunok metalevykh konstruksij [Lira-CAD: Design and calculation of metal structures]*. Kyiv : Vyscha shkola [in Ukrainian].
2. Hryhor'iev, O.V. (2017). Proektuvannia ta rozrakhunok balok i ferm z hnutozvarnykh trub [Design and calculation of beams and trusses from bent-welded pipes]. *Naukovyj visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika» – Scientific Bulletin of the Lviv Polytechnic National University, 834, 245-250* [in Ukrainian].
3. DNB V.2.6-198:2014. (2022). Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu № 1 [Steel structures. Design standards. With Amendment No. 1]. K.: Derzhbud Ukrainy [in Ukrainian].
4. DSTU 8940:2019. (2021). Truby stalevi profil'ni. Tekhnichni umovy [Steel profile pipes. Specifications]. K.: Derzhbud Ukrainy [in Ukrainian].
5. DSTU EN 10219-2:2009. (2021). Profili porozhnysti zvarni kholodnoho formuvannia z nelehovanykh i dribnozernistykh stalej dlia konstruksij. Chastyna 2. Rozmiry, hranychni vidkhyly ta kharakterystyky [Cold-formed hollow welded profiles of unalloyed and fine-grained steels for structures. Part 2. Dimensions, tolerances and characteristics] (EN 10219-2:2006, IDT). K.: Derzhbud Ukrainy [in Ukrainian].
6. DSTU B V.2.6-74:2008. (2009). Konstruksii budynkiv i sporud. Fermy stalevi krokviani z hnutozvarnykh profiliv priamokutnoho pererizu. Tekhnichni umovy [Structures of buildings and structures. Steel rafter trusses made of bent-welded profiles of rectangular section. Specifications]. K.: Derzhbud Ukrainy [in Ukrainian].
7. Ivanov, M.M., Koval'chuk, V.P. & Ivanova, I.M. (2017). *Rozrakhunok budivel'nykh konstruksij v systemi Lira-SAPR [Calculation of building structures in the Lira-CAD system]*. L'viv : Svit [in Ukrainian].
8. Pichuhin, S.F., Semko, O.V., Bibik, V.M., Trusov, H.M., Bibik, M.V. & Hasenko, A.V. (2016). Osoblyvosti zminy zusyl' v elementakh stalevoho karkasu promyslovoi budivli za 80 rokiv ekspluatatsii [Peculiarities of changes in forces in steel frame elements of an industrial building over 80 years of operation]. *Visnyk ODABA – Bulletin ODABA, 61, 339-346* [in Ukrainian].
9. Tkachenko, V.M., Tkachenko, B.M. & Tkachenko, O.V. (2018). *Lira-SAPR: Posibnyk korystuvacha [Lira-CAD: User's Guide]*. Kyiv : Akademiia [in Ukrainian].
10. Tkachenko, V.M., Tkachenko, B.M. & Tkachenko O.V. (2018). Proektuvannia ta vyhotovlennia hnutozvarnykh trubchastykh ferm [Design and manufacture of bent-welded tubular trusses]. *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika» – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University, 854, 351-356* [in Ukrainian].
11. Shevchenko, V.V. & Shevchenko, O.A. (2019). Nesucha zdattnist' hnutozvarnykh trubchastykh ferm [Bearing capacity of bent-welded tubular trusses]. *Suchasni problemy nauky ta osvity – Modern problems of science and education, 1, 130-134* [in Ukrainian].
12. Shevchenko, V.V. & Shevchenko, O.A. (2018). Proektuvannia ta rozrakhunok metalevykh ferm z kruhlykh trub na osnovi prohramnoho kompleksu Ansys [Design and calculation of metal trusses from round pipes based on the Ansys software complex]. *Suchasni problemy nauky ta osvity – Modern problems of science and education, 4, 124-128* [in Ukrainian].
13. Hancock, G.J. (2013). Tubular Structures: Design and Behaviour. Elsevier [in English].
14. Richard, J.Y. & Dubas, P. (2014). Design of Steel Truss Bridges with Tubular Members. *Journal of Constructional Steel Research, 93, 14-27* [in English].
15. Richard, J.Y. & Dubas, P. (2014). Structural Steel Design. London : CRC Press. 800 p. [in English].
16. Sherbourne, A.N. (2016). Design of Steel Structures. New York : John Wiley & Sons. 640 p. [in English].
17. Sherbourne, A.N. (2015). Design of Tubular Steel Structures. CRC Press [in English].

**Gennadiy Portnov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dariienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Lina Hasenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Kherson State agrarian and economic University, Kherson, Ukraine*

### **Creating a database of complementary bent-welded profiles of lattice metal structures**

This article discusses the development of a database for complementary bent-welded profiles, which facilitates the automation of the design of lattice metal structures. The main focus is on determining the conditions necessary to create efficient and technologically optimized solutions for metal trusses, taking into account the local stability of elements and the limitations of technological connections. The methodology involves analyzing models of rectangular tube intermediate assemblies in Solid Works and processing the results in Microsoft Excel, which allows elements to be grouped into complementary profile combinations. This study helps to link technical constraints to the strength of elements and simplifies the selection of profiles in accordance with DSTU EN 10219-2:2019, minimizing under loading by up to 5%.

The authors emphasize the importance of technological optimization in the design of metal structures, using modern software solutions to analyze and select optimal solutions. They emphasize the importance of integrating profile databases with design software, which significantly increases the speed and quality of design solutions. This work makes a significant contribution to the practice of designing lattice metal structures by providing engineers with tools for efficiently selecting profiles based on technical characteristics and constraints.

The article concludes with an analysis of the results obtained and prospects for further research in this area. The authors discuss the possibilities of expanding the database to include additional profile parameters and developing more flexible design tools, which will allow for even greater technological efficiency and cost-effectiveness of metal structures. This approach opens up new horizons for innovation in the design of metal structures, contributing to the development of more sustainable and efficient construction.

**metal structures, steel truss, triangular lattice, bent-welded profiles, eccentricity**

*Одержано (Received) 16.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.02.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 632.935

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.83-94](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.83-94)

**В.В. Онопа**, інженер, **Д.Ю. Артеменко**, доц., канд. техн. наук, **О.А. Кислун**, доц., канд. техн. наук, **В.А. Онопа**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua*

## Математична модель верхнього робочого елемента механічно-пневматичного збирача комах-шкідників пасльонових культур

В роботі наведені результати пошукових теоретичних досліджень конструктивних особливостей верхнього робочого елемента пристрою для механічно-пневматичного збирання комах-шкідників пасльонових культур. Під час аналізу наукових джерел було встановлено, що комахи-шкідники значною мірою призводять до серйозних втрат у світовому виробництві сільськогосподарської продукції. Пестицидний обробіток є основним методом боротьби з ними, проте така практика призводить до забруднення навколишнього середовища, загрози здоров'ю людини та підвищення ризику захворювань. У зв'язку з цим велика увага приділяється розробці екологічно безпечних методів боротьби. Виявлено, що одним з найбільш ефективних методів є фізичне збирання комах-шкідників пристроями різної дії. Тому подальша розробка нових конструкцій пристроїв для виконання процесу збирання комах-шкідників є актуальною задачею. З цією метою був запропонований новий пристрій для збирання комах-шкідників, призначений для ефективного збирання шкідників пасльонових культур за допомогою механічно-пневматичного методу. Теоретично обґрунтована конструкція верхнього робочого елемента пристрою для збирання комах-шкідників і встановлено, що кут атаки робочої поверхні пристрою лежить в межах від 10 до 60°. Ефективність запропонованої конструкції нового пристрою забезпечується підвищеним впливом механічної дії на рослину пасльонових культур без її ушкодження і виключенням втримання шкідника на всіх рівнях по висоті рослини, максимальним збиранням шкідників за один прохід пристрою.

**комахи-шкідники сільськогосподарських культур, збирання шкідників, пристрій для збирання, дезинсектор, захист рослин**

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день комахи-шкідники сільськогосподарських культур залишаються однією з найважливіших проблем у світовому сільському господарстві. Згідно з повідомленням продовольчої та сільськогосподарської організації (FAO), шкідники щорічно призводять до втрат від 20 до 40 відсотків виробництва сільськогосподарських культур [1]. Економічний збиток від розповсюдження комах-шкідників оцінюється приблизно у 220 мільярдів доларів США на рік, а втрати від інвазивних видів комах складають близько 70 мільярдів доларів США щорічно [1]. У зв'язку з цим сільськогосподарське виробництво використовує широкий арсенал пестицидів для підвищення врожайності, якості і тривалості зберігання культур. Тому постійне зростання населення та швидка урбанізація призводять до збільшення використання таких хімікатів, що в свою чергу веде до забруднення навколишнього середовища та загрози здоров'ю людини. Безперервне застосування пестицидів може призвести до серйозних проблем зі здоров'ям людини: рак, генетичні та респіраторні захворювання, а також може вплинути на розвиток плоду [2]. Отже, у сільському господарстві дуже важливо

впроваджувати передові технічні рішення для раннього виявлення комах-шкідників, запобіганню надмірному використанню пестицидів та використанню екологічно чистих методів боротьби з ними.

Екологічний захист рослин став необхідністю у сучасному світі, а використання машин для фізичного збору комах-шкідників відображає прагнення до створення екологічно чистої продукції рослинництва. Ці технології вже знайомі світовій практиці [3-5], але для досягнення оптимальних результатів потрібно постійно вдосконалювати агрегати та регулювати режими їх роботи. Проблема зниження врожайності пасльонових культур викликана шкідливим впливом колорадських жуків, а низькі показники урожайності цих культур свідчать про необхідність застосування хімічних засобів захисту для збільшення виробництва. Проте використання пестицидів, навіть найбільш безпечних, призводить до забруднення продукції та довкілля залишками хімічних речовин та їх похідних, які можуть бути навіть більш токсичними, ніж самі засоби захисту.

Тому використання дезинсекторів різного типу дії у вирощуванні пасльонових культур стає актуальним напрямком для отримання продукції високої якості, включаючи продукти для дієтичного харчування дітей, та сприятиме зменшенню використання пестицидів і їх негативного впливу на навколишнє середовище.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** На сьогоднішньому етапі розвитку сільського господарства по всьому світі спостерігається зростання заходів, спрямованих на виробництво екологічно чистої та здорової сільськогосподарської продукції, з виключенням використання хімічних засобів. Одним з основних методів контролю за шкідниками для умов екологічно чистого виробництва є безпосередній їх збір [6] за допомогою механізованих засобів [7], таких як механічні і пневматичні пристрої, з подальшим їх знищенням [8].

Дослідження Вінсента С. [9], проведені у лабораторних умовах з личинками і дорослими особами померклого рослинного клопа, показали, що пневматичний метод збору таких шкідників вже на першому проході призводить до значного зменшення їх чисельності, досягаючи ефективності на рівні 65%, а при повторних проходах якість збору може сягати навіть 85%. З'ясувалось, що якість збирання личинок виявилась вищою порівняно з дорослими комахами, але при зсуванні дорослих особин з місця збирання поліпшується на 20%. Отже, автор роботи рекомендує включати елементи струшування в конструкції збиральних пристроїв, щоб збільшити ефективність збору шкідників, перешкоджаючи їхньому польоту з рослини до поверхні ґрунту.

Робота [10], вказує на необхідність комплексного підходу до збору комах-шкідників. Розглядається розроблена пневматична машина на базі колісного трактора, яка була випробувана у боротьбі з колорадським жуком та померклим рослинним клопом на посадках картоплі і полуничних культурах. Отримані результати показали, що цей метод боротьби дозволяє ефективно знищувати шкідників на різних стадіях їхнього розвитку і може бути застосований для інших сільськогосподарських культур.

У роботі [11], Гуцол Т. вказує на те, що використання пневматичних систем для боротьби зі шкідниками має численні переваги. Це не лише ефективний і економічно вигідний метод обробки, але і метод, що сприяє екологічному вирощуванню сільськогосподарських культур, покращує умови праці механізаторів та допомагає зменшити використання пестицидів, це також має позитивний вплив на ґрунтове середовище. Пропонується використання пневматичної установки для збору комах-шкідників пасльонових культур, а також обґрунтовуються основні технологічні параметри її робочої частини. Автор зробив висновок про те, що використання купольних конструкцій робочих елементів таких машин є доречним і перспективним.

В іншому дослідженні [12], автори аргументовано пропонують конструкцію пневмодезинсектора для збирання комах-шкідників пасльонових культур. Вони пропонують використання робочої камери збирача з щілинами по всій внутрішній поверхні, який має підковоподібну форму, завдяки повітряним потокам з обох боків камери забезпечується збір шкідників. Після аналізу роботи пристрою було визначено, що пневматичний спосіб збору комах-шкідників є перспективним і може забезпечити високі результати у боротьбі зі шкідниками пасльонових культур.

Колектив авторів в роботі [13] провів теоретичне обґрунтування зони дії пневматичного пристрою для збирання комах-шкідників пасльонових культур. Проведений ними аналіз існуючих пристроїв для збирання шкідників показав, що жодна з наявних конструкцій не може повністю задовольнити вимоги щодо мінімального травмування рослин і максимальної ефективності збору шкідників. У зв'язку з цим була розроблена і запропонована нова конструкція пристрою, яка дозволяє якісно збирати шкідників пасльонових культур, уникаючи пошкодження рослин.

В подальшому в [14] розглянуто класифікацію методів боротьби зі шкідниками сільськогосподарських культур і проведено аналіз цих методів. Висновок зроблено на користь фізико-механічного пневматичного методу, який вважається найбільш ефективним на сучасному етапі розробки методів захисту сільськогосподарських рослин від комах-шкідників.

Проведений аналіз конструкцій і досліджень машин для збирання комах-шкідників показав, що в останні роки найчастіше використовуються машини з пневматичною системою збирання, але оскільки в багатьох конструкціях присутні додаткові елементи для примусового струшування комах-шкідників можна стверджувати, що в значній мірі можна перенести основну дію пристрою для збирання на механічну дію на шкідника, а збір і знищення покласти на пневматичну систему. Оскільки використання самих пневматичних систем як з одним напрямом потоку так із двома різними напрямками не в повній мірі можуть задовольнити збір комах-шкідників різного віку за рахунок їх різних аеродинамічних характеристик, а також при дії повітряних потоків частина шкідників падає на поверхню ґрунту, після чого повертається на рослини. Тому потрібно робити наступні проходи, що може негативно впливати на цілісність самих рослин пасльонових культур. Перспективним напрямом для розробки збирачів комах-шкідників може бути механічно пневматичний збирач, який механічно збирає шкідників, а пневматично їх транспортує в зону знищення.

**Постановка завдання.** Мета роботи: теоретичне обґрунтування конструктивних особливостей верхнього робочого елемента поверхні пристрою для механічно-пневматичного збору комах-шкідників.

Для досягнення мети, вирішували наступні задачі:

- провести аналіз сучасних конструкцій збирачів комах-шкідників з метою визначення їх переваг і недоліків при виконанні процесу збирання;
- розробити математичну модель процесу роботи одного із робочих елементів запропонованого збирача комах-шкідників та встановити теоретично його параметри які впливають на процес збирання.

**Викладення основного матеріалу.** На основі проведених експериментальних досліджень, спираючись на раніше проведені роботи [3-5,15-17] визначені основні недоліки збиральних пристроїв пневматичного типу для боротьби зі шкідниками. Оскільки більшість конструкцій таких пристроїв мають всмоктувальні щілини то нерівномірний розподіл повітряного потоку в них приводить до неефективного збирання з поверхні рослин шкідників сільськогосподарських культур. Іншим і головним недоліком таких пристроїв є формування декількох потоків які взаємодіючи

утворюють наступний технологічний процес - при здуванні шкідників потоком нагнітання вони рухаючись до поверхні ґрунту не встигають всі потрапляти в потоки всмоктування, а більш молоді особи які можуть триматись більш сильно за поверхню листя зовсім не здуваються і залишаються на місці, а це приводить до потреби повторних проходів агрегату і зниження якості обробки. Тому робота над проведенням удосконалення пристроїв для збирання шкідників є актуальною.

Для усунення виявлених недоліків існуючих пристроїв нами запропонована удосконалена конструкція пристрою для збирання комах-шкідників який виконаний трирівневим з робочими елементами на кожному рівні, на верхньому рівні робочий елемент виконаний у вигляді ступеневої поверхні в повздовжньому напрямі з плавними переходами, на середньому рівні робочий елемент виконаний масивом гнучких конічних стрижнів розміщених з перекриттям в вертикальній площині, на нижньому рівні робочий елемент виконаний у вигляді похилого лотка, передня частина якого виконана клиновою, а середня і задня ступінчастою з плавними переходами, сам лоток має висоту, що дорівнює висоті четвертої частини висоти самого пристрою.

На рис. 1 наведено схему удосконаленого пристрою для збирання комах-шкідників. Запропонований пристрій для збирання шкідників складається із рамки корпусу 1, верхнього робочого елемента 2, середнього робочого елемента 3, нижнього робочого елемента 4, збиральної щілини лотка 5, забірної камери 6.

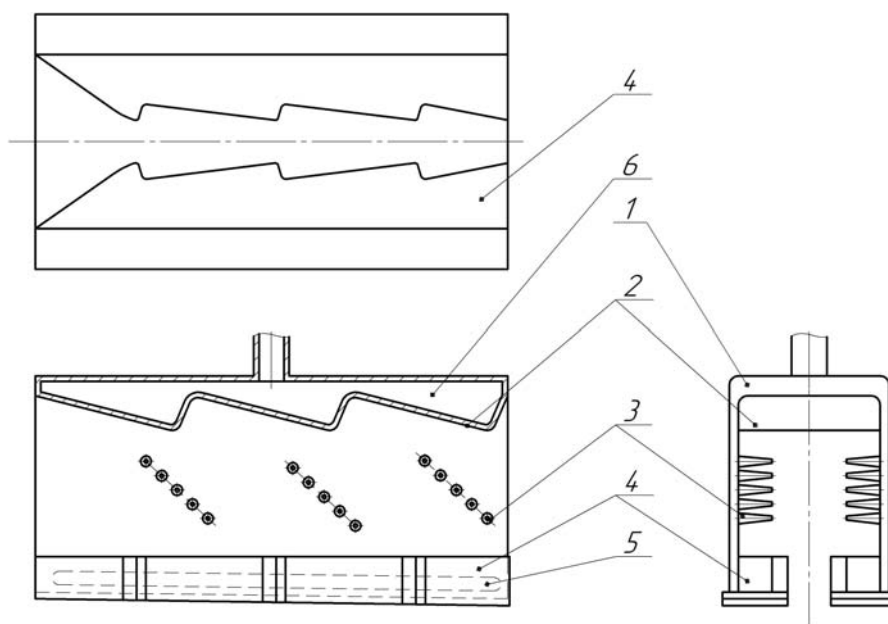


Рисунок 1 – Схематичне зображення механічно-пневматичного пристрою для збирання комах-шкідників  
Джерело: розроблено авторами

Працює запропонований пристрій для збирання шкідників наступним чином. Під час руху пристрою в рядку рослини потрапляючи в передню його частину стискаються в нижній частині клиновою поверхнею робочого елемента 4 в горизонтальній площині, в той же час під дією верхнього робочого елемента 2 рослини нагинаються в вертикальній площині по напрямку руху викликаючи напруження стебла самої рослини. Після потраплення верхньої і нижньої частини стебла в переходи робочих поверхонь елементів 2 і 4 відбувається зняття напружень стебла рослини за рахунок чого відбувається ефект струшування, в результаті чого шкідники падають з поверхні рослини в збиральний лоток робочого елемента 4. Розміщені після кожної ступені робочих елементів 2 і 4, гнучкі конічні доочищувачі середнього робочого

елементу 3 виконують збиття з листової поверхні стебел шкідників які втрималась після кожної ступені робочих елементів 2 і 4. Через щілину 5 в нижній частині лотка робочого елементу 4 пристрою за рахунок повітряного потоку всмоктування через забірну камеру 6 рамки зібрані шкідники транспортуються в місце знищення.

Всі три робочі елементи пристрою відіграють комплексний вплив на процес збирання шкідників, але в даній роботі нами буде розглянутий лише один верхній робочий елемент. Оскільки верхній робочий елемент пристрою для збирання комах шкідників здійснює визначальну роль у формуванні напруження стебла рослини яке дає можливість виконати струшувальну дію по відношенню до шкідника, то необхідно розглянути задачу дії поверхні робочого елемента на стебло рослини пасльонових культур.

Під час руху верхнього робочого елемента пристрою зі швидкістю  $V$  його робоча поверхня здійснює вплив на верхню частину стебла виконуючи його нахил у вертикальній площині. Після проходження по робочій поверхні стебло в точці сходу відновлює своє вертикальне положення здійснюючи вплив на шкідників, що знаходяться на поверхні листового покриву рослини. В момент сходу рослини з робочої поверхні пристрою на стеблину діють наступні сили:  $N$  - нормальна реакція стебла на дію робочого елемента;  $F_{mp}$  - сила тертя взаємодіючих поверхонь;  $F_n$  - сила нахилу стебла від дії поверхні робочого елемента;  $F_o$  - сила опору яка виникає у стеблі при дії поверхні робочого елемента.

Для визначення впливу геометричних параметрів поверхні робочого елемента пристрою нами була розроблена розрахункова схема рис. 2.

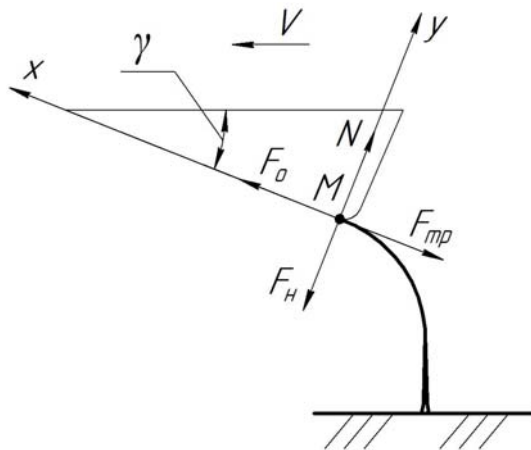


Рисунок 2 – Схема сил, діючих на стебло, від дії робочої поверхні пристрою для збирання шкідників

Джерело: розроблено авторами

Відомо [18], що сила тертя має залежність:

$$F_{mp} = f \cdot N, \quad (1)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя поверхні робочого елемента пристрою із стеблом;

$N$  - нормальна реакція стебла на дію поверхні робочого елемента.

Сила тертя  $F_{mp}$  направлена в інший бік від вектора швидкості руху поверхні робочого елемента пристрою.

Складемо диференціальне рівняння руху стеблини по поверхні робочого елемента пристрою у векторній формі з врахуванням складеної схеми сил (рис. 2):

$$m\vec{a} = \vec{F}_o + \vec{N} + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_n, \quad (2)$$

де  $\vec{a}$  - абсолютне прискорення руху поверхні робочого елемента пристрою по поверхні стебла,  $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$ ;

$m$  - маса стебла яка контактує з поверхнею робочого елемента пристрою.

Тоді:

$$m \cdot (\vec{a}_n + \vec{a}_\tau) = \vec{F}_o + \vec{N} + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_n. \quad (3)$$

Спроєкуємо отримане рівняння на осі системи координат:

$$\begin{cases} m \cdot (a_{\tau x} - a_{nx}) = F_o - F_{mp}; \\ m \cdot (a_{\tau y} - a_{ny}) = N - F_n. \end{cases} \quad (4)$$

Оскільки швидкість руху робочої поверхні елемента пристрою постійна  $V = const$ , то і  $V_x = const$ ,  $V_y = const$ , тоді:

$$\begin{aligned} a_{\tau x} &= \frac{dV_x}{dt} = 0; \\ a_{\tau y} &= \frac{dV_y}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином:

$$\begin{cases} -m \cdot a_{nx} = F_o - F_{mp}; \\ -m \cdot a_{ny} = N - F_n. \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_o = F_{mp} - m \cdot a_{nx}; \\ N = F_n - m \cdot a_{ny}. \end{cases}$$

Звідки:

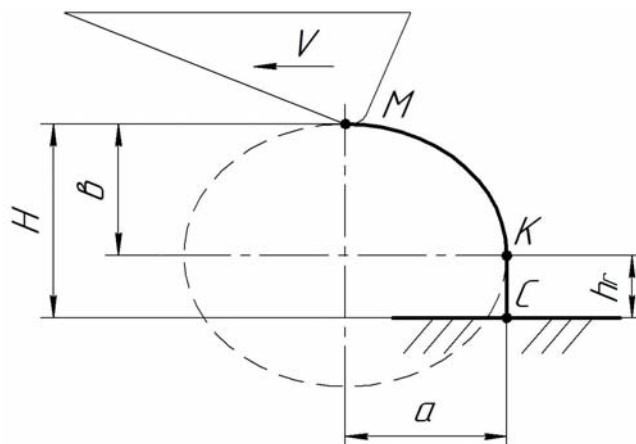
$$F_o = f \cdot (F_n - m \cdot a_{ny}) - m \cdot a_{nx} = f \cdot \left( F_n - m \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \cos \alpha \right) - m \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

де  $R$  – радіус згину стебла рослини від дії поверхні робочого елемента пристрою для збирання комах-шкідників;

$\alpha$  – кут між радіусом кривизни і віссю у вибраної системи координат.

Для визначення проекції  $a_{\tau x}$ ,  $a_{\tau y}$  необхідно дослідити форму згину стебла та визначити радіус та центр кривизни стебла в точці сходу з поверхні робочого елемента пристрою.

Після проведення установчого експерименту було встановлено, що форма стебла під дією поверхні робочого елемента пристрою для збирання може розглядатись у вигляді частини дуги поверхні еліпса, що дає можливість скласти розрахункову схему рис. 3.



МК – частина дуги еліпса, по якій відбувається згин стебла; КС – прикоренева частина стебла (частина, яка залишається рівною навіть під дією поверхні робочого елемента пристрою за рахунок більшої товщини стебла); Н – висота знаходження поверхні робочого елемента пристрою;  $a$  – відстань, на яку відгинається стебло (велика піввісь еліпса);  $b$  – мала піввісь еліпса

Рисунок 3 – Схема згину стебла від дії робочої поверхні пристрою для збирання

Джерело: розроблено авторами

Залежність для визначення радіуса  $R$  кривизни матиме загальний вигляд:

$$R = \frac{(1 + (y')^2)^{\frac{3}{2}}}{|y''|}. \quad (7)$$

Координати центра кривизни визначаємо за виразами:

$$x_0 = x - \frac{y' \cdot (1 + (y')^2)}{y''}; \quad (8)$$

$$y_0 = y + \frac{y' \cdot 1 + (y')^2}{y''}. \quad (9)$$

Для опису геометричних параметрів згину стебла пов'язуємо його з самою довжиною, тоді теоретична довжина згину буде:

$$l_T = \int_0^T \sqrt{(x'(\theta))^2 + (y'(\theta))^2} d\theta, \quad (10)$$

де  $x(\theta)$  та  $y(\theta)$  - рівняння згину стебла які задані параметрично;

$\theta$  - параметр через який задаються параметричні рівняння згину стебла.

Оскільки для точного аналітичного розрахунку дуги еліпса не має то для інженерного розрахунку можемо використати наближений або числовий розрахунок.

Запишемо рівняння дуги еліпса між сусідніми вершинами через піввісі  $a, b$  (рис. 3):

$$L = \left( a^{\frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}} + b^{\frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}}} \right)^{\frac{\ln \pi}{2}}; \quad (11)$$

$$a = \left( l_T^2 - b^2 \right)^{\frac{\ln \frac{\pi}{2}}{\ln 2}} \quad (12)$$

Радіус кривизни, що направлений до центра еліпса дорівнює:

$$R = \frac{a^2}{b} \quad (13)$$

Тоді сила опору визначиться як:

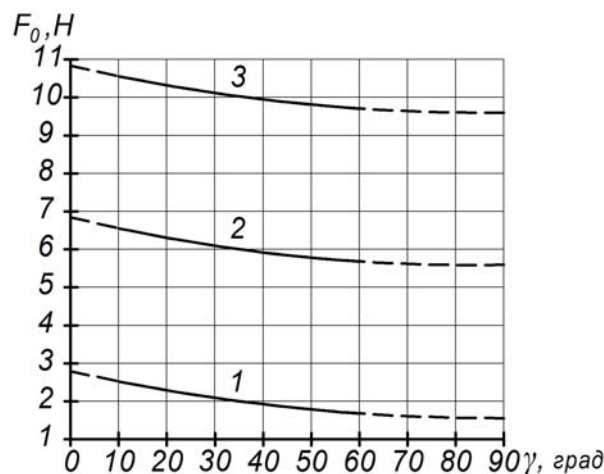
$$\begin{aligned} F_o &= f \cdot \left( F_n - m \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \cos \gamma \right) - m \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \sin \gamma = \\ &= f \cdot F_n - \frac{mV^2}{a^2} \cdot (f \cdot \cos \gamma + \sin \gamma) = \\ &= f \cdot F_n - \frac{mV^2 \cdot (f \cdot \cos \gamma + \sin \gamma) \cdot (H - h_r)}{\left( (l - h_r)^{\frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}}} - (H - h_r)^{\frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}}} \right)^{\frac{2 \ln \frac{\pi}{2}}{\ln 2}}}, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $l$  - реальна довжина стебла;

$\gamma$  - кут атаки робочої поверхні пристрою;

$h$  - висота по якій відбувається згин стебла від дії поверхні робочого елемента пристрою для збирання шкідників.

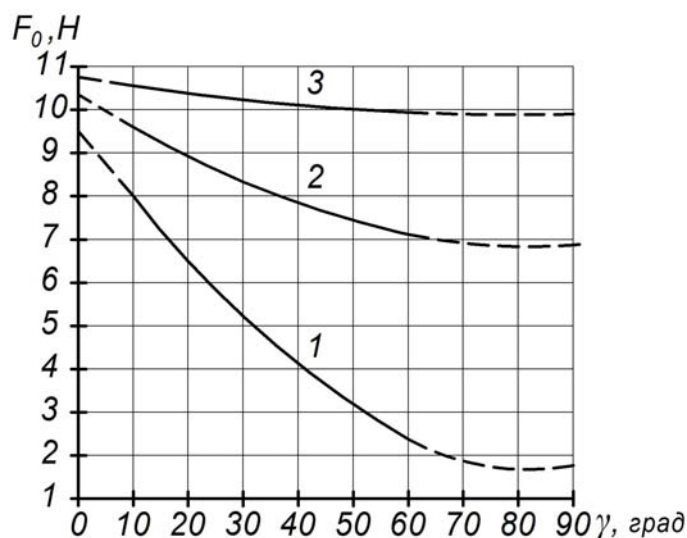
Підставляючи значення величин складових у рівняння (14), можемо отримати графічну залежність величини сили  $F_o$  від кута  $\gamma$ :



1 -  $F_n = 20H$ ; 2 -  $F_n = 40H$ ; 3 -  $F_n = 60H$

Рисунок 4 – Графічна залежність зміни сили опору від кута нахилу поверхні робочого елемента пристрою

Джерело: розроблено авторами



1 -  $V = 0,5 м/с$  ; 2 -  $V = 1 м/с$  ; 3 -  $V = 1,5 м/с$

Рисунок 5 – Графічна залежність зміни сили опору від кута нахилу поверхні робочого елемента пристрою

Джерело: розроблено авторами

В результаті проведених досліджень теоретично встановлено, що на всіх швидкостях руху пристрою для збирання комах-шкідників раціональний кут атаки робочої поверхні пристрою  $\gamma$  знаходиться в межах від 10 до 60°. Також в подальшому необхідно розглянути дію інших робочих елементів на рослини пасльонових культур, а для визначення раціональних значень конструктивних параметрів удосконаленого пристрою для збирання комах-шкідників потрібні додаткові експериментальні дослідження за допомогою імітаційного моделювання та методів планування експерименту.

### Висновки.

1. Аналіз літературних джерел дав можливість встановити, що комахи-шкідники значною мірою призводять до серйозних втрат у світовому виробництві сільськогосподарської продукції. Пестицидний обробіток є основним методом боротьби з ними, проте така практика призводить до забруднення навколишнього середовища, загрози здоров'ю людини та підвищення ризику захворювань. У зв'язку з цим велика увага приділяється розробці екологічно безпечних методів боротьби. Одним з найбільш ефективних методів є фізичне збирання комах-шкідників пристроями різної дії.

2. Запропонована математична модель верхнього робочого елемента пристрою для збирання комах-шкідників, який призначений для ефективного збирання шкідників пасльонових культур за допомогою механічно-пневматичного методу.

3. Теоретично обґрунтовано, що кут атаки робочої поверхні пристрою лежить в межах від 10 до 60°.

4. З теоретичної точки зору показано, що робота пристрою забезпечується підвищеним впливом механічної дії на рослину пасльонових культур без її ушкодження і виключенням втримання шкідника на всіх рівнях по висоті рослини, максимальним збиранням шкідників за один прохід пристрою.

## Список літератури

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) New standards to curb the global spread of plant pests and diseases. 2020. URL: <http://www.fao.org/news/story/en/item/1187738/icode/> (дата звернення 02.04.2024)
2. Narendaran S.T., Meyyanathan S.N., Babu B.. Review of pesticide residue analysis in fruits and vegetables. Pre-treatment, extraction and detection techniques. *Food Research International*. 2020. P. 133.
3. Gucol T., Bendera I., Nowak J. Zbieracz stonki. *Rolniczy Przegląd Techniczny*. 2005. №5 (75). P. 14.
4. Хелемендик М.М., Шеремета Р.С. Агрегат для збирання і знищення шкідників сільськогосподарських рослин. *Сільськогосподарські машини*. 2000. Вип. 6. С. 185-190.
5. Онопа В.А., Петренко М.М. Збирання шкідників сільськогосподарських культур за допомогою пневмодезинсектора. *Збірник наукових праць НАУ. Механізація сільськогосподарського виробництва*. 1999. т. 8. С. 166-168.
6. Vincent C., Chagnon R. Vacuuming tarnished plant bug on strawberry: a bench study of operational parameters versus insect behavior. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2003. 97(3). P. 347–354.
7. Effects of airflow velocity and travel speed on the removal of Colorado potato beetles from potato plants / Lacasse B. et. al. *Canadian Agricultural Engineering*. 1998. Vol. 40, Issue 4. P. 265–272.
8. Khelifi, M., Laguë C., Lacasse B. Pneumatic control of insects in plant protection. *Physical control methods in plant protection*. 2001. P. 261–269.
9. Mohammadali Haddad Derafshi. Design and Construction of a Pneumatic-thermal Machine for Controlling Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). *Journal of Applied Sciences*. 2006. Vol. 6, No 4. P. 919–925.
10. Charles Vincent & Gilles Boiteau. Pneumatic Control of Agricultural Insect Pests. *Physical Control Methods in Plant Protection*. 2001. P 270–281.
11. Taras Gucol, Ivan Bendera, Janusz Nowak. Grounding the parameters of the pneumatic device for pests collecting. *ТЕКА Ком. Mot. Energ. Roln*. 2007. 7А. 35–40.
12. Онопа В.А., Артеменко Д.Ю., Ліва Є.Г. Розробка та обґрунтування конструкції пневмодезинсектора для збирання шкідників пасльонових культур. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції*, 5-6 лист. 2015 р. Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 22-23.
13. В.А. Онопа, Д.Ю. Артеменко, Р.В. Бакал. Теоретичне обґрунтування зони дії пристрою для збирання шкідників пасльонових культур. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2018. №10(51). С. 19-23.
14. В. Онопа. Перспективні методи боротьби з шкідниками картоплі (пасльонових культур). *Наука–виробництво*. 2021. С. 4-6.
15. Бендера І. М., Гуцол Т. Д. Збирання колорадських жуків пневмомеханічними засобами. *Зб. наук. пр. ПДАТА*. 2002. Вип.10. С. 238-240.
16. Гуцол Т.Д., Бендера І.М., Бичинський С.О. Обґрунтування форми забірної камери пневмомеханічного пристрою. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2005. №28. С. 70-75.
17. Онопа В.А., Артеменко Д.Ю.. Результати експериментальних досліджень пневматичного збирання шкідників сільськогосподарських культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2022. Вип. 52. С. 32-40.
18. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. К.: Техніка, 2006. 532 с.

## References

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020). New standards to curb the global spread of plant pests and diseases. Retrieved from: <http://www.fao.org/news/story/en/item/1187738/icode/>
2. Narendaran, S.T., Meyyanathan, S.N. & Babu, B. (2020). Review of pesticide residue analysis in fruits and vegetables. Pre-treatment, extraction and detection techniques. *Food Research International*. P. 133.
3. Gucol, T., Bendera, I., Nowak J. (2005). Zbieracz stonki. *Rolniczy Przegląd Techniczny*. №5 (75). P. 14 [in Polish].
4. Khelemendyk, M.M. & Sheremeta, R.S. (2000). Ahrehat dlia zbyrannia i znyschennia shkidnykiv sil'skohospodars'kykh roslyn [Unit for collecting and destroying pests of agricultural plants] *Sil'skohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery*, 6, 185-190 [in Ukrainian].
5. Onopa, V.A. & Petrenko, M.M. (1999) Zbyrannia shkidnykiv sil'skohospodars'kykh kul'tur za dopomohoiu pnevmodezynsektora [Collection of pests of agricultural crops with the help of a pneumodisinfector]. *Zbirnyk naukovykh prats' NAU. Mekhanizatsiia sil'skohospodars'koho*

- vyrobnytstva – Collection. scientific works of NAU. Mechanization of agricultural production*, 8, 166–168 [in Ukrainian].
6. Vincent, C. & Chagnon, R. (2000). Vacuuming tarnished plant bug on strawberry: a bench study of operational parameters versus insect behavior. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2003. 97(3). 347–354.
  7. Effects of airflow velocity and travel speed on the removal of Colorado potato beetles from potato plants / Lacasse B. et. al. *Canadian Agricultural Engineering*. 1998. Vol. 40, Issue 4. P. 265–272.
  8. Khelifi, M., Laguë, C. & Lacasse B. (2001). Pneumatic control of insects in plant protection. *Physical control methods in plant protection*. P. 261–269.
  9. Mohammadali Haddad Derafshi (2006). Design and Construction of a Pneumatic-thermal Machine for Controlling Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). *Journal of Applied Sciences*. Vol. 6, No 4. P. 919–925.
  10. Charles, Vincent & Gilles, Boiteau. (2001). Pneumatic Control of Agricultural Insect Pests. *Physical Control Methods in Plant Protection*. P. 270–281.
  11. Taras Gucol, Ivan Bendera & Janusz Nowak. Grounding the parameters of the pneumatic device for pests collecting. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln*. 2007. 7A. 35–40.
  12. Onopa, V.A., Artemenko, D.Yu. & Liva Ye.H. (2015). Rozrobka ta obgruntuvannya konstruksii pnevmodezynsektora dlia zbyrannya shkidnykiv pasl'onovykh kul'tur [Development and substantiation of the construction of a pneumodisinfector for collecting pests of nightshade crops]. Problems of design, production and operation of agricultural machinery: *X Mizhnarodna naukovo-praktychnakonferentsiia (5-6 lyst. 2015 r.) – X International scientific and practical conference (pp. 22-23)*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
  13. Onopa, V.A., Artemenko, D.Yu. & Bakal, R.V. (2018). Teoretychne obgruntuvannya zony dii prystroiu dlia zbyrannya shkidnykiv pasl'onovykh kul'tur. [Theoretical substantiation of the area operation of the device for collecting pests of nightshade crops]. *Scientific Journal «ScienceRise»*, 10(51), 19-23 [in Ukrainian].
  14. Onopa, V. (2021). Perspektyvni metody borot'by z shkidnykamy kartopli (pasl'onovykh kul'tur). [Promising methods of pest control potatoes (solanaceous crops)]. *Nauka-vyrobnytstvu – Science-production*, 4-6. [in Ukrainian].
  15. Bendera, I. M. & Hutsol, T. D. (2002). Zbyrannya kolorads'kykh zhukiv pnevmomekhanichnymy zasobamy [Collection of Colorado beetles by pneumatic means]. *Zb. nauk. pr. PDATA – Coll. of science Ave. PDATA*, 10, 238-240 [in Ukrainian].
  16. Hutsol, T.D., Bendera, I.M. & Bychyns'kyj, S.O. (2005). Obgruntuvannya formy zabirnoi kamery pnevmomekhanichnoho prystroiu [Justification of the shape of the intake chamber of the pneumomechanical]. *Ahrarnyj visnyk Prychornomor'ia – Agrarian Bulletin of the Black Sea Region*, 28, 70-75 [in Ukrainian].
  17. Onopa, V.A., & Artemenko, D.Yu. (2022). Rezul'taty eksperymental'nykh doslidzen' pnevmatychnoho zbyrannya shkidnykiv sil'skohospodars'kykh kul'tur [Results of experimental studies of pneumatic harvesting of pests of agricultural crops]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn – Design, production and operation of agricultural machines*, 52, 32-40 [in Ukrainian].
  18. Kucheruk, I.M., Horbachuk, I.T. & Lutsyk, P.P. (2006). Zahal'nyj kurs fizyky [General course of physics]. *Mekhanika. Molekuliarna fizyka i termodynamika* [Mechanics. Molecular physics and thermodynamics]. (Vol. 1). K.: Tekhnika [in Ukrainian].

**Volodymyr Onopa**, engineer, **Dmytro Artemenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Kyslun**, Assoc. Prof., PhD tech. Sci, **Volodymyr Onopa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Mathematical model of the upper working element of the mechanical-pneumatic collector of insect pests of nightshade crops**

The paper presents the results of exploratory theoretical studies of the design features of the upper working element of the device for the mechanical-pneumatic collection of insect pests of nightshade crops. During the analysis of scientific sources, it was established that insect pests to a large extent lead to serious losses in the world production of agricultural products. Pesticide treatment is the main method of combating them, but this practice leads to environmental pollution, threats to human health and increased risk of diseases. In this regard, great attention is paid to the development of ecologically safe methods of control. It was found that one of the most effective methods is the physical collection of insect pests with devices of various effects. Therefore, the further development of new designs of devices for carrying out the process of collecting insect pests is an urgent task.

On the basis of the conducted experimental studies and relying on the previously conducted works, the main shortcomings of the pneumatic-type collection devices for pest control were determined. Since most designs of such devices have suction slits, the uneven distribution of air flow in them leads to inefficient collection of pests of agricultural crops from the surface of plants. Another and the main disadvantage of such devices is the formation of several streams that interact to form the following technological process - when pests are blown away by the injection stream, they move to the surface of the soil and do not have time to fall into the suction streams, and younger individuals that can hold on to the surface of the leaves are not blown away at all and remain in place, and this leads to the need for repeated passes of the unit and a decrease in the quality of processing.

For this purpose, a new device for collecting insect pests was proposed, designed for effective collection of pests of nightshade crops using a mechanical-pneumatic method. The design of the upper working element of the device for collecting pest insects was theoretically substantiated and it was established that the angle of attack of the working surface of the device lies in the range from 10 to 60°. The effectiveness of the proposed design of the new device is ensured by the increased effect of mechanical action on the plant of nightshade crops without its damage and the exclusion of pest retention at all levels along the height of the plant, the maximum collection of pests in one pass of the device.

**insect pests of agricultural crops, pest collection, collection device, exterminator, plant protection**

*Одержано (Received) 29.01.2024*

*Прорецензовано (Received) 29.02.2024*

*Прийнято до друку (Received) 25.03.2024*

**UDC 631.363.2**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.94-104](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.94-104)

**Elchyn Aliiev**, Prof. of the Department of Technical Systems Engineering, DSc., Senior Researcher, **Oleksandr Kobets**, Assos. Prof. of the Department of Tractors and Agricultural Machinery, PhD tech. sci., **Mykola Linko**, Holder of the third (educational and scientific) level of higher education

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

*e-mail: aliev@meta.ua*

## Physico-mathematical model of the process of compression of compound feed components into expanders

The purpose of the experimental study is to verify the accuracy of conclusions drawn from theoretical research by substantiating experimentally the main parameters and operating modes of the feed compaction process. To compare the results of numerical modeling and laboratory experiments, a program was developed in the Wolfram programming language, which allows linking the technological parameters of the expansion process ( $W$ ,  $T$ ) with the physical and mechanical properties of the compound feeds mixture ( $E_p$ ,  $\mu_p$ ,  $W_p$ ). For rational technological parameters ( $D_\mu = 0.5$  mm,  $W = 20.7$  %,  $T = 137.0$  °C), we have the following physical and mechanical properties:  $E_p = 22.3$  MPa,  $\mu_p = 0.31$ ,  $W_p = 0.49$  N/m. In this case,  $S_{\Delta P} = 0.772$  MPa,  $\Psi = 1.519$ ,  $h_a = 13.2$  mm. Comparisons of dependencies  $S_{\Delta P}^E(D_\mu)$  and  $S_{\Delta P}^T(D_\mu)$ ,  $\Psi^E(D_\mu)$  and  $\Psi^T(D_\mu)$ ,  $h_a^E(D_\mu)$  and  $h_a^T(D_\mu)$  will be conducted under the condition of rational technological parameters, and a sufficiently high Pearson correlation coefficient (0.94–0.99) has been established.

**feed, pressing, compression, numerical modeling, laboratory research, mixing, pressure, parameters, physical and mechanical properties, efficiency**

**Problem setting.** One of the problems encountered during the transportation of bulk feeds is the loss of uniformity due to component segregation. This issue has been addressed in Europe since the early 1980s through pelletizing or extrusion, where the homogeneity of the

mixture is fixed in compressed agglomerations – pellets (extrudates). However, another concern arose for manufacturers – the strength of pellets and their resistance to impact during transportation. Hence, another quality indicator emerged – the pellet durability index (PDI) [1–2].

In an effort to improve PDI, the expansion technology was developed in Europe in the late 1980s. Feed manufacturers in Denmark, Germany, and the United Kingdom were among the first to adopt this technology.

In the early 1990s, new government regulatory requirements mandated that Scandinavian feed manufacturers in Denmark meet specific heat treatment requirements to eliminate Salmonella in animal feed [3]. While extrusion could be used for this purpose, the high capital and operational costs, along with relatively low process productivity, made extruder utilization economically impractical. Conversely, expansion garnered significant attention in Northern Europe as it could be used for economically viable production of feeds meeting rigorous physical and microbiological standards set by consumers and government regulators.

Considering that extrusion and expansion technologies are closely related, let's examine them in more detail and outline the requirements for the characteristics of the resulting product.

**Analysis of the latest studies and publications.** Extrusion and expansion are increasingly popular in the global agro-food industry, particularly in the food and feed sectors. These technologies are utilized for the production of so-called engineered food products and specialized feeds [4]. Summarizing the research [5–6], we have found that extrusion and expansion of plant raw materials involve the formation of pulverized material under barothermic conditions. Using the shear energy provided by a rotating screw and additional heating, the food material is heated to the melting or plasticization temperature [7]. In this altered rheological state, the food material is transported under high pressure through a die or series of dies, and the product expands to its final form. This results in distinct physical and chemical properties of the extrudates different from the properties of the raw materials used [8].

In general, extrusion is a short-term heat treatment of the product at temperatures up to 170 °C and pressures up to 50 atm., resulting in structurally complex mechanical and physical changes. The extrusion process involves forcing plasticized material through openings of constant cross-section (filaments). Let's consider the operation principle of a feed extruder [9].

Pre-moistened or steam-treated raw material (grain, compound feed) is dosed into the working chamber of the extruder, where it is compacted under the action of the screw. As the working chamber is traversed, the raw material heats up and becomes plasticized due to pressure and friction (melting phase). The maximum pressure in the working chamber is reached before the raw material enters the die, at the exit of which it sharply decreases, causing the processed material to foam, increasing in volume by 3–4 times. The extrudate exits the die in a continuous flow, so a rotating knife with adjustable rotation frequency is installed at the exit point for its size reduction, the change of which alters the length of individual product particles. The residence time of the raw material in the extruder's working chamber is up to 20 seconds.

The expansion process is essentially identical to the extrusion process, with differences in less stringent processing conditions for raw materials – temperatures up to 130 °C, pressures up to 30 atm. The expander differs from the extruder in the design of the press matrix – in the expander, the pressing process of the processed raw material occurs through a dense ring-type matrix.

**Setting objectives.** The purpose of the experimental study is to verify the accuracy of conclusions drawn from theoretical research by substantiating experimentally the main parameters and operating modes of the feed compaction process.

**Presentation of the main material.** At the first stage of the research, we will conduct numerical modeling of the process of compressing feed mixture components in a vessel under the action of a piston using the CAE system STAR-CCM+ (fig. 1). The vessel shape is chosen to be ring-like, as the material forms into a ring shape during its movement in the screw expander region. The geometric dimensions of the region are provided in fig. 1.

For modeling, the following continuum models are adopted: the meshless discrete element model (DEM), Lagrangian multiphase, DEM boundary forces, non-stationary implicit solver, solution interpolation model, and gravitational force. The components of the feed mixture are represented as solid spherical DEM particles with constant density. Particle interactions among themselves and with the wall are governed by Hertz-Mindlin models with rolling resistance and linear coupling [10].

According to previous laboratory studies and literature sources [11–13], the physico-mechanical properties of the feed mixture components are assumed as follows: static friction coefficient – 0.62, density – 710 kg/m<sup>3</sup>, tangential restitution coefficient – 0.6, normal restitution coefficient – 0.6. Time step – 0.01 s. Number of iterations per time step – 5. Exposure time – 4 s. Piston displacement speed – 0.01 m/s.

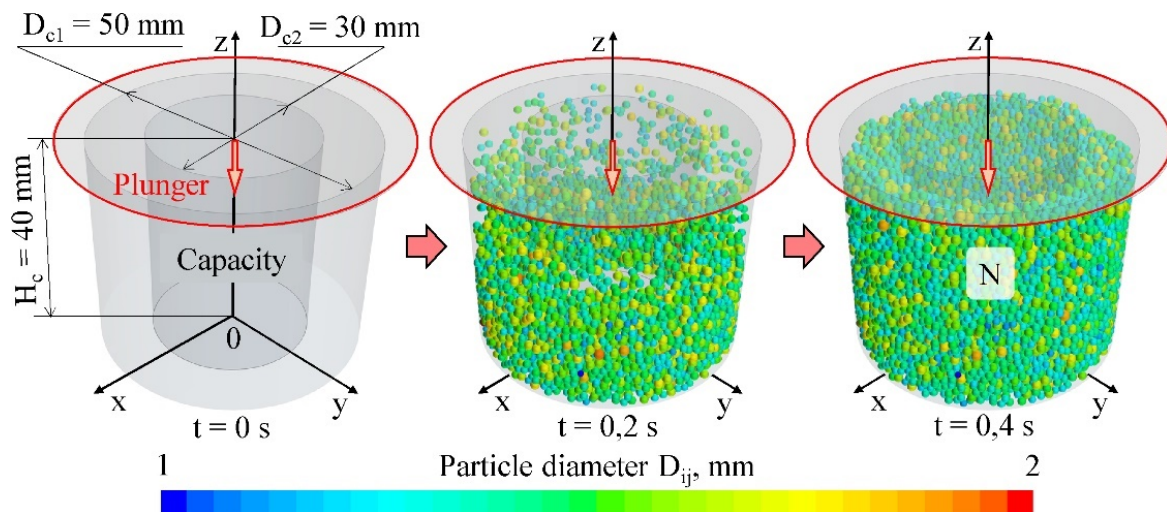


Figure 1 – The computational scheme for numerical modeling of the process of compressing feed mixture components in a cylindrical vessel under the action of a piston

Source: developed by the authors

The investigation of the process of compressing feed mixture components was conducted for various physical and mechanical properties, namely the average particle diameter of the mixture  $D_{\mu}$ , Young's modulus  $E_p$ , Poisson's ratio  $\mu_p$ , and adhesive work per unit area  $W_p$ . The levels and ranges of variation are presented in table 1. The particles in the mixture are distributed by size (effective diameter) according to a normal distribution. Modeling was performed using a full factorial design with a total of  $3^4 = 81$  simulations.

Table 1 – Levels and ranges of variation of factors in the numerical modeling of the process of compressing feed mixture components in a vessel under the action of a piston

Factor	Effective Particle Diameter		Young's Modulus		Poisson's Ratio		Adhesive Work per Unit Area	
	$x_1$	$D_{\mu}$ , mm	$x_1$	$E_p$ , MPa	$x_2$	$\mu_p$	$x_3$	$W_p$ , N/m
Low	-1	0.5	-1	10	-1	0.2	-1	0
Medium	0	1.5	0	20	0	0.3	0	0.25
High	+1	2.5	+1	30	+1	0.4	+1	0.50
Interval	1	1.0	1	10	1	0.1	1	0.25

Source: developed by the authors

Figure 2 represents the graph of elastic hysteresis of feed components depending on their physical and mechanical properties.

The area  $S_{\Delta P}$  enclosed within the loop of the elastic hysteresis represents the specific energy (work) converted into thermal energy at each stage of deformation. The deviation of deformations from stress and the elastic hysteresis loop it generates are associated with the so-called internal friction of the material. There are also several characteristics of mechanical losses in dynamic loading regimes. The coefficient of mechanical losses  $\Psi$  is defined as the ratio of the hysteresis loop area  $S_{\Delta P}$  to the area enclosed between the stress curve and the abscissa axis, where strains  $S_{p1}$  are plotted [14]. Therefore, as a criterion for assessing the elastic properties of feed components, it was decided to determine the weighted areas of the elastic hysteresis loop  $S_{\Delta P}$  and the coefficient of mechanical losses  $\Psi$  based on the average particle diameter of the mixture  $D_{\mu}$ , Young's modulus  $E_p$ , Poisson's ratio  $\mu_p$ , and the work of adhesion per unit area  $W_p$ .

The second stage involves laboratory pressing of feed components with subsequent formation of expandates from them under various technological parameters (particle size of components, their moisture content, and temperature).

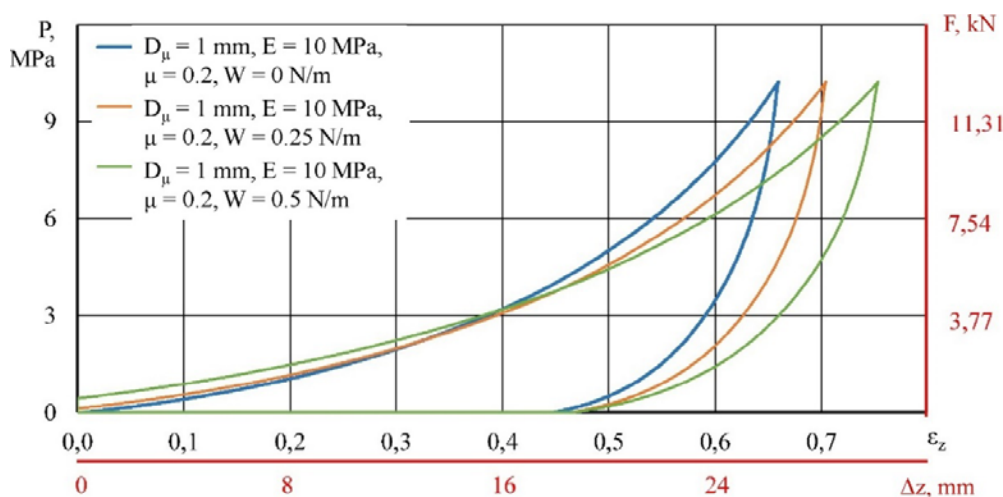


Figure 2 – The dependence of the piston compression force  $F_{\Sigma}$  (pressure  $P_{\Sigma}$ ) on the absolute (relative) deformation of feed components  $\Delta z$  ( $\epsilon_z$ ) at different physical and mechanical properties

Source: developed by the authors

At the beginning of the research, samples of feed with different particle size distributions were prepared. The feed components, in a ratio of 25:25:25:25 %, consisted of wheat, barley, corn, and sunflower meal, ground using a hammer mill with sieve hole diameters of 3.5 mm. Then, using a sieve classifier and a laboratory sieve shaker, the

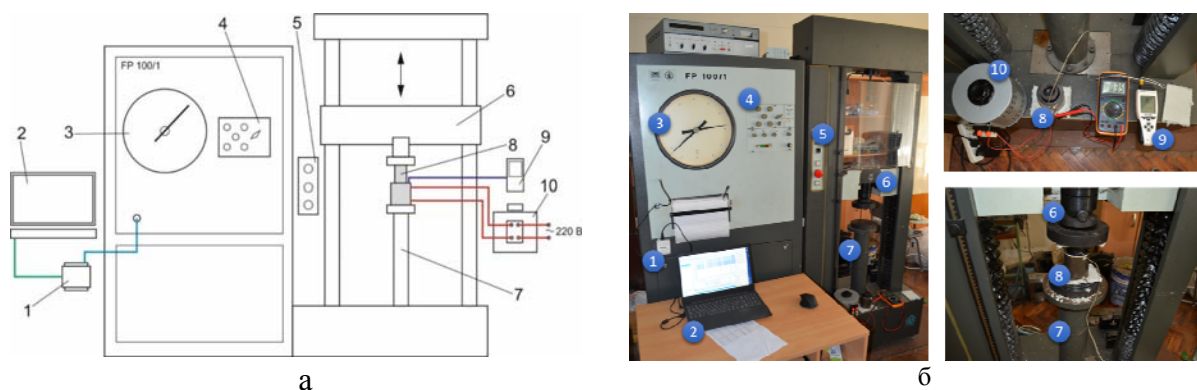
materials obtained after grinding were separated into fractions with particle size ranges of 0–0.99 mm, 1–1.99 mm, and 2–2.99 mm. The preparation of feed was carried out using a laboratory spiral screw mixer for bulk materials, which allows obtaining mixtures with a homogeneity of 94–98 %.

The initial moisture content of the obtained samples was determined by the thermogravimetric method according to DSTU ISO 712:2015 «Cereals and cereal products. Determination of moisture content. Reference method (ISO 712:2009, IDT)» [15] using a SESH-3M drying cabinet. The initial moisture content ( $10 \pm 2$  %) of the feed samples was adjusted by adding the corresponding amount of water.

Studies on the effect of the particle size distribution of the feed, its moisture content, and temperature regime on the deformation diagram – the relationship between stress and material deformation – were conducted using the Heckert FP-100/1 testing machine and additional devices and equipment (fig. 3). The principle of operation of the FP-100/1 involves measuring the force when a sample installed on the stationary traverse deforms due to the movement of the movable traverse at a constant preset speed.

The dependence of deformation on loading was recorded using the analog-to-digital converter NI USB-6008, the analog input of which was connected to the measurement unit of the FP-100/1. The results were recorded on a PC using the NI SignalExpress 2015 software.

The research was conducted using a press mold equipped with heating, which consists of a winding of nichrome wire with a diameter of 1.0 mm on the outer surface of the matrix, insulated on both sides with layers of asbestos. Heating of the press mold to the required temperature and its maintenance were carried out by supplying adjustable alternating current to the nichrome winding using a laboratory autotransformer LATR-1M. The dimensions of the forming surfaces of the press mold are as follows: internal diameter of the matrix – 50 mm, diameter of the mark – 30 mm.



1 – analog-to-digital converter NI USB-6008; 2 – PC; 3 – force gauge; 4 – settings panel FP-100/1; 5 – control panel FP-100/1; 6 – movable traverse; 7 – stationary traverse; 8 – press mold with the test sample; 9 – digital thermometer with thermocouple FLUS ET-960; 10 – laboratory autotransformer LATR-1M

Figure 3 – Scheme (a) and general view (b) of the testing machine Heckert FP-100/1 with additional equipment  
Source: developed by the authors

The factors under investigation were chosen as the moisture content of the feed  $W$ , its temperature  $T$ , and the average diameter of the particles of the ground feed components  $D_{\mu}$  (Table 2).

Table 2 – Levels of factor variation

Factor	Lower level (- 1)	Zero level (0)	Upper level (+ 1)	Variation interval, $\Delta$
Feed moisture $W$ , %	10	20	30	10
Temperature $T$ , °C	80	110	140	30
Average diameter of ground feed component particles $D_\mu$ , mm	0.5	1.5	2.5	1.0

Source: developed by the authors

The research was carried out using a full factorial experiment with a total of  $3^3 = 27$  experiments. The repeatability was threefold.

The visualization of the regularities of the change in compression pressure from the deformation of feed components  $\Delta P(\varepsilon_z)$  for individual experiments is shown in fig. 4.

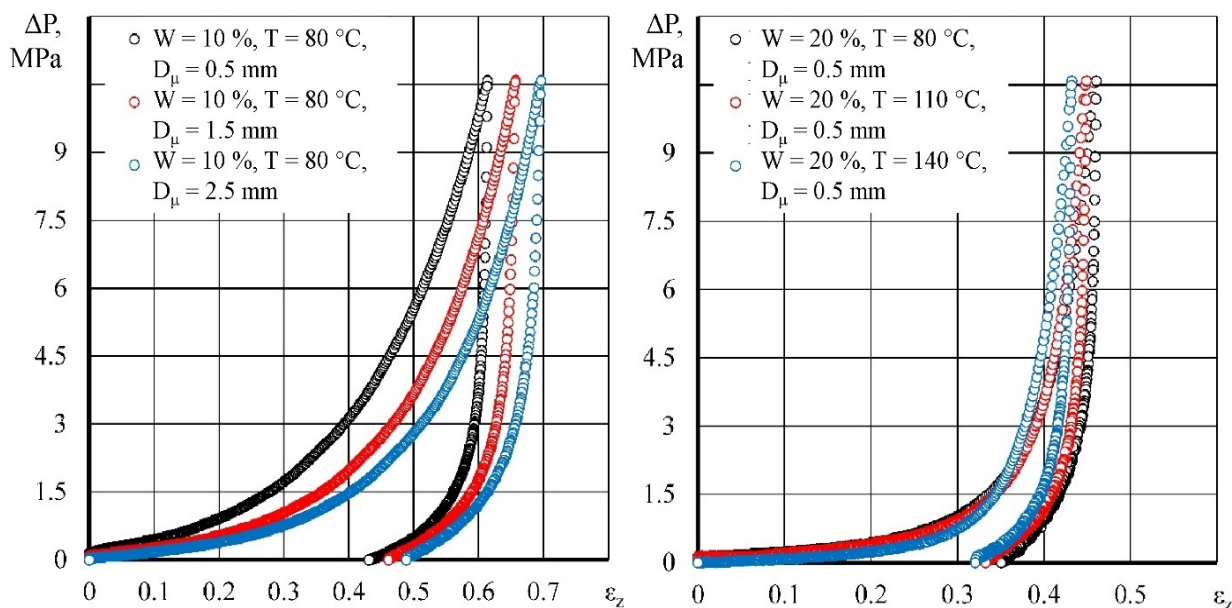


Figure 4 – Patterns of compression pressure change from deformation of feed components  $\Delta P(\varepsilon_z)$  for individual experiments

Source: developed by the authors

Data processing in Wolfram Cloud resulted in regression equations for the hysteresis loop area  $S_{\Delta P}$  from factors in general form:

– Numerical modeling:

$$S_{\Delta P} = -1,91791 - 0,0801014 D_\mu + 0,0349022 E_p + 11,7563 \mu_p - 0,128667 E_p \mu_p + 2,02385 W_p - 0,0249772 E_p W_p - 11,6377 \mu_p W_p + 0,979359 W_p^2; \quad (1)$$

– Laboratory research:

$$S_{\Delta P} = 3,38929 - 0,214174 D_\mu + 0,0425747 D_\mu^2 - 0,00879098 T - 0,111558 W + 0,000201695 T W + 0,00098219 W^2. \quad (2)$$

Data processing in Wolfram Cloud also resulted in regression equations for the coefficient of mechanical losses  $\Psi$  from factors in general form:

– Numerical modeling:

$$\begin{aligned} \Psi = & 1,24615 + 0,123597 D_{\mu} - 0,0117261 E_p + 0,000293183 E_p^2 - \\ & - 1,06965 \mu_p + 1,11661 W_p + 0,108226 D_{\mu} W_p - \\ & - 0,0142308 E_p W_p + 1,56259 \mu_p W_p; \end{aligned} \quad (3)$$

– Laboratory research:

$$\begin{aligned} \Psi = & 0,523551 + 0,0752476 D_{\mu} + 0,00132849 T + 0,0583049 W + \\ & + 0,000477652 D_{\mu} W + 0,0000519639 T W - 0,00136235 W^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Additionally, regression equations for the height of the expander from factors in general form were obtained:

– Numerical modeling:

$$\begin{aligned} h_a = & 26,6886 + 0,344829 D_{\mu} - 0,955516 E_p + 0,0151721 E_p^2 - \\ & - 5,23844 \mu_p + 0,142814 E_p \mu_p + 0,927778 W_p + 1,09198 W_p^2; \end{aligned} \quad (5)$$

– Laboratory research:

$$\begin{aligned} h_a = & 27,9931 + 2,04722 D_{\mu} - 0,166667 D_{\mu}^2 - 0,0800463 T - \\ & - 0,00527778 D_{\mu} T + 0,000314815 T^2 - 0,919444 W + 0,0201667 W^2. \end{aligned} \quad (6)$$

During numerical modeling, dependencies of  $S_{\Delta P}(T)$  were established from  $D_{\mu}$ ,  $E_p$ ,  $\mu_p$ ,  $W_p$  – (1),  $\Psi(T)$  – (3), and  $h_a(T)$  – (5). In turn, the results of laboratory research allowed determining  $S_{\Delta P}(W, T, D_{\mu})$  – (2),  $\Psi(W, T, D_{\mu})$  – (3), and  $h_a(W, T, D_{\mu})$  – (6). By equating these dependencies, we obtain the system of equations:

$$\begin{cases} S_{\Delta P}^E(W, T, D_{\mu}) = S_{\Delta P}^T(D_{\mu}, E_p, \mu_p, W_p); \\ \Psi^E(W, T, D_{\mu}) = \Psi^T(D_{\mu}, E_p, \mu_p, W_p); \\ h_a^E(W, T, D_{\mu}) = h_a^T(D_{\mu}, E_p, \mu_p, W_p); \\ 10 \leq W \leq 30; \quad 80 \leq T \leq 140; \quad 0,5 \leq D_{\mu} \leq 1,5. \end{cases} \quad (7)$$

The provided system of equations was solved in Wolfram Cloud by composing the corresponding program, the algorithm of which includes the following steps:

- setting regression equations in the form of a function of several variables;
- setting technological parameters  $W$ ,  $T$ ,  $D_{\mu}$  using the function of dynamic sliders;
- visualization of the intersection function of the system of equations (7) in the form of a three-dimensional graph (fig. 5);
- solving the system of equations (7) using the NSolve numerical calculation function;
- plotting graphs of dependencies  $S_{\Delta P}^E(D_{\mu})$  i  $S_{\Delta P}^T(D_{\mu})$ ,  $\Psi^E(D_{\mu})$  i  $\Psi^T(D_{\mu})$ ,  $h_a^E(D_{\mu})$  and  $h_a^T(D_{\mu})$  to compare the results of theoretical and experimental dependencies.

As an example, consider some relationships between technological parameters and the physico-mechanical properties of feed mixtures:

- $D_{\mu} = 1.5$  mm,  $W = 20$  %,  $T = 110$  °C →  $E_p = 18.3$  MPa,  $\mu_p = 0.28$ ,  $W_p = 0.35$  N/m
- $S_{\Delta P} = 0.802$  MPa,  $\Psi = 1.532$ ,  $h_a = 14.5$  mm;
- $D_{\mu} = 0.5$  mm,  $W = 10$  %,  $T = 80$  °C →  $E_p = 10.8$  MPa,  $\mu_p = 0.366$ ,  $W_p = 0.21$  N/m
- $S_{\Delta P} = 1.733$  MPa,  $\Psi = 1.15$ ,  $h_a = 17.2$  mm;
- $D_{\mu} = 2.5$  mm,  $W = 30$  %,  $T = 140$  °C →  $E_p = 16.4$  MPa,  $\mu_p = 0.20$ ,  $W_p = 0.31$  N/m
- $S_{\Delta P} = 0.274$  MPa,  $\Psi = 1.675$ ,  $h_a = 15.8$  mm.

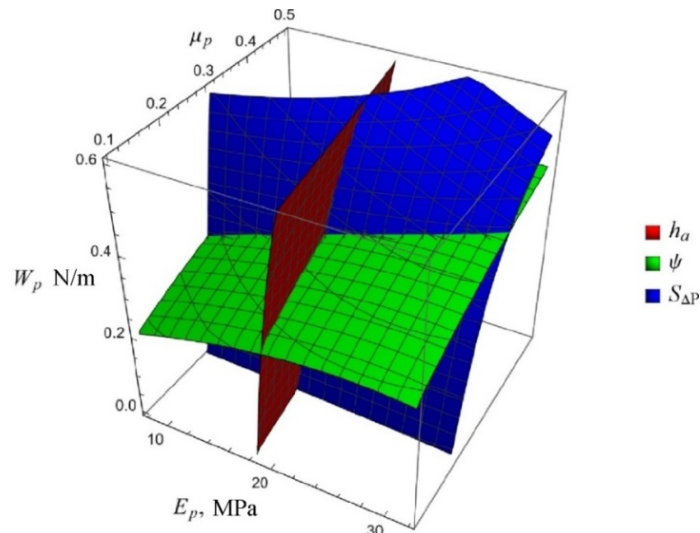


Figure 5 – Visualization of the intersection function of the system of equations at  $D_{\mu} = 0.5 \text{ mm}$ ,  $W = 20.7 \%$ ,  $T = 137.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Source: developed by the authors

For rational technological parameters, we have:  $D_{\mu} = 0.5 \text{ mm}$ ,  $W = 20.7 \%$ ,  $T = 137.0 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow E_p = 22.3 \text{ MPa}$ ,  $\mu_p = 0.31$ ,  $W_p = 0.49 \text{ N/m} \rightarrow S_{\Delta P} = 0.772 \text{ MPa}$ ,  $\Psi = 1.519$ ,  $h_a = 13.2 \text{ mm}$ . The calculated parameters were used in Section 2 when creating the model of the expander forming process.

Comparison of dependencies  $S_{\Delta P E}(D_{\mu})$  and  $S_{\Delta P T}(D_{\mu})$ ,  $\Psi_E(D_{\mu})$  and  $\Psi_T(D_{\mu})$ ,  $h_{aE}(D_{\mu})$  and  $h_{aT}(D_{\mu})$  will be conducted under the condition of rational technological parameters (Fig. 6).

The Pearson correlation coefficient between the modeling data and the laboratory data ranges from 0.94 to 0.99, indicating the adequacy of the conducted research.

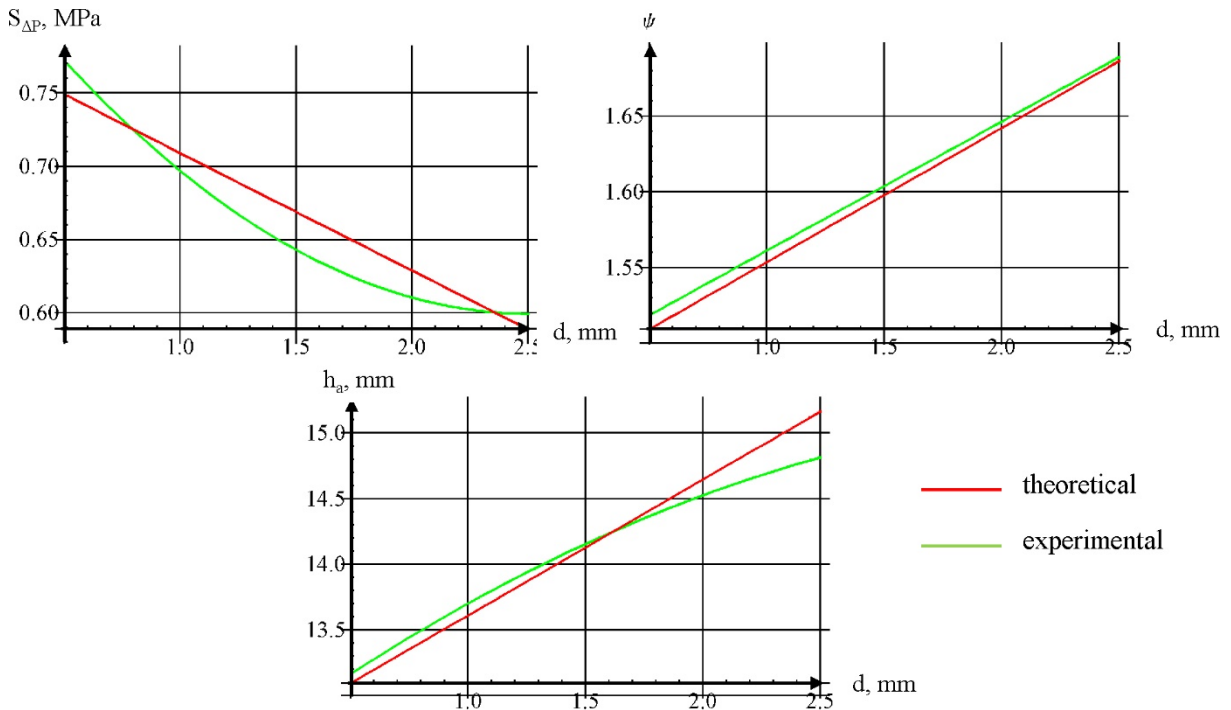


Figure 6 – Comparison of the results of theoretical and experimental dependencies

Source: developed by the authors

**Conclusions.** To compare the results of numerical modeling and laboratory experiments, a program was developed in the Wolfram programming language, which allows linking the technological parameters of the expansion process ( $W$ ,  $T$ ) with the physical and mechanical properties of the compound feeds mixture ( $E_p$ ,  $\mu_p$ ,  $W_p$ ). For rational technological parameters ( $D_\mu = 0.5$  mm,  $W = 20.7$  %,  $T = 137.0$  °C), we have the following physical and mechanical properties:  $E_p = 22.3$  MPa,  $\mu_p = 0.31$ ,  $W_p = 0.49$  N/m. In this case,  $S_{\Delta P} = 0.772$  MPa,  $\Psi = 1.519$ ,  $h_a = 13.2$  mm. Comparisons of dependencies  $S_{\Delta P}^E(D_\mu)$  and  $S_{\Delta P}^T(D_\mu)$ ,  $\Psi^E(D_\mu)$  and  $\Psi^T(D_\mu)$ ,  $h_a^E(D_\mu)$  and  $h_a^T(D_\mu)$  will be conducted under the condition of rational technological parameters, and a sufficiently high Pearson correlation coefficient (0.94–0.99) has been established.

## List of references

1. Standard A. S. A. E. (1994). Wafers, Pellet and Crumbles-Definitions and Methode for Determaining Specific Weight, Durability and Moisture Content. Feed Manufacturing Tech IV. American Feed Industry Association, Inc, Arlington.
2. Thomas M., Van der Poel A. F. B. Physical quality of pelleted animal feed. 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science Technology*. 1996. 61: 89–112 DOI: 10.1016/0377-8401(96)00949-2
3. Rollins D. Ekspanders – performance evaluation. Pmc. Southeastern Poulty-and Egg Assn. Feed Mill Management Seminar, Atlanta, GA. 1996.
4. Moscicki L. Effect of screw configuration on quality and SME value of corn extrudate. *Teka commission of motorization power industry in agriculture*. 2003. 3: 182–186.
5. Jusko S., Mitrus M., Moscicki L., Rejak A., Wojtowicz A. Wpływ geometrii układu plastyfikującego na przebieg procesu ekstruzji surowców roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*. 2001. 2: 124–129
6. Moscicki L., Mitrus M., Wojtowicz A. Technika ekstruzji w przetwórstwie rolno-spożywczym (in Polish). Warszawa: PWRiL. 2007. 222 p.
7. Huimin Li. The effect of expanded and extruded process on pellets physical properties and in sacco rumen degradability: master's Thesis. 2021. 40 p. URL: <https://hdl.handle.net/11250/2831222>
8. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А. та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 2022. 192 с.
9. Дяченко Л. С., Бомко В. С., Сивик Т. Л. Основи технології комбикормового виробництва: навч. посіб. Біла Церква. 2015. 306 с.
10. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука. 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
11. Mohammad Reza Seifi, Reza Alimardani. The Moisture Content Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science Archives*. 2010. 2 (4): 125–134. DOI:10.5539/jas.v2n4p125
12. Li Y M, Chandio F A, Ma Z, Lakhari I A, Sahito A R, Ahmad F. Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *Int J Agric & Biol Eng*. 2018. 11 (4): 52–57
13. Kang Y. S., Spillman C. K., Steele J. L., Chung D. S. Mechanical Properties of Wheat. *Transactions of the ASAE*. 1995. 38(2): 573–578. DOI: 10.13031/2013.27868
14. Івлєв В. В. Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. 7 (38), II: 39–67. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.59-67
15. ДСТУ ISO 712:2015 Зернові та продукти з них. Визначення вмісту вологи. Контрольний метод (ISO 712:2009, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 21 с. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=83685](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83685)

## References

1. Standard A. S. A. E. (1994). Wafers, Pellet and Crumbles-Definitions and Methode for Determaining Specific Weight, Durability and Moisture Content. Feed Manufacturing Tech IV. American Feed Industry Association, Inc, Arlington.
2. Thomas, M. & Van der Poel, A. F. B. (1996). Physical quality of pelleted animal feed. 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science Technology*, 61: 89–112 DOI: 10.1016/0377-8401(96)00949-2

3. Rollins, D. (1996). Ekspanders – performance evaluation. Pmc. Southeastern Poultyand Egg Assn. Feed Mill Management Seminar, Atlanta, GA.
4. Moscicki, L. (2003). Effect of screw configuration on quality and SME value of corn extrudate. *Teka commission of motorization power industry in agriculture*, 3: 182–186.
5. Jusko, S., Mitrus, M., Moscicki, L., Rejak, A., Wojtowicz A. (2001). Wplyw geometrii ukladu plastyfikuj, acego na przebieg procesu ekstruzji surowcow roslinnych Inzynieria Rolnicza, 2: 124–129 [in Polish].
6. Moscicki, L., Mitrus, M., Wojtowicz, A. (2007). Technika ekstruzjiw przetworstwie rolno-spo zywczym Warszawa: PWRiL. 222 p. [in Polish].
7. Huimin, Li. (2021). The effect of expanded and extruded process on pellets physical properties and in sacco rumen degradability: master’s Thesis. 40 p. URL: <https://hdl.handle.net/11250/2831222>
8. Aliiev, E. B. et al. (2022). *Tekhniko-tehnolohichne zabezpechennia bezvidkhodnoi pererobky zernovoi syrovyny u kharchovi produkty i kormy [Technical and technological support of waste-free processing of grain raw materials into food products and fodder]*. ( E. B. Aliyev ed.). Dnipro: LIRA [in Ukrainian].
9. Diachenko, L. S., Bomko, V. S. & Syvyk, T. L. (2015). *Osnovy tekhnolohii kombikormovoho vyrobnytstva [Basics of compound feed production technology]*. Bila Tserkva [in Ukrainian].
10. Aliiev, E. B. (2023). *Chysel'ne modeliuvannia protsesiv ahropromysloвого vyrobnytstva [Numerical modeling of agro-industrial production processes]*. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
11. Mohammad Reza Seifi, Reza Alimardani. (2010). The Moisture Content Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science Archives*, 2 (4): 125-134. DOI:10.5539/jas.v2n4p125
12. Li Y M, Chandio F A, Ma Z, Lakhia I A, Sahito A R, Ahmad F. (2018). Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *Int J Agric & Biol Eng.*, 11 (4): 52–57
13. Kang Y. S., Spillman C. K., Steele J. L., Chung D. S. (1995). Mechanical Properties of Wheat. *Transactions of the ASAE*, 38(2): 573–578. DOI: 10.13031/2013.27868
14. Ivliev, V. V. (2023). Chysel'ne modeliuvannia pruzhnogo histerezysu sypkoho materialu [Numerical modeling of elastic hysteresis of loose material]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 7 (38), II: 39–67. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.59-67 [in Ukrainian].
15. Zernovi ta produkty z nykh. Vyznachennia vmistu volohy. Kontrol'nyj metod [Cereals and their products. Determination of moisture content. Control method]. (2015) *DSTU ISO 712:2015 from January 1, 2016 DP «Ukrains'kyj naukovo-doslidnyj i navchal'nyj tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta iakosti» (DP «UkrNDNTs»)*. Retrieved from : [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=83685](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83685)[in Ukrainian].

**Ельчин Алієв**, проф. кафедри інженерії технічних систем, д-р техн. наук, ст. дослідник

**Олександр Кобець**, доц. кафедри тракторів і сільськогосподарських машин, доц., канд. техн. наук

**Микола Лінко**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна, aliev@meta.ua*

### **Фізико-математична модель процесу стиснення компонентів комбікорму у експандати**

Метою дослідження є перевірка правильності висновків, отриманих з теоретичних досліджень, шляхом обґрунтування експериментально основних параметрів та режимів роботи процесу стиснення компонентів комбікорму. Для порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень складено програму на мові програмування Wolfram, яка дозволяє зв'язати технологічні параметри процесу експандування ( $W$ ,  $T$ ) із фізико-механічними властивостями суміші комбікормів ( $E_p$ ,  $\mu_p$ ,  $W_p$ ). Алгоритм якої включає наступні кроки: постановка рівнянь регресії у вигляді функції кількох змінних; встановлення технологічних параметрів  $W$ ,  $T$ ,  $D_\mu$  за допомогою функції динамічних повзунків; візуалізація функції перетину системи рівнянь вигляді тривимірного графіка; розв'язування системи рівнянь за допомогою функції чисельного обчислення NSolve; побудова графіків залежностей  $S_{\Delta p}^E(D_\mu)$  і  $S_{\Delta p}^T(D_\mu)$ ,  $\Psi^E(D_\mu)$  і  $\Psi^T(D_\mu)$ ,  $h_a^E(D_\mu)$  і  $h_a^T(D_\mu)$ . В якості критерію оцінки пружних властивостей компонентів комбікорму було вирішено визначити зважені площі петлі пружного гістерезису  $S_{\Delta p}$  і коефіцієнт механічних втрат  $\Psi$  на основі середнього діаметра частинок суміші  $D_\mu$ , модуля Юнга  $E_p$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu_p$  і робота адгезії на одиницю площі  $W_p$ . Площа  $S_{\Delta p}$ , укладена в межах петлі пружного гістерезису, являє собою питому енергію (роботу), перетворену в теплову енергію на кожному етапі деформації. Відхилення деформацій від напружень і створювана ними петля пружного гістерезису пов'язані з так званим внутрішнім тертям матеріалу. Коефіцієнт механічних втрат  $\Psi$  визначається як відношення площі петлі гістерезису  $S_{\Delta p}$  до площі, укладеної між кривою напружень і віссю абсцис, де відкладено деформації  $S_{p1}$ . Для раціональних технологічних параметрів ( $D_\mu = 0,5$  мм,  $W = 20,7$  %,  $T =$

137,0 °C) маємо наступні фізико-механічні властивості  $E_p = 22,3$  МПа,  $\mu_p = 0,31$ ,  $W_p = 0,49$  Н/м. При цьому  $S_{\Delta P} = 0,772$  МПа,  $\Psi = 1,519$ ,  $h_a = 13,2$  мм. Порівняння залежностей  $S_{\Delta P}^E(D_{\mu})$  і  $S_{\Delta P}^T(D_{\mu})$ ,  $\Psi^E(D_{\mu})$  і  $\Psi^T(D_{\mu})$ ,  $h_a^E(D_{\mu})$  і  $h_a^T(D_{\mu})$  проведемо при умові раціональних технологічних параметрів і встановлені достатньо високий коефіцієнт кореляції Пірсона (0,94–0,99).

**корм, пресування, стиснення, чисельне моделювання, лабораторні дослідження, змішування, тиск, параметри, фізико-механічні властивості, ефективність**

*Одержано (Received) 26.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 04.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

**УДК 621.9.048.7:621.373.826:**

**631.3:629.081**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.104-110](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.104-110)

**Ю.О. Ковальчук**, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий**, доц., канд. техн. наук,

**В.В. Кравченко**, доц., канд. техн. наук

*Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна*

*e-mail: temp14053@gmail.com*

**А.О. Ковальчук**, доц., канд. техн. наук

*Харківський національний університет повітряних сил імені І. Кожедуба, м. Харків, Україна*

## Лазерне зміцнення інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК

Досліджено вплив лазерної обробки на приповерхневу мікроструктуру сплавів. Показано, яка сталь матиме максимальну твердість в результаті лазерного зміцнення серед сталей 40X13, 30X13 та 20X13. Визначено оптимальний рівень розчинення в сталях Р6М5, 9ХС і ХВГ вихідних карбідів для отримання максимально можливої твердості при їх лазерній обробці. Досліджено значення мікротвердості та термостійкості бронзи в результаті її лазерного зміцнення. Відмічено значне збільшення терміну експлуатації загартованих лазером виробів в порівнянні зі стандартною термічною обробкою.

**лазерна обробка, лазерне зміцнення, гартування, зносостійкість, мікротвердість**

**Постановка проблеми.** Нині не втрачає своєї актуальності питання збільшення ресурсу виробітку різних інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК. Забезпечення їх більшої міцності та зносостійкості є однією із першочергових задач, що стоять перед відповідними виробниками.

Багато інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК, такі як вимірювальні, ріжучі та різьбонарізні інструменти, свердла, мітчики, плашки, фрези, пружини, підшипники, деталі поршневих компресорів, редукторів, різноманітних станків, інструменти, що працюють з ударними навантаженнями та інше технологічне оснащення, які повинні задовольняти відповідні вимоги щодо міцності та зносостійкості, виготовляються з таких сплавів, як, зокрема, сталі 40X13, 30X13, 20X13, Р6М5, 9ХС, ХВГ та з бронзи. Для їх зміцнення може успішно застосовуватися метод лазерної обробки.

Відомо, що під час зміцнення лазером різних інструментів та деталей зі сталі та інших сплавів важливим фактором впливу на їх ресурс виробітку є мікротвердість та

глибина зміцненого шару, які залежать від параметрів поверхневої лазерної обробки. Одним із чинників, що впливають на мікротвердість, є, зокрема, обсяг розчинених карбідів у сплаві. Різні сплави мають різні властивості в результаті їх лазерної обробки, що, в свою чергу, впливатиме на ресурс виробітку відповідних інструментів та деталей, тому детальний аналіз даного питання зараз є актуальним та важливим.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз публікацій останніх років свідчить, що увагу багатьох науковців та вчених привертають задачі, пов'язані з визначенням властивостей сталей, що зазнають впливу лазерного випромінювання. Зокрема, це питання досліджували науковці Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П., Токарев А. та інші, які вивчали вплив лазерного випромінювання на поверхню сталевих зразків у різних випадках та для різних матеріалів [1-2].

Питаннями зміцнення різних деталей обладнання шляхом лазерної обробки в останні роки займалися Аулін В.В., Лесик Д.А., Грушка М., Сідун К.Ю., Завойко О.С., Добрас Д. та інші [3-10].

Актуальним зараз залишається більш глибоке та різностороннє дослідження впливу лазерного випромінювання на мікроструктуру поверхневих шарів різних інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК з метою підвищення їх зносостійкості.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження впливу лазерної обробки на приповерхневу мікроструктуру сплавів з метою покращення їх механічних властивостей та збільшення ресурсу виробітку відповідних інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК.

**Виклад основного матеріалу.** Проаналізуємо вплив лазерної обробки на приповерхневу мікроструктуру різних сплавів, що використовуються для виробництва різноманітних інструментів та деталей обладнання.

Дослідження проводились із використанням неперервного випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм, діаметром променя 10 мм та потужністю 0,5-1 кВт на базі лазерної установки «Комета-2» зі швидкістю переміщення дослідних зразків 10-30 мм/с. Для дослідження твердості поверхні використовувався мікротвердомір ПМТ-3.

Раніше вважалося, що широко використовувану хромисту сталь 40X13 можна зміцнити лазером тільки з опаленням, а це значно підвищувало трудомісткість виробництва деталі. Дослідження структури і властивостей цієї та аналогічних сталей показали, що загартування сталі 40X13 без опалення може бути досягнуто шляхом правильного підбору режиму. Для кращого розуміння даного процесу необхідно проаналізувати цикл лазерного зміцнення поверхневого шару оброблюваного зразка. Час лазерного гартування невеликий, але за цей час карбіди хрому сталі 40X13 повинні встигнути розчинитися в аустенітному стані, тому для проходження даного процесу потрібно більше часу, ніж при гартуванні сталі 40X.

Оптимальний час, необхідний для розчинення карбідів, лінійно залежить від вмісту в сталі карбідоутворюючих елементів.

Розподіл мікротвердості за перерізом зони обробки для сталей 20X13, 30X13 та 40X13 наведено на рис. 1. Видно, що максимальна твердість досягається у випадку гартування сталі 40X13, так як вміст вуглецю в ній є найвищим серед перерахованих сталей. Максимальна твердість для цієї сталі становить 1100 Н<sub>μ</sub>50.

Термін експлуатації виробів з цих загартованих лазером сталей підвищується в середньому в 4-5 разів в порівнянні зі стандартною термічною обробкою.

Відомо, що розчинення карбідів, навіть часткове, впливає на структуру і властивості поверхневих шарів сталей і виробів в цілому. При високошвидкісній лазерній обробці, тобто в умовах короткочасного лазерного впливу на поверхню сталі,

наслідки розчинення карбїду можуть спостерігатися тільки в розплавлених лазером зонах металу, на їх кордонах з вихідною сталлю, на тонких ділянках навколо карбїдів.

Виникаючі зі зміненим хімічним складом, структурою і властивостями мікроділянки мають велике практичне значення, але вони вивчені недостатньо детально. Це обмежує можливості створення матеріалу із заданою структурою і підвищеними експлуатаційними характеристиками в поверхневих шарах сплаву.

Тому розглянемо особливості формування структури і властивостей в зоні рідкого стану ділянки, опроміненої лазером, з урахуванням впливу на ці процеси присутньої в сталях карбїдної фази [1-4].

Особливостями зони рідкого стану є її нетравимість в звичайних реактивах, дисперсність структури і висока твердість, а також помітне зменшення обсягу вихідної карбїдної фази. Незважаючи на короткий час впливу лазерного імпульсу ( $10^{-3}$  с), цьому сприяє висока температура нагріву і конвективне перемішування тонкого шару рідкого металу. Часткове або повне розчинення карбїдів згладжує поверхневий рельєф навколо них.

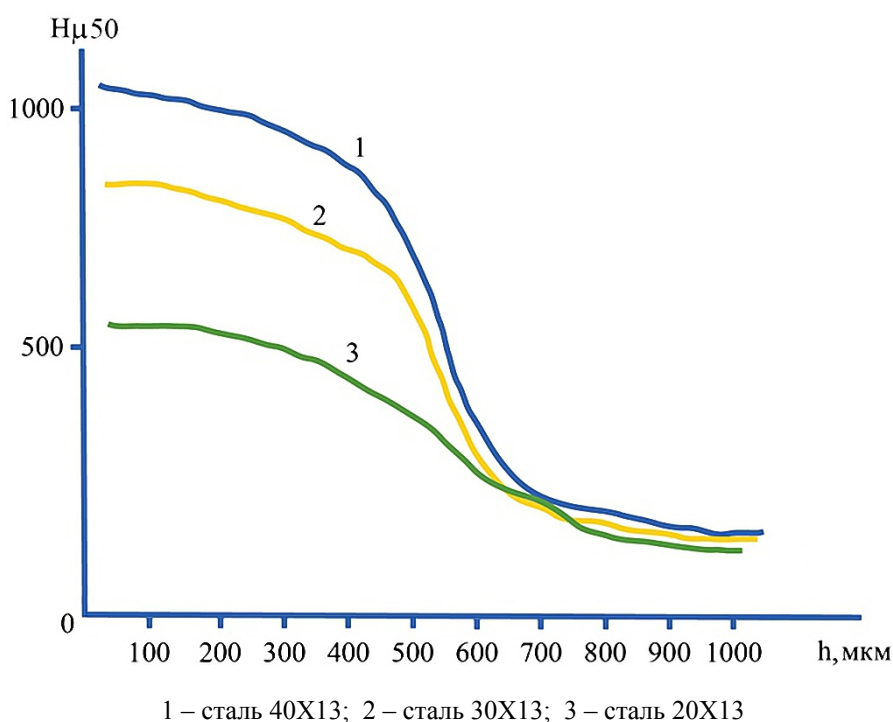


Рисунок 1 – Розподіл мікротвердості за перерізом зони обробки сталей після лазерного зміцнення  
Джерело: розроблено авторами

В результаті зміни хімічного складу зменшуються рівні точок мартенситного перетворення в зонах рідкого стану і в них зберігається значна кількість залишкового аустеніту (40-60%), що характеризується дисперсною структурою. Це позитивно позначається на експлуатаційних характеристиках опромінюваних виробів, особливо при впливі зовнішніх ударних навантажень [6-8].

На рис. 2 представлені результати кількісної оцінки впливу обсягу розчинених карбїдів на ступінь зміцнення поверхневих шарів металу, отримані в ході досліджень опромінених в різних режимах сталей.

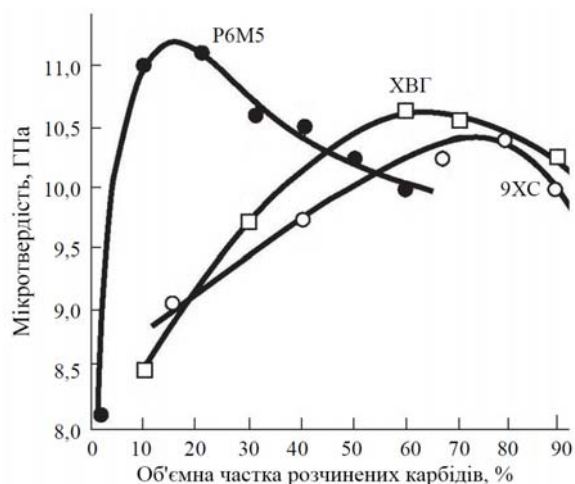


Рисунок 2 – Вплив обсягу розчинених карбідів на мікротвердість оброблених лазером сталей  
Джерело: розроблено авторами

На підставі наведених на даному рисунку результатів досліджень опромінених в різних режимах сталей можна зробити висновок, що для отримання максимально можливої твердості при лазерній обробці сталі Р6М5 досить розчинити 30% вихідних карбідів і 60-70% для сталей 9ХС і ХВГ. Зниження твердості опромінюваних зон зі збільшенням обсягу розчинених карбідів, ймовірно, пов'язане зі збільшенням в цих умовах кількості залишкового аустеніту.

Слід зазначити, що в процесі експлуатації опромінюваних виробів під впливом термічних деформаційних навантажень зниження твердості, що спостерігається на рис. 2, компенсує велику кількість твердих дисперсних включень твердих карбідів, що виділяються з аустеніту.

Також успішно можуть піддаватись лазерній обробці різні інструменти та деталі обладнання, що виготовлені із бронзи. Обробка бронзи шляхом лазерного зміцнення дозволила досягти значень мікротвердості до 700 Н<sub>μ</sub>50, а термостійкості шару до 350°C. На рис. 3 показано розподіл мікротвердості після лазерного гартування і подальшого відпалу при 350°C. Видно, що зберігається висока мікротвердість поверхневого шару.

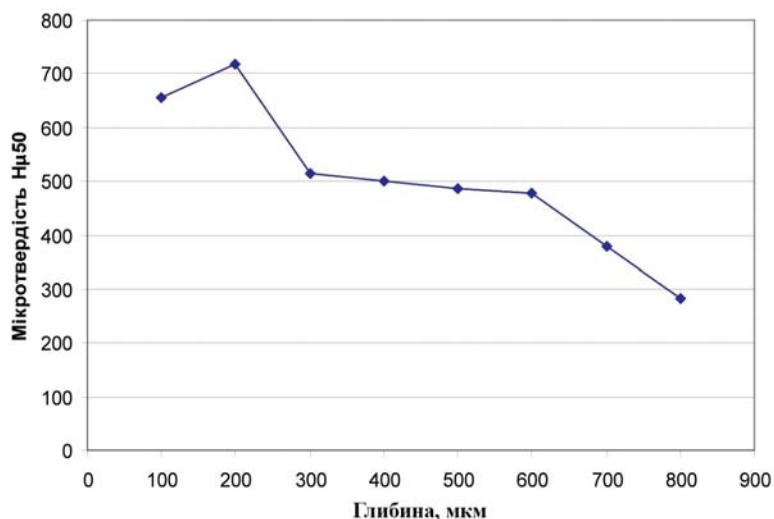


Рисунок 3 – Розподіл мікротвердості за глибиною у бронзі після зміцнення лазером та наступного відпалу при 350°C протягом 1 год  
Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що така стабільність бронзи обумовлена утворенням в поверхневому шарі інтерметалідів NiAl, CuAl і оксидів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які утримують отриману в результаті лазерної модифікації структуру від розпаду в рівноважну початкову структуру.

**Висновки.** Отже, досліджено вплив лазерної обробки на приповерхневу мікроструктуру сплавів з метою покращення їх механічних властивостей та збільшення ресурсу виробітку відповідних інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК. Визначено, що максимальна твердість досягається у випадку гартування сталі 40X13, так як вміст вуглецю в ній є найвищим порівняно зі сталями 30X13 та 20X13. Також, для отримання максимально можливої твердості при лазерній обробці сталі Р6М5 досить розчинити 30% вихідних карбідів і 60-70% для сталей 9ХС і ХВГ. Обробка бронзи шляхом лазерного зміцнення дозволила досягти значень мікротвердості до 700 Н<sub>μ</sub>50, а термостійкості шару до 350°С. Термін експлуатації виробів з цих загартованих лазером сплавів підвищується в середньому в 4-5 разів в порівнянні зі стандартною термічною обробкою.

## Список літератури

1. Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів: монографія. Харків: ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.
2. Laser-plasma treatment of structural steel / A. Tokarev et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 58–62.
3. Аулін В.В., Лисенко С.В., Жилова І.В., Вербицький О.В. Рафінуючо-легувальні дії на поверхневий шар матеріалу деталей систем і агрегатів транспортних засобів лазерного потоку енергії. *Підвищення надійності машин і обладнання: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.*, 15-17 квіт. 2020 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 91.
4. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В. Застосування легуючих матеріалів та поглинаючих покриттів при лазерному зміцненні деталей автомобільного транспорту. *Сільськогосподарські машини*. 2023. Вип. 49. С. 99–104. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026>
5. Селективне поверхнєве зміцнення валу механізму передач роботизованою лазерною 3D системою / Лесик Д.А. та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2022. № 3 (13). С. 24–29. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.04>
6. Rutkowski, D., Ambroziak, A. Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. № 5. P. 49–57.
7. Ковальчук Ю.О., Кравченко В.В., Оляднічук Р.В. Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. Вип. 5. С. 92–99.
8. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.
9. Dobras D., Rutkowska-Gorczyca M. The use of color etching to study the microstructure of laser welded steel used in the automotive industry. *Materials Testing*. 2019. Vol. 61(11). P. 1087–1094. <https://doi.org/10.3139/120.111424>
10. Підвищення зносостійкості деталей автомобільного транспорту в АПК шляхом застосування лазерного наплавлення / Ковальчук Ю.О. та ін. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 25–31.

## References

1. Afanas'ieva, O.V., Lalazarova, N.O. & Fedorenko, Ye.P. (2020). Lazerna poverkhneva obrobka materialiv [Laser surface treatment of materials]. Kharkiv: FOP Panov A.M. [in Ukrainian].
2. Tokarev, A., Bataeva, Z., Grachev, G., Smirnov, A., Khomyakov, M. & Gerber, A. (2015). Laser-plasma treatment of structural steel. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 788, 58–62 [in English].
3. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zhylova, I.V. & Verbyts'kyj, O.V. (2020). Rafinuiucho-lehuval'ni dii na poverkhnevyy shar materialu detalej system i ahrehativ transportnykh zasobiv lazernoho potoku enerhii [Refining and alloying effects on the surface layer of the material of parts of systems and units of

- vehicles of laser energy flow]. Proceedings from Increasing the reliability of machines and equipment '20: mizhnar. nauk.-prakt. konf. (15-17 kvit. 2020 r.) – *Int. Sci. And Pract. Conf.* (p. 91). Kropyvnytskyu: TSNTU [in Ukrainian].
4. Koval'chuk, Yu.O., Pushka, O.S. & Vojtik, A.V. (2023). Zastosuvannya lehuiuchykh materialiv ta pohlynaiuchykh pokryttiv pry lazernomu zmitsnenni detalej avtomobil'noho transportu [Application of alloying materials and absorbing coatings during laser strengthening of automobile parts]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny – Agricultural machinery*, 49, 99-104. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026> [in Ukrainian].
  5. Lesyk, D.A. et al. (2022). Selektivne poverkhneve zmitsnennia valu mekhanizmu peredach robotyzovanoiu lazernoiu 3D systemoiu [Selective surface strengthening of the gear mechanism shaft by a robotic laser 3D system]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 3 (13), 24–29. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.04> [in Ukrainian].
  6. Rutkowski, D. & Ambroziak, A. (2014). Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 49–57 [in English].
  7. Koval'chuk, Yu.O., Kravchenko, V.V. & Oliadnichuk, R.V. (2017). Lazerna obrobka detalej sil's'kohos-podars'koi tekhniki z chavunu [Laser processing of parts of agricultural machinery from cast iron]. *Visnyk Ukrain's'koho viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity – Bulletin of the Ukrainian branch of the International Academy of Agrarian Education*, 5, 92–99 [in Ukrainian].
  8. Zavojko, O.S. (2014). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry rujnuvanni na vtomu ta znos [Investigation of laser hardening of crankshafts and mechanical-thermal treatment in case of fatigue and wear destruction]. *Fizyka i khimiia tverdogo tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, 15, 4, 846-855 [in Ukrainian].
  9. Dobras, D. & Rutkowska-Gorczyca, M. (2019). The use of color etching to study the microstructure of laser welded steel used in the automotive industry. *Materials Testing*, 61 (11), 1087–1094. <https://doi.org/10.3139/120.111424> [in English].
  10. Koval'chuk, Yu.O., Pushka, O.S., Vojtik, A.V. & Koval'chuk, A.O. (2022). Pidvyschennia znosostijkosti detalej avtomobil'noho transportu v APK shliakhom zastosuvannya lazernoho naplavlennia [Increasing the wear resistance of motor vehicle parts in the agricultural sector by using laser surfacing]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Technology, energy, transport of agricultural industry*, 1 (116), 25–31 [in Ukrainian].

**Yuriy Kovalchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisoviy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Kravchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine*

**Andriy Kovalchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

### **Laser Strengthening of Tools and Parts of Automobile Transport Repair Workshops Equipment in the Agricultural Sector**

The purpose of this work is to study the effect of laser processing on the surface layers of alloys and to study their microstructure and features in order to improve their mechanical properties and increase the production resource of relevant tools and parts of equipment for repair shops of automobile transport in the agricultural sector.

The effect of laser processing on the near-surface microstructure of alloys was studied. It is shown which steel will have the maximum hardness as a result of laser hardening among steels 40H13, 30H13 and 20H13. As a result of the change in the chemical composition, the levels of martensitic transformation points in the liquid state zones decrease, and a significant amount of residual austenite (40-60%), characterized by a dispersed structure, remains in them. This has a positive effect on the operational characteristics of irradiated products, especially when exposed to external shock loads. The optimal level of dissolution in R6M5, 9HS and HVG steels of initial carbides to obtain the maximum possible hardness during their laser processing was determined. The value of microhardness and heat resistance of bronze as a result of its laser hardening was investigated.

Therefore, the influence of laser processing on the near-surface microstructure of alloys was investigated in order to improve their mechanical properties and increase the resource of production of appropriate tools and parts of automobile transport repair workshops equipment in the agricultural sector. It was determined that the maximum hardness is achieved in the case of hardening steel 40H13, since the carbon

content in it is the highest compared to steels 30H13 and 20H13. Also, to obtain the maximum possible hardness during laser processing of R6M5 steel, it is enough to dissolve 30% of the original carbides and 60-70% for 9HS and HVG steels. Treatment of bronze by laser hardening made it possible to achieve values of microhardness up to 700 H $\mu$ 50, and heat resistance of the layer up to 350°C. The service life of products made of these laser-hardened alloys is increased by an average of 4-5 times compared to standard heat treatment.

**laser processing, laser hardening, tempering, wear resistance, microhardness**

*Одержано (Received) 23.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

УДК 621.664

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.110-117](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.110-117)

**Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Амосов**, доц., канд. техн. наук, **Ю.В. Кулешков**, проф., д-р. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: rudenkotv@kntu.kr.ua*

**І.Т. Руденко**, учень

*Комунальний заклад «Ліцей «Європейська освіта», м. Кропивницький, Україна*

## Електросапа – культиватор «Мрія»

В даній статті запропоновано конструкцію універсальної електросапи – культиватора з балансувальним ведучим колесом для проведення міжрядної обробки просапних культур. Особливістю даної конструкції є те, що дана машина обладнана електричним двигуном постійного струму з вбудованим редуктором, живлення якого здійснюється за рахунок акумуляторної батареї. Також пропонується дообладнати її пристроєм, для виконання внутрішньорядного просапання.

**ручний електрокультиватор, міжрядна та внутрішньорядна обробка, електросапа, ведуче колесо, електродвигун**

**Постановка проблеми.** Боротьба з бур'янами є важливою частиною догляду за сільськогосподарськими культурами, оскільки вони не тільки конкурують з культурними рослинами за воду, поживні речовини, і світло, а також істотно впливають на врожайність. В даний час, в традиційному землеробстві, існують різноманітні методи боротьби з бур'янами, а саме [1]:

- поверхнева обробка ґрунту, використанням плугів, культиваторів та інших знарядь для поверхневого розпушування;
- мульчування, покриття ґрунту шаром мульчі (соломою, сіном чи іншими органічними матеріалами);
- використанням гербіцидів, які хімічним методом пригнічують або знищують бур'ян;
- ручне прополювання, найбільш ефективний метод видалення бур'яну, але й найбільш трудомісткий;
- посів конкурентоспроможних рослин, які ефективно конкурують з бур'янами за ресурси (світло, поживні речовини);
- біологічний контроль, використанням природніх ворогів бур'янів (комахи, гриби);

© Т.В. Руденко, В.В. Амосов, Ю.В. Кулешков, І.Т. Руденко, 2024

– комбінований спосіб, поєднанням двох або кількох способів.

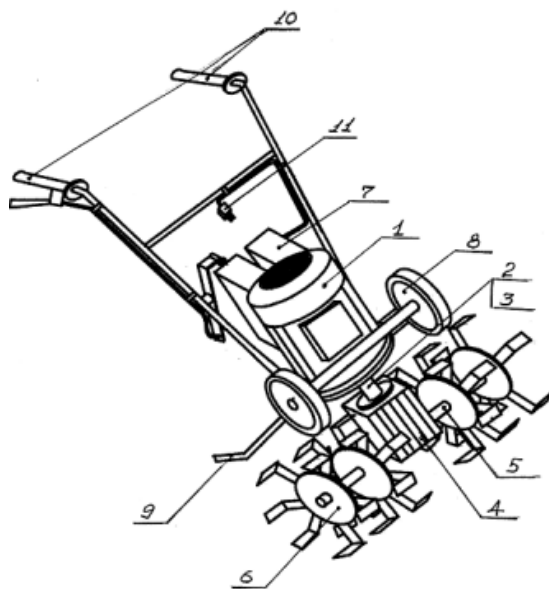
Важливою умовою, високого результату в боротьбі з бур'янами є вірний вибір методу, що відповідає конкретним умовам на сільськогосподарських ділянках.

Кожен з наведених способів має певні переваги та недоліки. В даний час в сучасному землеробстві, набули поширення хімічний метод та механічне розпушування, однак занепокоєння з приводу використання гербіцидів, особливо в умовах «органічного землеробства» не залишає вибору.

З наведеного вище бачимо, що для роботи на присадибній ділянці найбільш ефективним методом боротьби з бур'янами є ручне прополювання. Однак через велику трудомісткість робіт постає задача створити пристрій для механічної обробки як міжрядь, так і внутрішньорядного прополювання. Внутрішньорядне прополювання є важливою складовою системи управління бур'янами на сільськогосподарських ділянках, але важливо пам'ятати, що ефективність цього методу залежить від типу культур, стадії їхнього розвитку і інших факторів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В патенті на корисну модель №46863 [2] (рис. 1) пропонується електрокультиватор візкового типу, що складається з електродвигуна 1, черв'ячного редуктора 4, робочого органу у вигляді набору фрез 6, електрошафи 7.

Недоліками даного культиватора є недосконалість функціональності конструкції, мала продуктивність, велика вага та габарити, неефективність і важкість робіт з його застосуванням.



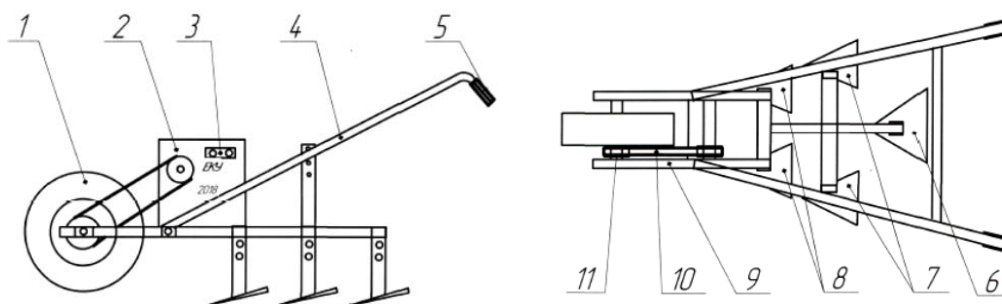
1 – електродвигун; 2,3 – перехідник з швидкохідним валом; 4 – черв'ячний редуктор; 5 – вал;  
6 – фрези; 7 – електрошафа; 8 – опорні колеса; 9 – сошник; 10 важелі керування; 11 – шнур керування

Рисунок 1 – Електрокультиватор

*Джерело: на підставі [2]*

Універсальний електрокультиватор виконано у вигляді балансувального привідного колеса 1, містить регульовані ручки культиватора 4, розпушувачі 6, 7, 8, станину електрокультиватора 9. Електрокультиватор обладнаний електродвигуном з редуктором 2, роз'ємом для під'єднання живлення, обертово-регулювальним пристроєм для регулювання обертів електродвигуна, привідним пасом та колісною привідною шестірнею. Використання електрокультиватора дає можливість швидко і якісно

обробляти ґрунт в міжрядді, не завдаючи шкоду рослинам в рядах. Однак суттєвим недоліком даного пристрою є робота від загальної мережі, що значно зменшує область застосування.



1 – привідне колесо; 2 – електродвигун з редуктором; 3 – електрошкафа; 4 – регульовані ручки; 5 – регулятор обертів; 6, 7, 8 – розпушувачі; 9 – станіна; 10 – привідний пас; 11 – колісна шестерня

Рисунок 2 – Електрокультиватор універсальний

Джерело: на підставі [3]

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є обґрунтування конструктивної схеми культиватора з електроприводом, який працює від акумуляторної батареї для проведення як міжрядного так і внутрішньорядного просапання, що повинно істотно знизити об'єм фізичної праці на присадибній ділянці.

**Викладення основного матеріалу.** Сучасний ринок, на даний час, пропонує декілька пропозицій електрокультиваторів та мотоблоків (рис.3).



а – мережевий електрокультиватор; б – акумуляторний культиватор;  
в – ручний акумуляторний мінікультиватор; г – мотобреза

Рисунок 3 – Ручні електро- та мотокультиватори

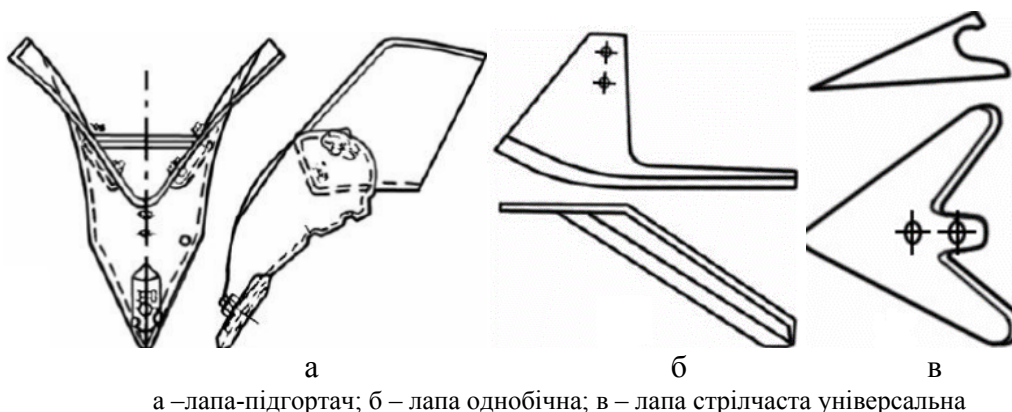
Джерело: на підставі [4, 5, 6, 7]

Дані машини призначені для полегшення ручної праці, однак всі вони мають певні недоліки. Так електрокультиватор (рис. 3, а) працює від однофазної мережі, що потребує довгих подовжувачів, та істотно обмежує область застосування. Акумуляторні культиватори (рис. 3, б, в) легкі, мобільні, але виконують лише розпушування міжряддя на невеликих ділянках, квітників, клумб. Мотобреза (рис. 3, г) виконує глибоке рихлення на значних площах, однак не здатна обробляти вузькі міжряддя, а також має значну вагу, шум, вібрацію, та передбачає роботу фізично підготовленою людиною.

Нами пропонується машина, яка позбавлена цих недоліків та дозволяє проводити міжрядну обробку будь яких просапних культур навіть дитиною.

Пропонований пристрій пропонується обладнати електродвигуном з електроакумулятором, що дозволить отримати велику мобільність, низький рівень шуму та вібрацій, а також мати набір інструментів для виконання всіх технологічних операцій при вирощуванні просапних культур.

Дев'яносто відсотків ручної праці при вирощуванні городніх культур припадає на посів та подальший обробіток міжрядь. Тому пристрій повинен мати певний набір інструментів, таких як «лапа-підгортач» (рис. 4, а) для нарізання борозен та підгортання; «лапа одnobічна» (рис. 4, б) для видалення бур'яну з міжряддя; «лапа стрілочаста» (рис. 4, в) для глибокого рихлення та руйнування кірки [8].

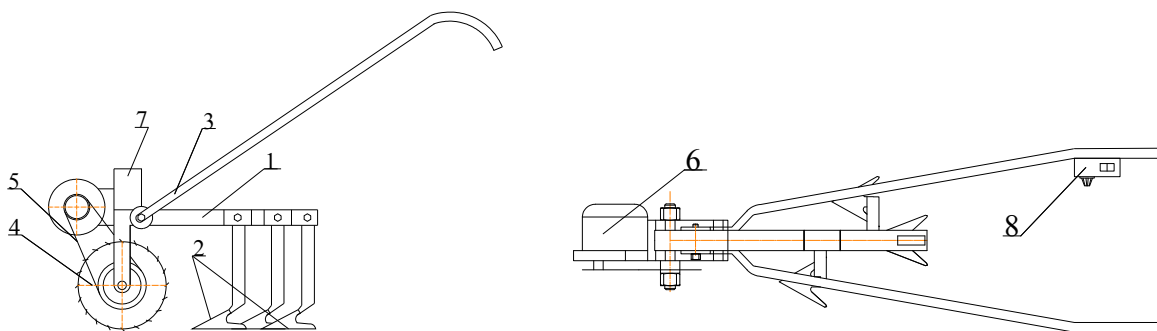


а – лапа-підгортач; б – лапа одnobічна; в – лапа стрілочаста універсальна

Рисунок 4 – Набір інструментів для пропонованого електрокультиватора

*Джерело: на підставі [8]*

Електросапа-культиватор (рис. 5, б) складається з рами 1, на якій закріплені змінні робочі органи 2 та регульовані ручки 3. Електросапа приводиться до руху за допомогою робочого колеса 4, для зручності маневрування в робочому колесі встановлено обгінну муфту. Привід на робоче колесо здійснюється за допомогою ланцюгової передачі 5 від електродвигуна постійного струму з вбудованим редуктором 6, живлення якого здійснюється від акумуляторної батареї 7. Для зміни швидкості обертання робочого колеса в конструкції встановлено ШИМ регулятор 8.



1 – рама; 2 – змінні робочі органи; 3 – регульовані ручки; 4 – привідне колесо;  
5 – ланцюгова передача; 6 – електродвигун з редуктором; 7 – акумуляторна батарея;  
8 – ШИМ регулятор

Рисунок 5 – Електросапа (культиватор) «Мрія»

*Джерело: розроблено авторами*



а



б

а – зі стрільчатими лапами; б – з однобічними просапними лапами.

Рисунок 6 – Загальний вигляд електросапи (культиватора) «Мрія»

Джерело: розроблено авторами

Електросапа-культиватор працює наступним чином: після вмикання регулятора з широтно-імпульсною модуляцією, змінним резистором встановлюємо необхідні оберти робочого колеса, після чого, притримуючи за ручки, спрямовуємо машину в міжряддя. На робочому колесі встановлені ґрунтозачеми, таким чином, щоб при обертанні, відбувалось додаткове фрезерування верхнього шару ґрунту. Даний культиватор налаштовується на ширину міжряддя від 15 до 30 см, що дозволяє обробляти міжряддя будь-яких культур та не потребує наперед заданої ширини посіву.

Проведені польові випробування показали, що всі поставлені задачі даний пристрій виконує в повному обсязі, а ємності акумуляторної батареї, за умови суцільної культивації, вистачає на 400 м<sup>2</sup>. Основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики електросапи-культиватора

Технічні характеристики	
Потужність двигуна	350 Вт
Напруга живлення	36 В
Ємність АКБ	10 А год
Продуктивність суцільна культивація	400 м <sup>2</sup> /год
міжрядне просапування	600 м <sup>2</sup> /год
підгортання	500 м <sup>2</sup> /год
Вага	18 кг

Джерело: розроблено авторами

Наступним кроком в підвищенні функціональних характеристик пропонованої конструкції є дообладнання електросапи-культиватора пристроєм для проведення внутрішньорядної обробки.

Внутрішньорядне прополювання – це метод контролю за бур'янами, який включає в себе видалення бур'янів з внутрішнього простору між рослинами одного ряду. Цей процес може бути важливим етапом у догляді за сільськогосподарськими культурами та має на меті знизити конкуренцію між бур'янами і культурними сільськогосподарськими рослинами. Важливо вчасно виконувати внутрішньорядне прополювання, особливо на ранніх стадіях росту сільськогосподарських культур, коли бур'яни лише починають набирати масу [9].

Основними способами внутрішньорядного контролю за бур'янами є:

- використання ручних інструментів;
- машинне прополювання;
- застосування мульчі.

Важливою задачею внутрішньорядного прополювання є уникнення пошкоджень кореневої системи та збереження структури ґрунту поблизу культурних рослин.

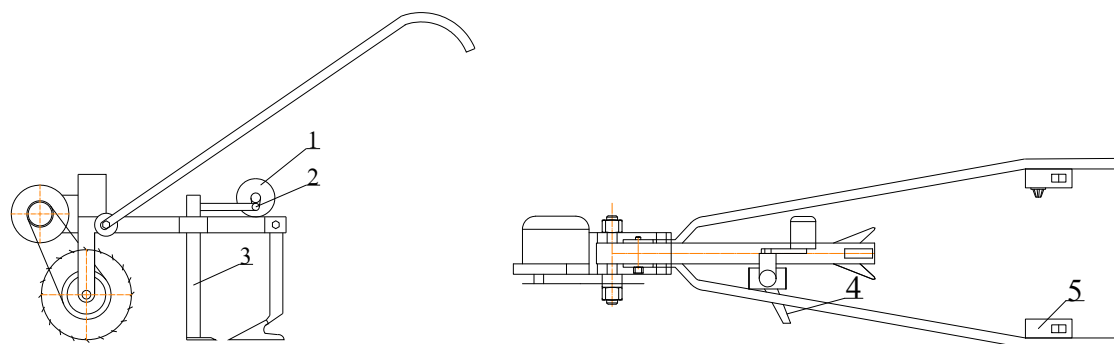
На великих площах часто використовують машини зі спеціальним обладнанням, що автоматизують процес видалення бур'янів безпосередньо в ряду рослин [10].

Для прополювання всередині ряду, необхідне активне переміщення інструменту по складній траєкторії з точним контролем. На сьогодні розроблені різноманітні системи управління за допомогою відеокамер [11]. Камери достатньо чітко розпізнають культурні рослини, однак на розпізнавання може впливати багато факторів:

- неодночасна поява сходів;
- щільність сходів;
- коливання рослин через вітер;
- сильне забур'янення, через що рядок з культурами важко побачити;
- затінення на краю поля, або через мінливу хмарність;
- сильна інтенсивність випромінювання сонячного світла;
- запилення.

Також, на широке розповсюдження таких систем, впливає і значна вартість та складність налаштування обладнання. Тому, для роботи на присадибних ділянках економічно доцільним є ручне керування самим оператором. Так після не тривалої практики точність керування може сягати пари сантиметрів від культурної рослини.

На рис. 7 наведена схема електросапи з можливістю проведення внутрішньорядного просапування. Робота даного пристрою полягає в наступному: після спрямування сапи в міжряддя оператор натискає кнопку 5, що вмикає електричний двигун 1. За допомогою ексцентрикового з'єднання 2 обертальний момент передається до штанги 3 яка провертається навколо власної осі виводячи просапну лапу 4 в робоче положення. Кут повороту двигуна контролюється кінцевими вимикачами. Перед підходом до культурної рослини перемикачем 5 провертаємо двигун 1 в початкове положення.



1 – додатковий електродвигун; 2 – механізм приводу; 3 – регульована штанга;  
4 – робочий орган; 5 – кнопка вмикання електродвигуна

Рисунок 7 – Електросапа (культиватор) «Мрія» з пристроєм для внутрішньорядного прополювання

*Джерело: розроблено авторами*

**Висновки.** В даній статті запропоновано оригінальну конструкцію електросапи-культиватора для проведення як міжрядного так і внутрішньорядного просапування. Особливістю даної конструкції є те, що електросапа містить балансірне колесо,

обертання якого здійснюється від електродвигуна з вбудованим редуктором. Обґрунтовано набір необхідного обладнання для проведення комплексної обробки просапних культур.

## Список літератури

1. Шувар І. А. Екологічні основи зниження забур'яненості агрофітоценозів : навч. посіб. Львів : Новий Світ-2000, 2008. 494 с.
2. Електрокультиватор : пат. № 46863 Україна: МПК (2009): A01B 33/00, A01B 9/00, A01B 21/00. № u200907012 ; заявл. 06.07.2009 ; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1/2010.
3. Електрокультиватор універсальний : пат. № 134077 Україна: МПК: A01B 1/06 (2006.01). № u201812698; заявл. 20.12.2018 ; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8/2019.
4. Техніка для саду: веб-сайт. URL: <https://storgom.ua/kultivatory/elektricheskiy-ukraina.html> (дата звернення 30.03.24)
5. Культиватор аккумуляторный Ryobi RY18CVA-0 18В: веб-сайт. URL: <https://molotook.com.ua/ua/p1891325847-kultivator-akkumulyatornyj-ryobi.html> (дата звернення 30.03.24)
6. Акумуляторний ручний культиватор RYOBI RY18HCA : веб-сайт. URL: <https://profitehnika.com.ua/product/akumulyatornyj-ruchnyj-kultyvator-ryobi-ry18hca-0-one-5133005766/> (дата звернення 30.03.24)
7. Мотокультиватор HIGHER HP-32525: веб-сайт. URL: <https://megatool.com.ua /cherkassy/ higher-hp-32525/> (дата звернення 30.03.24)
8. Сільськогосподарські та меліоративні машини : підручник / Войтюк Д.Г. та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. К. : Вища освіта, 2004. 544 с.
9. Трибель С. О. Екологізація захисту рослин (Літературний огляд). *Карантин і захист рослин*. 2010. № 5. С. 16-20.
10. Огляд розвитку засобів для орієнтації просапних знарядь вздовж рядків, зокрема у вирощуванні цукрових буряків / Ветохін В. та ін. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2020. Вип. 26 (40). С. 30-46. URL: [http://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk\\_2020\\_2.html](http://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk_2020_2.html)
11. Солоха М. Автоматичне керування культиваторами для міжрядного обробітку ґрунту просапних культур. *Пропозиція*. 2016. № 12. С. 162-165. URL: <https://propozitsiya.com.ua/avtomatychnе-keruvannya-kultyvatoramy-dlya-mizhryadnogo-obrobittku-gruntu-prosapnyh>

## References

1. Shuvar, I. A. (2008). *Ekolohichni osnovy znyzhennia zabur'ianenosti ahrofitotsenoziv [Ecological basis of reduction of weediness of agrophytocenoses]*. L'viv : Novyj Svit-2000 [in Ukrainian].
2. Elektrokul'tyvator [Electric cultivator]. (2010). *Patent № 46863*. Ukraina [in Ukrainian].
3. Elektrokul'tyvator universal'nyj [Universal electric cultivator]. (2019). *Patent № 134077*. Ukraina [in Ukrainian].
4. Tekhnika dlia sadu [Equipment for the garden]. Retrieved from : <https://storgom.ua/kultivatory/elektricheskiy-ukraina.html> [in Ukrainian].
5. Kul'tyvator akkumulyatornyj [Accumulator cultivator]. Retrieved from : <https://molotook.com.ua/ua/p1891325847-kultivator-akkumulyatornyj-ryobi.html> [in Ukrainian].
6. Akumulyatornyj ruchnyj kul'tyvator [Battery hand cultivator]. Retrieved from : <https://profitehnika.com.ua/ product/akumulyatornyj-ruchnyj-kultyvator-ryobi-ry18hca-0-one-5133005766/> [in Ukrainian].
7. Motokul'tyvator [Motor cultivator]. Retrieved from : <https://megatool.com.ua/cherkassy/higher-hp-32525/> [in Ukrainian].
8. Vojtiuk, D.H. et al. (2004). *Sil's'kohospodars'ki ta melioratyvni mashyny [Agricultural and reclamation machines]*. K. : Vyscha osvita [in Ukrainian].
9. Trybel', S. O. (2010). Ekolohizatsiia zakhystu roslyn (Literaturnyj ohliad) [Greening of plant protection (Literature review)]. *Karantyn i zakhyst roslyn – Quarantine and plant protection*, 5, 16-20 [in Ukrainian].
10. Vetokhin, V. et al. (2020). Ohliad rozvytku zasobiv dlia oriantatsii prosapnykh znariad' vzdovzh riadkiv, zokrema u vyroschuvanni tsukrovyykh buriakiv [Review of the development of tools for the orientation of row-row implements along the rows, in particular in the cultivation of sugar beets]. *Tekhniko-tehnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnolohij dlia sil's'koho gospodarstva Ukrainy – Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine*, 26 (40), 30-46 Retrieved from :: [http://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk\\_2020\\_2.html](http://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk_2020_2.html) [in Ukrainian].

11. Solokha, M. (2016). Avtomatychnе керування kul'tyvatoramy dlia mizhriadnoho obrobіtku gruntu prosapnykh kul'tur [Automatic control of cultivators for inter-row soil cultivation of row crops]. *Propozytіia – Offer*, 12, 162-165 Retrieved from : <https://propozitsiya.com/ua/avtomatychnе-keruvannya-kul'tyvatoramy-dlya-mizhryadnogo-obrobіtku-gruntu-prosapnyh> [in Ukrainian].

**Tumofii Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Amosov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

**Yuriy Kulyeshkov**, Prof., DSc., **Ivan Rudenko**, student

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Electric hoe - cultivator "Mriya"**

In this article, we propose the design of a universal electric hoe - a cultivator with a balancing drive wheel for inter-row cultivation of row crops. Currently, chemical methods and mechanical loosening are widespread in modern agriculture, but concerns about the use of herbicides, especially in "organic farming," leave no choice.

We propose a machine that allows for inter-row cultivation of any row crops, even by a child.

The proposed device is to be equipped with an electric motor with an electric battery, which will allow for greater mobility, low noise and vibration levels, as well as a set of tools to perform all technological operations when growing row crops.

Ninety percent of manual labor in the cultivation of garden crops is spent on sowing and subsequent cultivation of row spacing. Therefore, the device must have a certain set of tools, such as a "hiller paw" for cutting furrows and hilling; a "one-sided paw" for removing weeds from the row spacing; a "lancet paw" for deep loosening and crust destruction.

As can be seen from the above, manual weeding is the most effective method of weed control for working on a personal plot. However, due to the high labor intensity of the work, the task of creating a device for processing both inter-row and intra-row weeding is now being addressed. Field tests have shown that this device performs all the tasks in full, and the battery capacity, subject to continuous processing, is enough for 400 m<sup>2</sup>. The next step in improving the functional characteristics of the proposed design is to equip the electric chopper-cultivator with a device for inter-row cultivation.

Inter-row cultivation is a method of weed control that involves removing weeds from the internal space between plants in one row. This process can be an important step in crop care and is aimed at reducing competition between weeds and crops. It is important to perform inter-row weeding in a timely manner, especially in the early stages of crop growth when weeds are just beginning to gain weight. It is economically feasible for the operator to control the machine manually. After a short practice, the control accuracy can reach several centimeters.

**hand-held electric cultivator, inter-row and intra-row cultivation, electric hoe, drive wheel, electric motor**

*Одержано (Received) 29.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 15.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.118-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.118-126)

Л.А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук

*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*

В.В. Халявка, зам. директора Черкаського НДЕКЦ МВС України, Я.С Коломієць, гол. суд. експерт відділу криміналістичного досл. та дублювання ідентиф. номерів трансп. засобів Черкаського НДЕКЦ МВС України

*Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України  
м. Черкаси, Україна*

*e-mail: tarandushkal@ukr.net; 24\_itevkt@ukr.net; yarik982@gmail.com*

### Оптимізація процесу виконання експертного дослідження транспортних засобів на основі моніторингу основних показників

Під час дослідження якості роботи експертних пунктів щодо комплексного дослідження транспортних засобів, було виявлено основну групу параметрів, що відображають організаційну структуру експертних установ та розроблено алгоритм їх моніторингу. В результаті проведення аналізу функціонування експертної служби з дослідження транспортних засобів за запропонованим алгоритмом стає можливим виявити недоліки організації даного роду підприємства, в результаті вдосконалення яких можна підвищити ефективність його функціонування.

**параметри, організаційна структура підприємства, експертна установа**

**Постановка проблеми.** При сучасних умовах між надавачами послуг та їх споживачами створюються певні конфлікти в наданні якісного та швидкого обслуговування. Тому головним завданням працівників експертної служби є дотримання певних норм та контролю якості експертного дослідження автомобілів.

Сучасні процеси оцінювання якості, які застосовуються для проведення експертного дослідження транспортних засобів більше не можуть бути використані в експертних установах, оскільки не враховують чинник розширення асортименту послуг та новітні характеристики транспортних засобів [1].

Якість одночасно залежить від технічних та економічних аспектів та від оптимального використання трудових і матеріальних ресурсів, що в свою чергу, обумовлено рівнем науково-технічного розвитку, доступністю технологій і ресурсів, а також станом довкілля.

Підвищення якості проведення комплексного дослідження транспортних приведе до підвищення ефективності функціонування експертних установ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз технологій виконання діагностики транспортних засобів показав, що науковці виділяють різні групи параметрів, які відповідають за технічний стан транспортних засобів. Даною тематикою займаються Лудченко О. А. [1], S.M.Khaksar [2], Velimirovic D. [3]. У їх дослідженнях було встановлено, що сертифікація послуг з технічного обслуговування автотранспорту є сучасним механізмом контролю за якістю виконання цих послуг, а відповідно і забезпеченням необхідного технічного стану транспортних засобів.

Сертифікація послуг з технічного обслуговування та ремонту автомобілів є

необхідною для отримання ліцензій з обслуговування певних транспортних засобів. Така оцінка відповідності послуг до необхідного рівня якості їх виконання не лише фіксує рівень діяльності підприємства, а й забезпечує ефективність його функціонування [4].

Але в наукових дослідженнях не було виявлено технології проведення експертизи транспортних засобів та формування показників, за якими можна було б формувати уявлення про ефективність функціонування експертних служб.

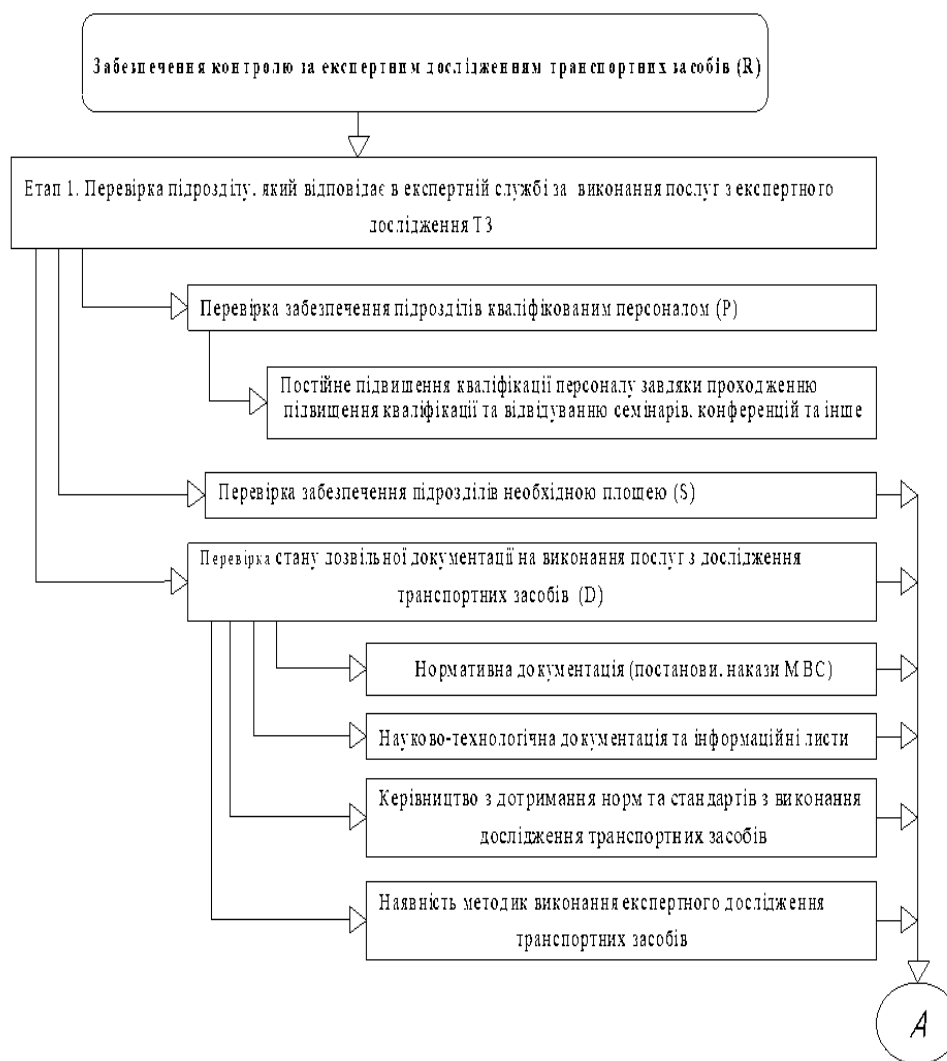
**Постановка завдання.** Метою цієї статті є розроблення алгоритму моніторингу показників якості проведення експертного дослідження транспортних засобів в експертних установах для забезпечення їх ефективного функціонування.

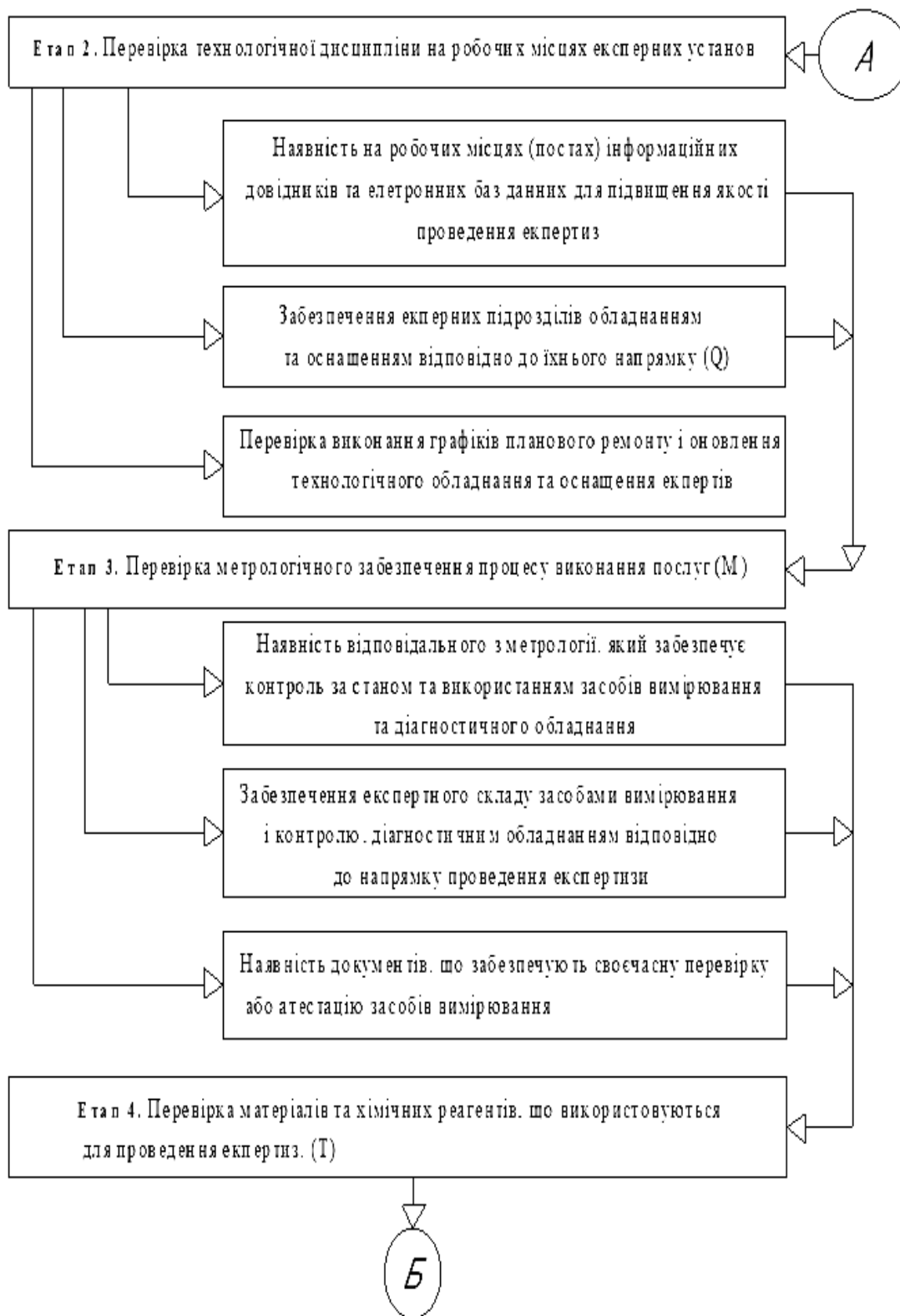
**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення якісного процесу оцінювання відповідності транспортного засобу необхідним нормам необхідно виділити основну групу параметрів, на основі аналізу яких буде можливим оцінити ефективність функціонування експертних служб загалом, а за потреби і підвищити її [5-6].

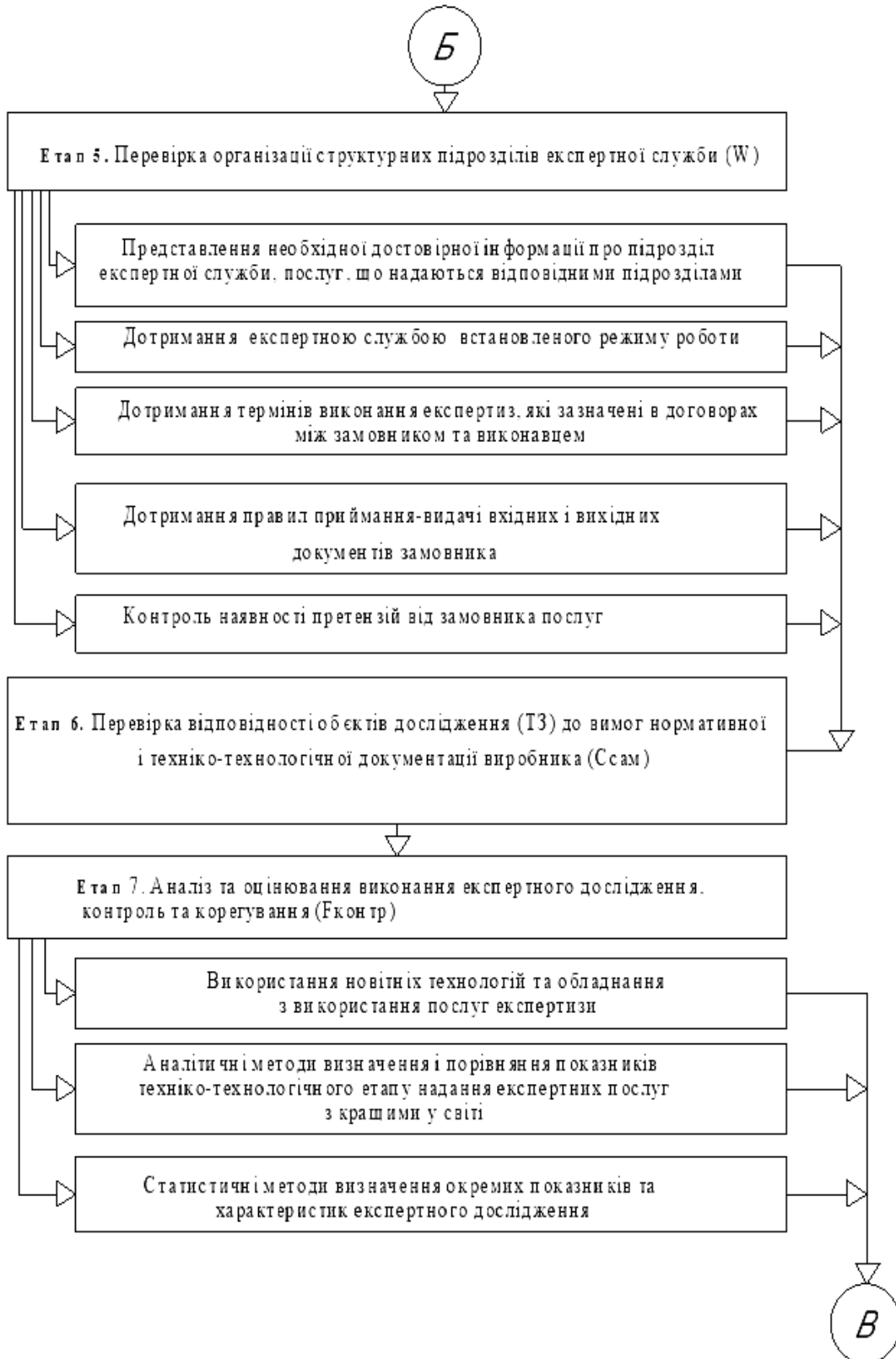
Метод визначення ефективності функціонування експертних служб базується на послідовному оцінюванні відповідності основних параметрів до нормативних. Основні параметри визначаються аналітично або статистично [7].

Окремі показники якості експертного дослідження впливають на результат технологічного процесу дослідження міри відповідності транспортного засобу необхідному рівню [8-10].

Розробка алгоритму виконання контролю за експертним дослідженням дозволяє вирішувати завдання підвищення ефективності функціонування експертних служб (рис. 1).







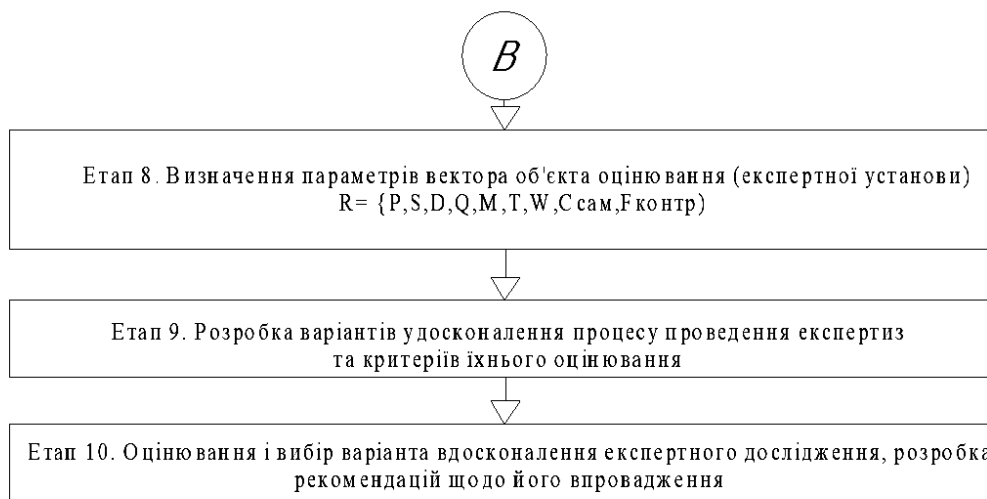


Рисунок 1 – Алгоритм виконання контролю за експертним дослідженням

Джерело: розроблено авторами

На основі аналізу та вимог системи технічного контролю підрозділів експертної служби, зроблено припущення про можливість представлення об'єкта дослідження (експертної установи) у вигляді наступного вектора  $R = \{P, S, D, Q, M, T, W, C_{\text{сам}}, F_{\text{контр}}\}$ .

Характеристиками експертної установи є забезпеченість підрозділів персоналом (P), необхідними площами (S), необхідними документами (D), обладнанням та оснащенням (Q), метрологічним обладнанням (M), матеріальними та хімічними ресурсами (T), повнота організації структурних підрозділів експертної служби (W), постійною самооцінкою виконаних послуг з експертного дослідження транспортних засобів ( $C_{\text{сам}}$ ) та корегуванням їх виконання, що відображає параметр якості виконання експертного дослідження ( $F_{\text{контр}}$ ).

Отже, результатом дослідження є система параметрів, послідовне оцінювання яких відповідно до розробленого алгоритму виконання контролю за експертним дослідженням дасть змогу оцінити ефективність функціонування експертної служби загалом.

Виявлено, що ця система параметрів відповідає критеріям необхідності та достатності для оцінки стану підприємства з експертного дослідження.

Був розроблений набір універсальних показників на основі технічного регулювання, які дозволяють оцінити стан експертної установи через проведення експертних досліджень. Підвищення якості робіт з комплексного дослідження транспортних засобів вимагає поліпшення організаційно-технічного забезпечення, включаючи показники стану будівель і споруд, а також техніко-технологічної документації ( $S, Q, P$ ).

Параметри  $S, Q, P$  можна виразити аналітично.

Параметр площі експертної установи (наявність площ і відповідність їх нормативу):

$$S = \frac{S_f}{S_n}, \quad (1)$$

де  $S_f$  та  $S_n$  - відповідно фактичні і нормативні площі експертної установи.

Параметр обладнання (наявність обладнання і відповідність його нормативу, наприклад, кількість фотоприладів):

$$Q = \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{н}}}, \quad (2)$$

де  $Q_{\text{ф}}$  та  $Q_{\text{н}}$  - відповідно фактична і нормативна кількість відповідного обладнання в експертній установі.

Параметр персоналу (чисельність експертів та їх розподіл за підрозділами):

$$P = \frac{P_{\text{ф}}}{P_{\text{н}}}, \quad (3)$$

де  $P_{\text{ф}}$  та  $P_{\text{н}}$  - відповідно фактична і нормативна чисельність експертів в експертній установі.

Зазвичай розраховані значення площі установ ( $S$ ), обладнання ( $Q$ ) і персоналу ( $P$ ) відповідають значенню в проміжку від 0 до 1.

Експертне дослідження транспортних засобів, можна представити як систему масового обслуговування, яка характеризується потоком транспортних засобів  $\lambda$  (інтенсивність вхідного потоку), що поступають на експертне дослідження та інтенсивністю проведення дослідження  $\mu$ . Ці характеристики можуть розглядатися для кожної окремої послуги –  $\lambda_j$   $\mu_j$ . Для інтенсивності проведення дослідження можна записати:

$$\mu_j = \frac{1}{t_j}, \quad \text{де } t_j = \frac{T_j}{P_j} + t_{\text{дод}}, \quad (4)$$

де  $t_j$  - середній час виконання  $j$ -го дослідження транспортного засобу;

$T_j$  - трудомісткість  $j$ -го дослідження, люд/год;

$P_j$  - число одночасно працюючих експертів над дослідженням  $j$ -ого транспортного засобу;

$t_{\text{дод}}$  - додатковий час, який включає в себе час огляду автомобіля, оформлення документів та інші етапи підготовки та завершення дослідження, може бути об'єднаний в загальну формулу до  $T_j$ , що спростить обчислення.

Звідси розрахункова кількість робочих постів для оптимального забезпечення потреб експертної установи становить:

$$n_j \geq \lambda_j / \mu_j = \lambda_j \cdot t_j, \quad (5)$$

Нормативи технологічного проектування експертних установ можуть бути застосовані для оцінки кількості персоналу  $P$ .

Можна розглядати середнє значення часу виконання  $j$ -го дослідження транспортного засобу (або трудомісткості дослідження транспортного засобу  $T_j$ ) як:

$$t_j = \sum_k t_{kj} + t_{\text{дод}}, \quad (6)$$

де  $t_{kj}$  - час виконання  $j$ -того дослідження із застосуванням  $k$ -ого устаткування;

$t_{j\text{інш}}$  - тривалість інших робіт, зазвичай пов'язаних з ручною працею із застосуванням простого устаткування і простих хімічних реактивів.

З цих передумов можна оцінити нормативні значення параметрів, що використовуються при виконанні експертного дослідження транспортного засобу. При виконанні експертних досліджень, необхідна кількість одночасно працюючих експертів складе:

$$P_n = \sum_j n_j \cdot P_j^{\text{н}}, \text{ осіб,} \quad (7)$$

де  $P_j^{\text{н}}$  - нормативна кількість експертів, які одночасно проводять дослідження під час виконання  $j$ -того дослідження. Згідно з нормативами технологічного проектування для установ з обслуговування транспортних засобів зазвичай приймається значення від 1 до 2 експертів.

Для формування показника  $Q_n$ , відповідно до затвердженого технологічного змісту експертного дослідження формується таблиця або матриця технологічного обладнання  $\|q_{kj}\|$ . У цій матриці значення  $q_{kj}$  можуть бути 0 або 1, в залежності від того, чи потрібне обладнання  $k$  під час проведення дослідження  $j$ .

Отже, для визначення необхідного обладнання з найменуванням  $k$  можна встановити відношення:

$$Q_n = \sum_j n_j q_{kj} \quad (8)$$

Значення  $Q_n$ , яке враховується під час дослідження, відображає кількість експертиз, в яких воно використовується. Для забезпечення мінімального складу обладнання можна встановити  $q_{k\text{мін}} = 1$ , що означає, наприклад, що один пристрій з найменуванням  $k$  використовується для різних досліджень на різних спеціалізованих напрямках.

Менеджмент експертної установи, розглядаючи (залежно від та інших чинників) питання про фактичну кількість устаткування ( $Q_n^{\text{ф}}$ ) зазвичай приймає в межах:

$$1 < Q_n^{\text{ф}} < Q_n. \quad (8)$$

Для визначення необхідної площі виробничих приміщень використовується формула:

$$S^{\text{н}} = \sum_j n_j S_{\text{ТЗ}} k_n + \sum_k k_{\text{об}} S_{\text{об}j} Q_n, \quad (9)$$

де  $S_{\text{ТЗ}}$  – площа найбільшого транспортного засобу в плані, якому проводиться експертне дослідження;

$k_n$  - коефіцієнт щільності розташування постів для проведення досліджень, ( $k_n = 5-7$  залежно від способів розташування постів);

$S_{\text{об}j}$  – площа в плані відповідного обладнання;

$k_{\text{об}}$  – коефіцієнт щільності розташування обладнання.

В результаті проведеного дослідження, було виявлено, що показник самооцінювання виконаних послуг з експертного дослідження транспортних засобів ( $C_{\text{сам}}$ ) відрізняється для експертних служб різних сервісних центрів. Наприклад, для регіональних сервісних центрів  $C_{\text{сам}} = 0,62$ , а для областних сервісних центрів  $C_{\text{сам}} =$

0,77. Приблизно 86% експертних установ мають показник самооцінювання в діапазоні від 0,7 до 0,8. Малий відсоток експертних установ у регіонах (приблизно 5,7%) мають показник самооцінювання від 0,5 до 0,7. Це свідчить про краще проведення самооцінювання менеджментом областних експертних установ, а відповідно і більшу ефективність їх функціонування.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження можна представити організаційну структуру експертної установи у вигляді вектора необхідних параметрів, які відображають ефективність її функціонування  $R = \{P, S, D, Q, M, T, W, C_{\text{світ}}, F_{\text{контр}}\}$ . За розробленим алгоритмом оцінювання кожного параметру даного вектора стає можливим підвищувати ефективність функціонування експертних установ з проведення експертних досліджень транспортних засобів. Це дає можливість вдосконалювати організаційно-технологічну структуру даного роду підприємств.

## Список літератури

1. Лудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів : підручник. К. : Знання-Прес, 2003. 511 с.
2. Khaksar S.M., Nawaser K., Jahanshahi A.F., Kamalian A. R.. The relation between after-sales services and entrepreneurial opportunities: Case study of Iran-Khodro Company. *African Journal of Business Management*. 2011. 5(13), 5152-5161. URL: <https://www.researchgate.net/publication/273003531> (дата звернення: 14.02.2024).
3. D. Velimirovic, C. Duboka, P. Damnjanovic. Automotive maintenance quality of service influencing factors. *Tehnicki Vjesnik*. 2016. 23, 1. 1431-1438 URL: <https://www.researchgate.net/publication/283665459> (дата звернення: 17.02.2024).
4. Тарандушка Л. А., Тарандушка І. П. Технологія моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. №1. С. 116–122.
5. Тарандушка Л.А., Тарандушка І.П., Одокієнко С.М. Розробка системи параметрів для оцінки якості процесів технічного обслуговування та ремонту автомобілів. *Міжнародний науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»*. 2016. №3. С. 52–56.
6. 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. №2/3 (104), P. 58-75. - URL:<https://journals.urau.ua/eejet/article/view/200332> (дата звернення: 17.02.2024).
7. Андрусенко С. І., Бугайчук О. С. Моделювання бізнес-процесів підприємства автосервісу : монографія. К : Кафедра, 2014. 328 с.
8. Vaffour-Awuah E. Service Quality in the Motor Vehicle Maintenance and Repair Industry: A Documentary Review. *International Journal of Engineering and Modern Technology*. 2018. №4(1), P. 14-34. Режим доступу до ресурсу: [www.iiardpub.org](http://www.iiardpub.org) (дата звернення: 17.02.2024).
9. Кахович Ю. О., Янко К. С. Контроль якості продукції підприємства в умовах сучасної економіки. *Науковий вісник НГУ*. 2011. №1. С. 123–127.
10. Білецький Е. В., Янушкевич Д.А., Шайхлісламов З. Р. Управління якістю продукції та послуг. Харків : КНТЕУ- ХТЕІ, 2015. 222 с.

## References

1. Ludchenko, O. A. (2003) *Tekhnichne obsluhovuvannia i remont avtomobiliv [Maintenance and repair of cars]*. K. : Znannia-Pres [in Ukrainian].
2. Khaksar, S.M., Nawaser, K., Jahanshahi, A.F. & Kamalian A. R. (2011). The relation between after-sales services and entrepreneurial opportunities: Case study of Iran-Khodro Company. *African Journal of Business Management*, 5(13), 5152-5161. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/273003531> [in English].
3. Velimirovic, D., Duboka, C. & Damnjanovic P. (2016). Automotive maintenance quality of service influencing factors. *Tehnicki Vjesnik*, 23, 1, Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/283665459> [in English].
4. Tarandushka, L. A. & Tarandushka, I. P. (2014). *Tekhnolohiia monitorynhu pokaznykiv iakosti*

- tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu avtomobiliv [Technology for monitoring quality indicators of car maintenance and repair.]. *Visnyk Chernihiv's'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Bulletin of the Chernihiv State University of Technology. Series "Technical Sciences", 1, 116-122* [in Ukrainian].
5. Tarandushka, L.A., Tarandushka, I.P. & Odokiienko, S.M. (2016). Rozrobka systemy parametriv dlia otsinky yakosti protsesiv tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu avtomobiliv [Development of a system of parameters for evaluating the quality of car maintenance and repair processes]. *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal «Tekhnolohichnyj audyt ta rezervy vyrobnytstva» – International Scientific Journal "Technological Audit and Production Reserves", 3, 52-56* [in Ukrainian].
  6. 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 (104), 58-75*. Retrieved from <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/200332> [in English].
  7. Andrusenko, S. I. & Buhajchuk, O. S. (2014). *Modeliuvannya biznes-protsesiv pidpriemstva avtoservisu [Modeling business processes of a car service enterprise]*. K : Kafedra [in Ukrainian].
  8. Baffour-Awuah, E. (2018). Service Quality in the Motor Vehicle Maintenance and Repair Industry: A Documentary Review. *International Journal of Engineering and Modern Technology, 4(1), 14-34*. Retrieved from [www.iiardpub.org](http://www.iiardpub.org) [in English].
  9. Kakhovych, Yu. O. & Yanko, K. S. (2011). Kontrol' yakosti produktsii pidpriemstva v umovakh suchasnoi ekonomiky [Quality control of the company's products in the conditions of the modern economy]. *Naukovyj visnyk NHU – Scientific Bulletin of NSU, 1, 123–127* [in Ukrainian].
  10. Bilets'kyj, E. V., Yanushkevych, D.A. & Shajkhlislamov, Z. R. (2015). *Upravlinnia yakistiu produktsii ta posluh [Quality management of products and services]*. Kharkiv : KNTEU- KhTEI [in Ukrainian].

**Liudmyla Tarandushka**, Prof., DSc.

*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

**Viktor Khaliavka**, Head of the Cherkasy scientific and research expert forensic center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, **Yaroslav Kolomiets**, Chief forensic expert of the Department of forensic investigation and duplication of identification numbers of vehicles of the Cherkasy scientific and research expert forensic center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine

*Cherkasy scientific and research expert forensic center of MIA of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

### **Optimization of process performing an expert study of vehicles on the basis of monitoring the main indicators**

After the study of the expert points quality work regarding the comprehensive research of vehicles, the main group of parameters which reflect the organizational structure of expert institutions was identified and an algorithm for their monitoring was developed.

The parameters of an expert institution are the provision of divisions with personnel (**P**), necessary areas (**S**), necessary documents (**D**), equipment and supplies (**Q**), metrological equipment (**M**), material and chemical resources (**T**), completeness of the organization of structural divisions of the expert service (**W**), constant self-assessment of the performed services for the expert examination of vehicles (**C<sub>exp</sub>**) and adjustment of their performance, which reflects the parameter of the quality of the expert examination (**T<sub>контр</sub>**).

As a result of conducting an analysis of expert vehicle research service functioning according to the proposed algorithm, it becomes possible to identify the shortcomings of the organization of this type of enterprise, as a result of which improvements can be made to increase the efficiency of its functioning. Therefore, the result of the investigation is a system of parameters, the consistent evaluation of which in accordance with the developed algorithm for the implementation of control over expert research will make it possible to assess the effectiveness of the expert service functioning in general.

It was found that this system of parameters meets the criteria of necessity and sufficiency for assessing the state of the enterprise from expert research.

A set of universal indicators based on technical regulation was developed, which allow to assess the state of the expert institution through the conduct of expert studies.

The proposed method of evaluating expert institutes provides an opportunity to improve the organizational and technological structure of this type of enterprises.

**parameters, organizational structure of the enterprise, expert institution**

*Одержано (Received) 18.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 16.02.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

**О.В. Іванкова**, доц., канд. техн. наук, **О.А. Бурлака**, доц., канд. техн. наук  
*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна*  
*e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua, oleksii.burlaka@pdau.edu.ua*

## Дослідження відновлення корпусних деталей автомобільних двигунів методом електродугової металізації

Проведено оцінку повторюваності дефектів блоків циліндрів вантажних автомобілів, для чого проаналізована вибірка з 20 автомобілів. Встановлено які дефекти чинять найбільший вплив на ресурс блок-картера. Було визначено число дефектів блоків автомобільних двигунів, які можливо відновити електродуговою металізацією, воно склало 35,75%. Проведені лабораторні експерименти з нанесення електрометалізаційного покриття на зразки з високоміцного чавуну. Підготовча обробка досліджуваних зразків полягала в дробоструминній обробці механічною сумішшю чавунного дробу і кварцового піску під тиском  $0,5 \pm 0,05$  МПа з дистанцією 130-150 мм. Досліди по напиленню зразків були проведені відомими порошковими дротами ПГ-СР4 та ПГ-СР4+3%A1 діаметром 2,0 мм.

Досліди показали що для наплавлення наших зразків високоміцного чавуну найбільш підходящим з існуючих є дріт ПГ-СР43+3%A1. Випробування на міцність зчеплення покриття з основним металом проводили клейовим способом. Встановлено, що міцність зчеплення покриття ПГ-СР4+3%A1 складає 154 МПа. Здійснено вимірювання мікротвердості відновленої поверхні. Значення знижуються по відстані від поверхні.

**автомобіль, блок циліндрів, дефекти, електродугова металізація, міцність зчеплення, мікротвердість**

**Постанова проблеми.** Автомобільний транспорт - одна з важливих галузей, невід'ємна частина агропромислового виробництва. В сучасних умовах розвиток господарств неможливий без транспортного забезпечення. Від чіткості та надійності експлуатації автомобілів багато в чому залежать успіх діяльності сільськогосподарських підприємств. Він забезпечує раціональну організацію виробництва та транспортування продукції промисловості і сільського господарства [1].

Затрати на забезпечення роботоздатності автомобілів за весь термін експлуатації перевищують витрати на їх виготовлення. Значна частка затрат і простоїв в ремонті припадає на двигун (до 30%) [4, 5].

Двигуни внутрішнього згоряння складаються з багатьох окремих частин, проте, однією з найбільших, відповідальних та, зазвичай, наймасивнішою частиною є блок циліндрів. Він складається з циліндрів, розташованих в певному порядку. Блоки циліндрів розрізняються розміщенням циліндрів, типом охолодження та типом матеріалу [2, 3]. Блок циліндрів є базисною деталлю, яка служить для монтажу всіх механізмів і деталей двигуна.

В результаті експлуатації автомобіля, через певний час, впродовж якого відбуваються зношування та природне старіння блоку, первинні розміри його елементів змінюються [2, 4].

Умови використання блок-картерів двигунів характеризуються високими навантаженнями через дію сил інерції і тиску газів в циліндрах, підвищеними температурами і значними термічними напруженнями. У результаті чого виникають і розвиваються дефекти, усунути які можливо тільки при проведенні капітального ремонту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні технології, що сьогодні застосовуються у світовій практиці: електродугове наплавлення; плазмове напилення з використанням плазмоутворюючих газів: аргону, азоту, гелію, повітря; високошвидкісне напилення, газополуменеве і детонаційне напилення, електроіскрова обробка, а також електродугова металізація. Газотермічні методи покриття використовуються в процесі ремонту обладнання та при зміцненні нових деталей.

Аналіз літературних джерел показує, що методи наплавлення та зварювання, крім того, що здорожують відновлення, ще не завжди забезпечують відповідність характеристик якості відновленої деталі технічним вимогам [4, 5]. Тобто, використання традиційних методів наплавлення і зварювання характерне значним збільшенням собівартості ремонту і, внаслідок змін властивостей матеріалу внаслідок дії високих температур, не забезпечує необхідних якісних характеристик відремонтованої поверхні.

З метою підвищення якості відновлених поверхонь часто застосовують газотермічні методи нарощування зношених поверхонь, електроіскрове нарощування та інші методи [5, 6, 7].

Суть усіх газотермічних методів полягає у тому, що потік дисперсних крапель наплавлюваного матеріалу спрямовується на поверхню деталі. Основна відмінність від традиційних методів наплавлення - практично відсутня зона термічного впливу на поверхню деталі. Також важливим є можливість формувати покриття із будь-якими заданими властивостями. [8]. Принципова суть різновидів газотермічних методів нанесення покриттів відрізняється видом джерела енергії [9].

Газотермічні методи нанесення покриттів поділяють на газові: газополуменевий, детонаційно-газовий та газоелектричні: електродуговий, плазмово-дуговий, високочастотний [8]. Найбільшою технологічністю та досить високою економічною ефективністю характеризується електродугова металізація (електродугове напилення). [9, 10]. Важливою перевагою технології також є те, що температура поверхні оброблюваної деталі під час нарощування залишається низькою (970-100°C). Отже, деформації у виробі не відбувається, структура металу не змінюється.

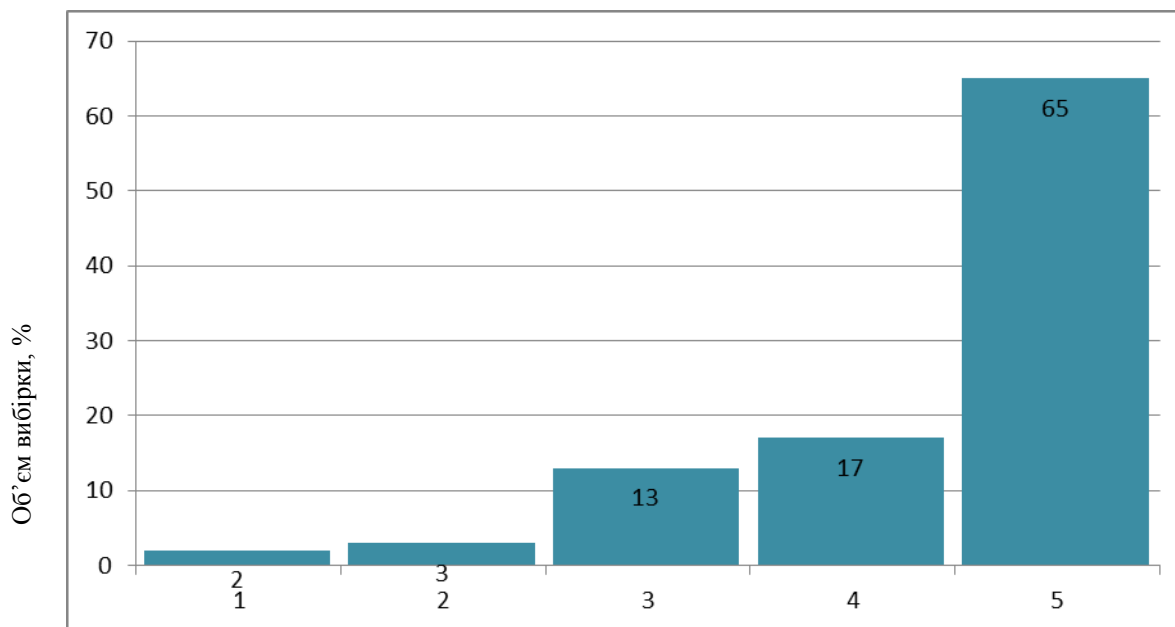
Електродуговим напиленням можливо наносити різні покриття на поверхню деталі. Продуктивність процесу електродугової металізації може бути дуже високою, тобто, стальне покриття можна наносити з продуктивністю до 36 кг/год. [8, 10]. Експлуатаційні затрати застосування електрометалізації невеликі. Обладнання для електродугового напилення, є порівняно простим, його можна швидко переміщати. Технологічний процес гарно піддається автоматизації. Для електродугового напилення можна застосовувати метали та сплави, а також їх суміші. Є технологічна можливість нанесення декількох шарів покриття, що дозволяє отримувати покриття із специфічними характеристиками [11]. Отже, відновлення дороговартісних зношених автомобільних деталей дозволяє досягти економічної ефективності.

Відновлення зношених поверхонь корпусних деталей електродуговою металізацією підвищує зносостійкість та довговічність двигуна.

**Постановка завдання.** Провести дослідження відновлення зношених поверхонь блоку циліндрів автомобільних двигунів електродуговою металізацією. Для цього: встановити зноси та дефекти, які можливо усунути нанесенням шару металу методом електродугової металізації; підібрати оптимальний матеріал для нанесення (порошковий дріт); розглянути вплив параметрів обробки на якісні показники оброблених поверхонь.

Основні параметри якості покриття: товщина та хімічний склад нарощеного шару, щільність і міцність зчеплення покриття з основою.

**Виклад основного матеріалу.** Для оцінки повторюваності дефектів блок-картерів нами була проаналізована вибірка з 20 блоків циліндрів вантажних автомобілів різних виробників (в тому числі і закордонних), які надійшли в капітальний ремонт на ТОВ «Авто-Моторна Компанія» (м. Полтава).



1 – раковини на нижньому посадочному пояску під гільзу від кавітації, змінання та деформація пояска; 2 – знос торцевої поверхні гнізда під бурт гільзи; 3 – пошкодження різьби шпильок і отворів, обриви шпильок; 4 – пробоїни, тріщини у блоці; 5 – ушкодження, знос, неспіввісність ліжок корінних підшипників

Рисунок 1 – Повторюваність дефектів блок-картерів

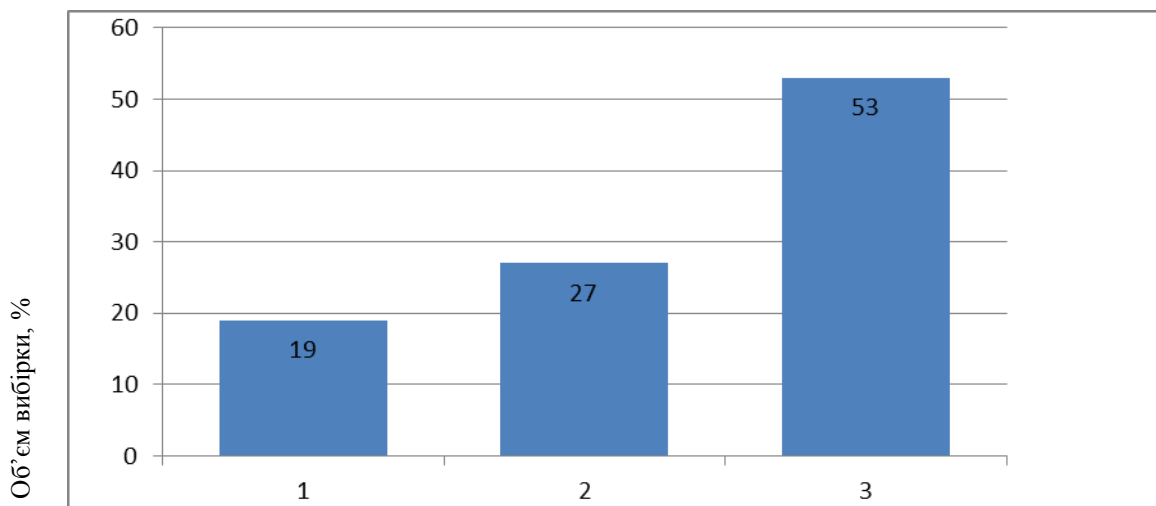
*Джерело: розроблено авторами*

Нами було встановлено, що ресурс блок-картера найбільше залежить від зносу, пошкоджень та неспіввісності ліжок корінних підшипників (5); пробоїн і тріщин (4), а також від ушкоджень різьби і обриву шпильок і отворів (3). Загальний обсяг дефектів дослідженої вибірки складає 95%.

Серед дефектів, що входять до останньої групи і мають найбільший вплив на зниження ресурсу деталі можна виділити наступні (рис. 2): неспіввісність опор під вкладиші корінних підшипників (19%), усувається розточуванням; ушкодження гнізда корінного підшипника, відновлення можливе нанесенням електрометалізаційного покриття (27%); знос, овальність і конусність поверхонь під вкладиші корінних підшипників (53%), частково також можливе усунення електродуговою металізацією (до 15%).

Відновлення дефектів перших трьох груп (рис. 1): корозію і зношені посадочні місця під нижній поясок гільзи циліндрів традиційно відновлюють механічною обробкою, а потім установлюють ущільнюючі кільця. Шпильки з пошкодженою різьбою – замінюють новими. Пошкодженні різьби шпильок та різьбових отворів – встановленням спеціальних різьбових спіральних вставок [9]. Статистичну обробку результатів мікрометричних вимірювань робили за відомою методикою.

Розрахунок кількості блоків, які потребують відновлення поверхонь нанесенням металопокриття, проводили по найбільш зношеній поверхні під вкладиші кожного блоку шляхом статистичної обробки результатів мікрометричних вимірів.



1 – неспіввісність опор під вкладиші; 2 – пошкодження гнізда;  
3 – знос, овальність і конусність поверхонь під вкладиш

Рисунок 2 – Діаграма повторюваності дефектів ліжок корінних підшипників

*Джерело: розроблено авторами*

Тріщини та пробоїни стінок водяної сорочки та нижньої частини блоку ремонтують переважно епоксидними композиціями і накладеними латками. Це не завжди забезпечує достатній рівень якості відновлення. Ремонт тріщин, які виходять на робочі поверхні не виконується [4].

Наплавлення та зварювання при відновленні дефектів блок-картера, не завжди приводить до досягнення потрібних властивостей деталі. Так як дія високих температур в зоні наплавлення на метал спричиняє утворення високих внутрішніх напружень в результаті перекристалізації металу з утворенням крихкої і твердої і структури. Щоб знизити ці негативні явища доводиться використовувати дорогі зварювальні матеріали, або спеціальне термічне обладнання [5].

Усунення пробоїн та тріщин стінок водяної сорочки, зносів посадочних отворів під підшипники, пошкоджень привалочних площин блоків, по причині високої собівартості виявляється малоефективним.

Прагнення понизити негативний вплив високих температур в зоні зварювання на метал змушує нас дослідити можливість застосування газотермічних методів, зокрема електродугової металізації для відновлення зношених та пошкоджених поверхонь блоків.

Для проведення лабораторних експериментів з нанесення електрометалізаційного покриття застосували зразки з високоміцного чавуну. Вирізку зразків робили тонкими відрізними кругами із значним охолодженням. Перед проведенням металізації їх відпалювали протягом 1-1,5 год. для зняття внутрішніх напружень та стабілізації структури.

Підготовча обробка досліджуваних зразків полягала в дробоструминній обробці механічною сумішшю чавунного дробу і кварцового піску під тиском  $0,5 \pm 0,05$  МПа з дистанцією 130-150 мм. Кут нахилу падіння суміші до поверхні зразків - від  $55^\circ$  до  $70^\circ$ . Така попередня обробка забезпечує межу витривалості 324 МПа і міцність зчеплення покриття з основою - 104 МПа [9]. Найбільший вплив на міцність з'єднання покриття з основним металом чинять залишкові напруги. Високі значення їх спричиняють відшарування або тріщини в покриттях.

З'єднання напиленого шару з основою відбувається в основному в результаті механічного зчеплення розпилених часток дроту з нерівностями (шорсткостями) поверхні дослідних зразків, оскільки шорстка поверхня має більшу площу в порівнянні з гладкою. При цьому напилений шар отримує розтягуючі напруження. Але, через те, що шорстка поверхня поглинає розтягуючі напруження напиленого шару, тріщини утворюються дуже рідко.

Досліди по напиленню зразків були проведені відомими порошковими дротами ПГ-СР4 та ПГ-СР4+3% Al діаметром 2,0 мм [12].

Експериментальне електрометалізаційне напилення здійснювали на електродуговому металізаторі ЕМ-17. Були прийняті параметри режиму напилення: значення напруги дуги: 30-35 В, тиск повітря становив: 0,6-0,7 МПа, швидкість подачі електродного дроту: 2,0-2,5 м/хв., дистанція від поверхні оброблюваного зразка: 170-190 мм. Нагрівання підшарку було не вище 90°C. Покриття зразків формувалось за 6 проходів через певні інтервали часу, протягом яких температура основи знижувалась до 30°C. [13, 15].

Випробування на міцність зчеплення покриття з основним металом проводили з використанням клейового способу. Торцеву поверхню циліндричного зразка основного металу обробили дробоструминною обробкою для додання шорсткості, а потім нанесли на неї покриття дротами ПГ-СР4 та ПГ-СР4+3%A1. До поверхні покриття приклеювали циліндричний зразок такого ж діаметру. Міцність зчеплення визначали як частку руйнівного навантаження на площу торцевої поверхні [14].

Результати випробувань представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати випробувань напилених матеріалів

Матеріал покриття	Товщина покриття $\delta$ , мм	Площа покриття $F$ , см <sup>2</sup>	Руйнівне навантаження $P$ , кН	Міцність зчеплення $\sigma$ , Мпа	Примітка
(основа) + ПГ-СР4	1,6	4,80	6,4	13,3	руйнування по покриттю
(основа) + ПГ-СР4+3%A1	1,4	4,80	11,0	22,9	руйнування по з'єднанню

*Джерело: розроблено авторами*

З результатів досліджень ми бачимо, що електрометалізаційне покриття, нанесене дротом ПГ-СР4+3%A1 руйнується по з'єднанню при навантаженні вищому, ніж з'єднання, утворене дротом ПГ-СР4. При цьому Міцність зчеплення також перевищує, і складає 22,9 МПа.

Мікротвердість нарощеного шару на поверхню дослідних зразків вимірювали за допомогою мікротвердоміра ПМТ – 3 [14].

По результатах вимірювань мікротвердості по глибині нарощеного шару ми побудували діаграму (рис.3). Бачимо, мікротвердість покриття, нарощеного порошковим дротом ПГ-СР4+3%A1 перевищує рівень мікротвердості нарощено поверхні дротом ПГ-СР4. Мікротвердість в обох випадках. знижується по відстані від поверхні напиленого шару.

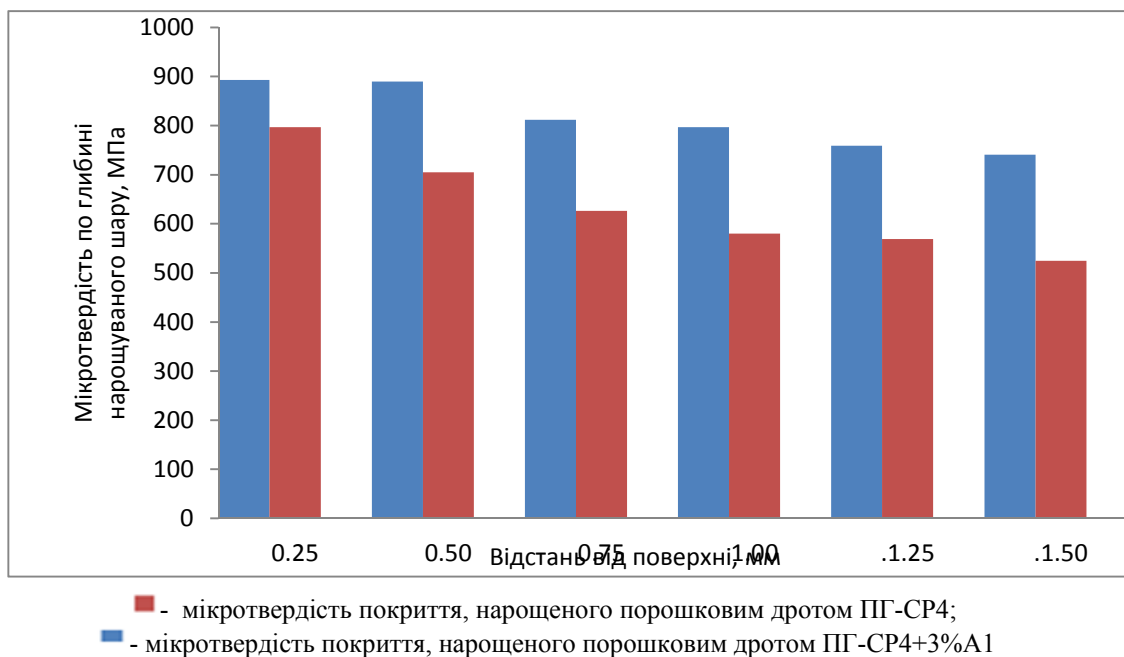


Рисунок 3 – Графік розподілу значень мікротвердості нанесеного покриття по відстані від поверхні зразка  
Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** Вдосконалення методів відновлення зношених блоків циліндрів автомобільних двигунів є актуальним завданням.

1. Проведена оцінка повторюваності дефектів блок-картерів вибірки блоків циліндрів вантажних автомобілів різних виробників. Встановлено, що ресурс блок-картера найбільше залежить від зносу, пошкоджень та неспіввідності ліжок корінних підшипників; пробоїн і тріщин, а також від ушкоджень різьби і обриву шпильок і отворів. Розглянуто можливість відновлення деталей з такими дефектами газотермічними методами. Загальний рівень дефектів, усунути які можливо нанесенням відновного покриття способом електродугової металізації складає 37%.

2. Лабораторні експерименти здійснили на зразках з високоміцного чавуну, напиленіх порошковими дротами ПГ-СР4 та ПГ-СР4+3%A1 на електрометалізаційним апаратом ЕМ-17.

3. Випробування на міцність зчеплення покриття з основним металом провели з використанням клейового способу. Покриття, нанесене дротом ПГ-СР4+3%A1 руйнується по з'єднанню при навантаженні вищому, ніж з'єднання, утворене дротом ПГ-СР4. Рівень міцності зчеплення напиленого шару перевищує потрібний [10] і складає 22,9 МПа.

4. Досліди підтвердили, що мікротвердість покриття, наросшеного порошковим дротом ПГ-СР4+3%A1 вище, ніж шару ПГ-СР4; мікротвердість знижується по відстані від поверхні напиленого шару.

З проведених досліджень випливає, що електродугове відновлення не чинить термічного впливу на деталь, забезпечує високу міцність зчеплення нанесеного шару, чим переважає більшість традиційних методів відновлення деталей. Крім того, методу електродугової металізації притаманні низька енергоємність, малогабаритне і мобільне технологічне обладнання.

Отже, є необхідність продовжувати дослідження електродугової металізації при відновленні зношених поверхонь деталей автомобілів.

## Список літератури

1. Автомобільний транспорт України: стан та перспективи розвитку/ О.В. Швед та ін. Київ: НТУУ КПІ, 2016. 324 с.
2. Двигуни внутрішнього згоряння: у 6 томах. Т.6. Надійність ДВЗ. / за ред. проф. А.П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова. Харків: Видавн. центр НТУ ХПІ, 2004. 500с.
3. Двигун DAF XF105 з 2006 р. Загальна інформація. *Монолит.укр*: веб-сайт. URL: <https://monolith.in.ua/dvigatel-daf-xf105/> (дата звернення: 04/02/2024).
4. Коваленко В. М., Щуріхін В. К. Діагностика і технологія ремонту автомобілів: підручник. Київ : Літера ЛТД, 2017. 224 с.
5. Надійність машин та обладнання. Ч. 2. Ремонтвання машин та відновлення деталей: навч. посіб. / З. В. Ружилю та ін. Київ : НУБіП України, 2023. 309 с.
6. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. / Іванкова О.В. та ін. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 283–292. doi: 10.31210/visnyk2020.04.36
7. Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies /Anatolii Dudnikov et al. *Eastern-European journal of enterprisetechnologies*. 2021. 2/1 (110). P. 104-108. doi: 10.15587/1729-4061.2021.228606
8. Шиліна О.П., Осадчук А.Ю. Газотермічні методи напилювання покриттів: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2006. 103 с.
9. Лузан С.О., Сідашенко О.І., Лузан А.С. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей : курс лекцій. Харків: Діса плюс, 2020. 127 с.
10. Електродугові відновні та захисні покриття. / В.І. Похмурський та ін. Львів, НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. 2005. 192 с.
11. Our technologies to best serve you. *Eutectic Castolin* URL: <https://www.castolin.com>. (date of access: 10/02/2024).
12. Іванкова О.В., Федоряка В.І. Використання електродугової металізації при ремонті корпусних деталей машин. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2013. №17. С. 275-280
13. V. Pokhmurskii, M. Student, V.Gozdecki, B. Wielage, H. Pokhmurska: Zmiana naprężeń szczątkowych w powłokachnatryskiwanych lukowo poddanych utlenianiu wysokotemperaturowemu, *Inżynieria Powierzchni*, 2011, N. 4, S. 32-37.
14. Холявко В.В., Владимірський І.А., Жабинська О.О. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 156 с.
15. Агеев М.С., Головащук М.В. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. Технічні науки. 2019. №3(273). С. 240 – 248.

## References

1. Shved, O.V., et al. (2016). *Avtomobil'nyj transport Ukrainy: stan ta perspektyvy rozvytku [Road transport of Ukraine: state and development prospects]*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].
2. Marchenko, A.P. & Shekhovtsov, A.F. (Eds). (2004). *Dvyhuny vnutrishn'oho zghoriannia. Nadijnist' DVZ [Internal combustion engines: Reliability of internal combustion engines]* (Vols. 1-6; Vol. 6). Kharkiv: Vydavn. tsentr NTU KhPI [in Ukrainian].
3. Dvyhun DAF XF105 z 2006 r. Zahal'na informatsiia. Monolyt.ukr: veb-sajt [DAF XF105 engine from 2006. General information. Monolyt.ukr: website]. Retrieved from: <https://monolith.in.ua/dvigatel-daf-xf105/> [in Ukrainian].
4. Kovalenko, V. M. & Shchurikhin, V. K. (2017). *Diahnostyka i tekhnolohiia remontu avtomobiliv [Diagnostics and technology of car repair]*. Kyiv : Litera LTD [in Ukrainian].
5. Ruzhylo, Z. V. et al. (2023). *Nadijnist' mashyn ta obladnannya. Remontuvannya mashyn ta vidnovlennya detaley [Reliability of machines and equipment. Repair of machines and restoration of parts]* (Part 2). Kyiv : NUBiP Ukraine [in Ukrainian].
6. Ivankova, O.V. et al. (2020). *Doslidzhennia metodiv vidnovlennia znoshenykh detalej sil'skohospodars'koi tekhniki [Research of methods of restoration of worn parts of agricultural machinery]*. *Visnyk PDAA – PDAA Bulletin*, 4, 283-292 [in Ukrainian].
7. Dudnikov, A. et al. (2021). Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2/1 (110). P. 104-108 [in English].
8. Shylina, O.P. & Osadchuk, A. Yu. (2006). *Hazotermichni metody napyliuvannya pokryt' [Gas-thermal coating spraying methods]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].

9. Luzan, S.O., Sidashenko, O.I. & Luzan, A.S. (2020). Obgruntuvannia ta vdoskonalennia tekhnolohij vidnovlennia detalej [Justification and improvement of technologies for restoration of parts]. Kharkiv: Disa plius [in Ukrainian].
10. Pokhmurs'kyj, V.I. et al. (2005). *Elektroduhovi vidnovni ta zakhysni pokryttia [Electric arc restoration and protective coatings]*. L'viv, NAN Ukrainy, Fyzyko-mekhanichnyj instytut im. H.V. Karpenka [in Ukrainian].
11. Our technologies to best serve you. *Eutectic Castolin* URL: <https://www.castolin.com>. (date of access: 10/02/2024) [in English].
12. Ivankova, O.V. & Fedoriaka, V.I. (2015). Vykorystannia elektroduhovoї metalizatsii pry remonti korpusnykh detalej mashyn [The use of electric arc metallization in the repair of body parts of machines]. *Visnyk L'vivs'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu. Ahroinzhenerni doslidzhennia – Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Agricultural engineering research*, 17, 275-280 [in Ukrainian].
13. V. Pokhmurskii, M. Student, V.Gozdecki, B. Wielage & H. Pokhmurska (2011). Zmiana naprężen szcążkowych w powłokachnatryskiwanym lukowo poddanych utlenianiu wysokotemperaturowemu, *Inżynieria Powierzchni*, N. 4, S. 32-37 [in Polish].
14. Kholiavko, V.V., Vladymyrs'kyj, I.A. & Zhabyns'ka, O.O. (2016). *Fyzychni vlastyivosti ta metody doslidzhennia materialiv [Physical properties and methods of materials research]*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].
15. Ahieiev, M.S. & Holovaschuk, M.V. (2019). Pidvyschennia ekspluatatsijnykh vlastyivostej detalej zasobiv transportu shliakhom keruvannia faktoramy protsesu elektroduhovoho napylenia bahatofunktsional'nykh pokryttiv [Improving the operational properties of parts of means of transport by controlling the factors of the process of electric arc spraying of multifunctional coatings]. *Naukovyj zhurnal «Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu». Tekhnichni nauky – Scientific journal "Bulletin of Khmelnytskyi National University". Technical sciences*, 3(273), 240 – 248 [in Ukrainian].

**Olena Ivankova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Alexei Burlaka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine*

### **Study of restoration of body parts of automobile engines by the method of electric arc metalization**

Road transport ensures a rational organization of production and transportation of products. The cylinder block is a basic part, mechanisms and engine parts are attached to it. Engine blocks are operated with high loads. Defects arise and develop, which can be eliminated during major repairs. Improving the methods of restoring worn cylinder blocks of automobile engines is an urgent task. The possibility of restoring parts with such defects by gas-thermal methods was considered. The total level of defects that can be eliminated by applying a restorative coating by the method of electric arc metalization is 37%.

The analysis of literary sources shows that surfacing and welding methods do not ensure the quality of the restored part. Gas-thermal methods are often used in the process of repairing parts. The most technological and effective is electric arc metalization. Productivity of electric arc metalization can be very high. Operating costs of using electrometalization are small. The equipment is relatively simple. Restoration of parts by electric arc metalization increases wear resistance and durability of the engine.

To assess the repeatability of block defects, we analyzed a sample of 20 truck cylinder blocks from different manufacturers. It was established that the resource of the block depends on: wear of the main bearing beds, holes, cracks, damage to the thread and breakage of pins and holes.

Laboratory experiments on the application of electroplating coating were carried out on samples of high-strength cast iron. Preparatory processing of samples - shot blasting. Experiments on sputtering of samples were carried out with known powder wires PG-SR4 and PG-SR4+3% Al with a diameter of 2.0 mm. Spraying was carried out with an EM-17 electric arc metallizer. Tests on the adhesion strength of the coating to the base metal were carried out using the adhesive method. From the research results, we can see that the coating applied with PG-SR4+3%Al wire is destroyed at the joint under a higher load than the corrosion formed by PG-SR4 wire. At the same time, the adhesion strength also exceeds, and is 22.9 MPa. The microhardness of the coating built up with powder wire PG-SR4+3%Al exceeds the level of microhardness of the surface built up with wire PG-SR4. Microhardness in both cases. decreases with distance from the surface of the deposited layer.

Conclusions. From the conducted research, it follows that the electric arc restoration does not have a thermal effect on the part, provides high adhesion strength of the applied layer, which prevails over the majority of traditional methods of restoration of parts. In addition, the method of electric arc metalization is characterized by low energy consumption, small-sized and mobile technological equipment. Therefore, there is a need to continue the research of electric arc metalization in the restoration of worn surfaces of car parts.

**car, cylinder block, defects, electric arc metalization, adhesion strength, microhardness**

*Одержано (Received) 19.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 16.02.2024*  
*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

Л.А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук, І.П. Тарандушка, ст. викл.  
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна  
e-mail: tarandushkal@ukr.net; tarandushka@ukr.net

## Розробка методики забезпечення якісного лакофарбового покриття під час виконання малярно-кузовних робіт в системах автосервісу

Розроблено методику за допомогою якої стає можливим визначати якість лакофарбового покриття в системах автосервісу. Дана методика основана на визначенні важливих параметрів, які описують технологічний процес нанесення лакофарбового покриття. На основі алгоритму Фаррара-Глобера виокремлено серед 16 параметрів системи 8 незалежних, що впливають на якість покриття та визначено ступінь їх вагомості. Виокремлення незалежних параметрів сприяло побудові адекватної моделі прогнозування якості лакофарбового покриття. Це дає можливість організувати конкурентоздатні системи автосервісу з відновлення лакофарбових покриттів транспортних засобів.

**параметри, системи автосервісу, лакофарбові покриття, математична модель**

**Постановка проблеми.** Фарбування автомобіля – складний технологічний процес. Даний процес включає в себе багато етапів, починаючи від огляду та оцінки можливості виконання кузовного ремонту і закінчуючи фінішним поліруванням. Правильна черговість виконання робіт та дотримання всіх необхідних параметрів технологічного процесу відновлення – це гарантія отримання якісного лакофарбового покриття. Відновленням зовнішнього вигляду автомобілів після дорожньо-транспортних пригод або автомобілів з вторинного ринку Європи займаються системи автосервісу.

З кожним роком кількість зареєстрованих автомобілів в Україні з вторинного ринку Європи зростає. Для підвищення конкурентоздатності систем автосервісу, що займаються кузовним ремонтом необхідно виконувати послуги на високому професійному рівні. Отже, забезпечення якісного лакофарбового покриття під час виконання малярно-кузовних робіт є актуальною тематикою сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для забезпечення виконання якісно малярних робіт в системах автосервісу необхідно визначити ряд параметрів від яких залежить якість. Даною проблематикою займалися багато вчених. В роботі Гнатова А.В., Аргуна Щ.В. [1] було розглянуто чинники, що впливають на якість кузовного ремонту автомобілів, розроблено схему взаємного впливу процесів кузовного ремонту, запропоновано методику комплексної оцінки якості кузовного ремонту колісних транспортних засобів на основі виробничих та споживчих критеріїв.

В роботі [2] авторами виконано дослідження ефективного використання ресурсів малярно-кузовного цеху, визначено перелік ресурсів, що несуть втрати та способи їх зменшення.

В роботі [3] запропоновано модель управління якістю послуг з ТО та ремонту автомобілів, виокремлено основні параметри, що впливають на якість виконання послуг.

Molina J, Solanes J E, Arnal L and Tornero J виконали дослідження можливостей

зниження витрат та підвищення якості малярно-кузовних послуг при ремонті легкових автомобілів на основі оптимізації параметрів фарбувально-сушильних камер [4].

Лудченко, О. А. виконав аналіз щодо оцінки якості послуг автосервісу [5].

В роботі [6] запропоновано технологію моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів в системах автосервісу.

Keller, Н. запропонував заходи, що покращують технологію підготовки деталей для нанесення лакофарбових покриттів, тим самим було досягнуто зниження витрат на матеріали та підвищення продуктивності їх відновлення лакофарбовим покриттям [7].

У рамках даного дослідження потрібно визначити групу параметрів, що впливають на якість виконання малярних робіт під час виконання ремонту кузова, визначити їх ступінь вагомості, що дасть можливість прогнозувати якість отриманого лакофарбового покриття та, в сою чергу, підвищить ефективність функціонування систем автосервісу.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є підвищення ефективності функціонування автосервісів, що надають малярно-кузовні послуги на основі визначення важливих чинників та забезпечення необхідних умов для отримання якісного лакофарбового покриття.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення шляхів вдосконалення якості лакофарбового покриття застосуємо метод морфологічного аналізу. За допомогою цього методу можливо систематизувати дані, які забезпечують процес нанесення лакофарбового покриття та виконати аналіз можливих їх конфігурацій [8].

Для отримання якісного лакофарбового покриття на поверхні автомобільних деталей, що відновлюються необхідно враховувати чинники, що впливають на якість цього покриття. Для максимального врахування основних чинників та визначення ступеня їх важливості пропонується розробити морфологічну матрицю. В ході дослідження було виявлено морфологічні структури від яких залежить якість лакофарбового покриття, а саме: «Фарбувальна камера», «Фарборозпилювачі», «Джерело стисненого повітря», «Матеріал, що наноситься», «Технологія нанесення покриття». В нашому випадку розглядаємо останній етап нанесення лакофарбового покриття, вважаємо, що підготовчі роботи до нанесення покриття було виконано якісно. Для кожної з 16 морфологічних ознак визначено варіанти реалізації, що представлені в табл. 1.

Зазначений метод дозволяє аналізувати будь-яку комбінацію морфологічних ознак та обрати найкращу з них.

В межах даного дослідження було виконано обстеження 20 типових автосервісів, а саме аналіз їх роботи – отримання певної якості лакофарбового покриття. Прикладом морфологічної формули, що описує процес нанесення лакофарбового покриття, який виконується на ТОВ «Моторкар Черкаси» представлено формулою:

$$\left[ \begin{array}{l} (X_{131}; X_{231}; X_{331}; X_{431}) + (X_{521}; X_{621}) + (X_{721}; X_{821}) + (X_{921}; X_{1021}; X_{1121}; X_{1221}; X_{1321}) + \\ + \\ (X_{1421}; X_{1521}; X_{1621}) \end{array} \right] \quad (1)$$

Для дослідження характеру впливу, визначених на стадії морфологічного аналізу важливих параметрів, що впливають на структуру процесу нанесення лакофарбового покриття, а відповідно і на якість отриманого покриття необхідно побудувати математичну модель даної структури. Для цього необхідно здійснити структурну специфікацію моделі (2).

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (2)$$

де  $Y$  – результуючий параметр моделі;  
 $X_1, X_2, \dots, X_n$  – вектор вхідних параметрів;  
 $n$  – кількість параметрів.

В якості початкової інформації для моделі використовуємо результати дослідження 20 автосервісних підприємств, що надають послуги з малярно-кузовного ремонту.

Таблиця 1 – Морфологічна матриця морфологічних структур процесу нанесення лакофарбового покриття

Фарбувальна камера				Фарбопульти (фарборозпилювач)		Джерело стисненого повітря		Матеріали, що наносяться					Технологія нанесення покриття		
1. Вигляд	2. Овиплення	3. Теплообмінник	4. Підпідмерзді (принцип роботи)	5. Подача фарби	6. Розмір дози, мм	7. Тип джерела	8. Потужність, кВт	9. Тип матеріалу	10. Тип розприскувача	11. Кількість розприскувача	12. Кількість заправдувача	13. Температура матеріалу, °C	14. Техніка нанесення	15. Відстань від фарбопульта до основи, см	16. Кількість шарів
1.1. Припливно-витяжна 1	2.1. Стінове 1	3.1. Рекупераційний 1	4.1. Відсутня 1	5.1. Самотіток 1	6.1. 1,2 1	7.1. Компресор 1	8.1. Мала 0-0,19	9.1. Лак 1	10.1. Відсутній 1	11.1. Мала 0-0,19	12.1. Мала 0-0,49	13.1. Низька 15-19	14.1. Вертикально 1	15.1. 10-29	16.1. 1
1.2. Одно-моторна 2	2.2. Стілове 2	3.2. Рекупераційний 2	4.2. Конвективний 2	5.2. Під тиском 2	6.2. 1,3-1,6 2	7.2. Турбина 2	8.2. Оптиміальна 0,20-0,30	9.2. Рідка фарба 2	10.2. Повільний 2	11. Оптиміальна 0,2	12.2. Оптиміальна на 0,50	13.2. Оптиміальна 20-22	14.2. Горизонтально 2	15.2. 20-29	16.2. 2
1.3. Дво-моторна 3	2.3. Стілове +стінове 3		4.3. Промисловий теплообмінник (інфрачервоний) 3				8.3. Надмірна 0,31-0,60	9.3. Порошкова фарба 3	10.3. Швидкий 3	11.3. Велика 0,21-0,3			11.4. Надмірна 0,31-1	12.3. Висока 0,51-0,60	

Джерело: розроблено авторами

Результуючим параметром системи «Фарбувальна камера -Фарборозпилювач - Джерело стисненого повітря - Матеріал, що наноситься - Технологія нанесення покриття» виступає рівень якості отриманого покриття  $K_n$ . Даний параметр розраховується за формулою (3):

$$K_n = \min(K_i^j), \tag{3}$$

де  $K_i^j$  – коефіцієнт схвальних оцінок замовників  $i$ -ї роботи (послуги) з нанесення лакофарбового покриття.

Розглянемо лінійну залежність, що описує вплив параметрів на рівень якості отриманого лакофарбового покриття.

Визначимо незалежні параметри системи.

Математичну модель системи представимо у вигляді лінійної множинної регресії (4):

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i, \tag{4}$$

де  $n$  – кількість факторів, які буде враховано;

$a_i$  – невідомі коефіцієнти.

Побудова даної моделі виконується на основі методу найменших квадратів. Адекватне застосування методу найменших квадратів залежить від використання в моделі (4) незалежних факторів. Для визначення незалежних факторів застосуємо алгоритм Фаррара-Глобера [9]. Зазначений алгоритм дає можливість виявити три види

кореляційного взаємозв'язку між факторами (параметрами) системи: мультиколінеарність у всьому масиві вхідних даних, мультиколінеарність кожного параметру з усіма та лінійну залежність між кожною парою параметрів [10]. Залежні параметри поступово вилучаються з подальшого розгляду. Процедура вилучення параметрів є суб'єктивною і єдиним критерієм її ефективності є відсутність мультиколінеарності параметрів в системі.

### І ітерація.

Крок 1. Нормуємо та центруємо значення параметрів системи:

$$x_{ik}^H = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{\sigma_k}, \quad 1 \leq k \leq 19, 1 \leq i \leq 20, \quad (5)$$

де  $x_{ik}^H$  – нормоване значення  $k$ -го параметру  $i$ -го АСП;

$x_{ik}$  – початкове значення  $k$ -го параметру  $i$ -го АСП;

$\bar{x}_k$  – середнє значення  $k$ -го параметру;

$\sigma_k$  – дисперсія  $k$ -го параметру.

Крок 2. Визначаємо вибірккову кореляційну матрицю:

$$\hat{R} = \frac{1}{n} (X^H)^T X^H, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість АСП,  $n = 20$ .

Крок 3. Визначаємо значення критерію Пірсона  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = - \left( n - 1 - \frac{1}{6} (2m + 5) \right) \ln |\hat{R}|, \quad (7)$$

де  $m$  – кількість вхідних параметрів.

$n$  – кількість спостережень.

Порівнюємо його з табличним значенням при  $\frac{1}{2}m(m-1) = \frac{1}{2}16(16-1) = 120$

ступенях свободи і рівні значущості  $\alpha$ . Якщо  $\chi^2 > \chi_{\text{табл}}^2$ , то у векторі вхідних параметрів є мультиколінеарність.

При  $m = 16, n = 20, \alpha = 0,05$  отримано наступне значення критерію:

$$\chi^2 = - \left( 20 - 1 - \frac{1}{6} (2 \cdot 16 + 5) \right) \ln(5,9 \cdot 10^{-10}) = 272,66. \quad (8)$$

Оскільки  $\chi^2 > \chi_{\text{табл}}^2(120; 0,05) = 146,56$ , то мультиколінеарність у масиві вхідних змінних наявна.

Крок 4. Визначаємо обернену матрицю  $D = \hat{R}^{-1}$ .

Крок 5. Розраховуємо значення  $F$ -критерію Фішера для  $k$ -го параметру за формулою (9):

$$F_k = |d_{kk} - 1| \frac{n-m}{m-1}, \quad (9)$$

де  $d_{kk}$  – діагональні елементи матриці  $D$ ,  $1 \leq k \leq 16$ ;

$n$  – кількість АСП,  $n = 20$ ;

$m$  – кількість вхідних параметрів системи,  $m = 16$ .

Результати розрахунку  $F_k$  наведено в табл. 1.

Розраховані значення критерію порівнюються з табличними при  $(n-m) = 4$  та  $(m-1) = 15$  ступенях свободи і рівні значущості  $\alpha = 0,05$ . Табличне значення  $F_{\text{табл}}(0,05; 4; 15) = 5,85$ . Якщо для  $k$ -го параметру  $F_k > F_{\text{табл}}$  (в табл. 2 виділено жирним), то даний параметр є мультиколінеарним з іншими. Вочевидь, що найбільш мультиколінеарним з іншими є параметр  $X_1$ .

Крок 6. Знаходимо вибірккові часткові коефіцієнти кореляції:

$$\beta_{kj} = \frac{-d_{kj}}{\sqrt{d_{kk}d_{jj}}}, 1 \leq k \leq 16, 1 \leq j \leq 16. \tag{10}$$

Крок 7. Обчислюємо значення *t*-критерію Ст'юдента за формулою (11):

$$t_{kj} = \frac{\beta_{kj} \sqrt{n-m}}{\sqrt{1-\beta_{kj}^2}}. \tag{11}$$

Розраховані значення  $t_{kj}$  (табл. 3) порівнюються з табличним при  $(n - m) - 4$  ступенях свободи і рівні значущості  $\alpha = 0,05$ . Якщо  $|t_{kj}| > t_{\text{табл}}(0,05; 4) = 2,132$ , то між  $X_k$  та  $X_j$  існує мультиколінеарність. У табл. 21 значення, що за модулем перевищують табличне, виділено жирним, це параметр  $X_1$  - його вилучаємо з розгляду у II ітерації.

Для кожного стовпця табл. 20 знаходимо суми  $S_j$  значень критеріїв Ст'юдента  $t_{jk}$ , які за модулем перевищують табличне значення:

$$S_j = \sum_{k=1}^{16} t_{jk} \text{ якщо } |t_{jk}| > t_{\text{табл}}, k = \overline{1, 16}. \tag{12}$$

Суми впорядковуємо за спаданням

Враховуючи значення  $F_k, k = \overline{1, 16}$  (табл. 4), з подальшого розгляду вилучаємо вхідні параметри, яким відповідає найбільша сума  $S_j: X_{14}$ .

Необхідно перевірити на мультиколінеарність відкоригований масив вхідних даних:  $X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{15}, X_{16}$ .

Таблиця 2 - Значення критерію Фішера для *k*-го параметру на I ітерації алгоритму

$F_k$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$
Значення	<b>6,13</b>	0,43	0,65	3,48	1,31	1,20	3,26	2,99	1,96	0,67	0,74	3,23	1,30	3,68	1,27	4,10
я	7	3	5	5	2	8	3	7	0	9	0	9	2	7	8	7

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 - Значення *t*-критерію Ст'юдента  $t_{kj}$  на I ітерації

$X_k \backslash X_j$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$X_1$	0	-0,426	-0,098	1,137	0,490	0,471	0,792	1,564
$X_2$	-0,426	0	1,715	0,170	0,997	-1,714	-0,107	-0,729
$X_3$	-0,098	1,715	0	0,371	-0,579	1,842	0,918	1,521
$X_4$	1,137	0,170	0,371	0	-1,679	-0,858	0,660	-1,187
$X_5$	0,490	0,997	-0,579	-1,679	0	0,539	1,088	-0,062
$X_6$	0,471	-1,714	1,842	-0,858	0,539	0	-0,208	-1,818
$X_7$	0,792	-0,107	0,918	0,660	1,088	-0,208	0	-0,963
$X_8$	1,564	-0,729	1,521	-1,187	-0,062	-1,818	-0,963	0
$X_9$	-0,756	-0,515	-0,622	0,547	0,472	0,005	1,062	0,831
$X_{10}$	0,151	-0,524	1,325	-1,057	-0,366	-1,042	0,110	-1,117
$X_{11}$	-0,519	-0,357	0,403	1,147	0,960	0,259	-1,088	0,129
$X_{12}$	-0,771	0,236	-1,445	0,946	0,409	0,770	0,745	1,743
$X_{13}$	0,745	0,692	-0,191	0,594	0,219	0,900	-1,592	-0,015
$X_{14}$	-1,389	-0,013	-0,264	4,347	1,868	0,854	-0,577	1,491
$X_{15}$	-1,029	0,274	-0,561	2,026	1,108	0,868	-0,141	1,803
$X_{16}$	1,580	-0,422	0,714	-2,343	-0,791	-1,491	0,048	-2,257

Продовження таблиці 3

$X_j \backslash X_k$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$
$X_1$	-0,756	0,151	-0,519	-0,771	0,745	-1,389	-1,029	1,580
$X_2$	-0,515	-0,524	-0,357	0,236	0,692	-0,013	0,274	-0,422
$X_3$	-0,622	1,325	0,403	-1,445	-0,191	-0,264	-0,561	0,714
$X_4$	0,547	-1,057	1,147	0,946	0,594	4,347	2,026	-2,343
$X_5$	0,472	-0,366	0,960	0,409	0,219	1,868	1,108	-0,791
$X_6$	0,005	-1,042	0,259	0,770	0,900	0,854	0,868	-1,491
$X_7$	1,062	0,110	-1,088	0,745	-1,592	-0,577	-0,141	0,048
$X_8$	0,831	-1,117	0,129	1,743	-0,015	1,491	1,803	-2,257
$X_9$	0	0,826	0,482	-3,042	0,987	-0,515	-0,889	0,600
$X_{10}$	0,826	0	0,871	1,912	0,255	1,089	1,117	-0,896
$X_{11}$	0,482	0,871	0	0,165	-0,532	-1,114	-0,639	0,763
$X_{12}$	-3,042	1,912	0,165	0	0,426	-1,117	-1,597	1,412
$X_{13}$	0,987	0,255	-0,532	0,426	0	-0,542	-0,277	0,518
$X_{14}$	-0,515	1,089	-1,114	-1,117	-0,542	0	-2,541	3,225
$X_{15}$	-0,889	1,117	-0,639	-1,597	-0,277	-2,541	0	2,902
$X_{16}$	0,600	-0,896	0,763	1,412	0,518	3,225	2,902	0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 4 - Суми абсолютних значень  $t$ -критерію  $S_j$ , що перевищують  $t_{\text{табл}}$ , на  $i$  ітерації

Параметр	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$
$S_j$	11,918	8,890	12,569	19,070	11,627	13,639	10,099	17,230	12,152	12,656	9,428	16,737	8,484	<b>20,946</b>	17,774	19,961

Джерело: розроблено авторами

Після виконання трьох ітерацій мультиколінеарність у масиві вхідних змінних зникає.

У відкоригованому масиві вхідних даних залишилося 8 незалежних параметрів:  $X_2, X_4, X_5, X_9, X_{11}, X_{13}, X_{15}, X_{16}$ . На цьому виконання алгоритму завершено.

Побудуємо лінійну модель системи «Фарбувальна камера - Фарборозпилювач - Джерело стисненого повітря - Матеріал, що наноситься - Технологія нанесення покриття» у вигляді лінійної множинної регресії:

$$K_R = a_0 + a_2 X_2 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + a_9 X_9 + a_{11} X_{11} + a_{13} X_{13} + a_{15} X_{15} + a_{16} X_{16} \quad (13)$$

Коефіцієнти моделі знаходимо за формулою [9]:

$$A = (a_0, a_2, a_4, a_5, a_9, a_{11}, a_{13}, a_{15}, a_{16}) = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot K_R \quad (14)$$

де  $X$  – матриця, яка складається з векторів-стовпців незалежних параметрів, що було визначено на III ітерації алгоритму Фаррара-Глобера;

$K_R$  – вектор-стовпець, що відповідає рівням якості нанесеного лакофарбового покриття на кожному АСП.

Таким чином, отримуємо наступну математичну модель:

$$K_R = 0,6204 + 0,0042 \cdot X_2 + 0,0301 \cdot X_4 + 0,0603 \cdot X_5 + 0,0925 \cdot X_9 - 0,4730 \cdot X_{11} - 0,0047 \cdot X_{13} + 0,0022 \cdot X_{15} + 0,0943 \cdot X_{16} \quad (15)$$

Середньоквадратичне відхилення модельних значень від табличних розраховується за формулою:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_{Я\ табл}^i - K_{Я\ модел}^i)^2, \quad (16)$$

де  $n$  – кількість АСП у вибірці;

$i$  – індекс АСП в масиві вихідних даних;

$K_{Я\ табл}^i, K_{Я\ модел}^i$  – відповідно табличне та модельне значення коефіцієнту якості виконаних технологічних процесів на  $i$ -му АСП.

При реалізації моделі середнє квадратичне відхилення модельних значень рівня якості отриманого лакофарбового покриття від статистичних склало  $\bar{\sigma} = 0,0008$ , що підтверджує адекватність моделі.

Для розрахунку відносного середньоквадратичного відхилення використано формулу

$$S_r = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \frac{(K_{Я\ табл}^i - K_{Я\ модел}^i)^2}{(K_{Я\ табл}^i)^2} \cdot 100\%. \quad (17)$$

Графічне відображення результатів моделювання представлено на рис. 1-2.



Рисунок 1 – Порівняння табличних та модельних значень рівня якості отриманого лакофарбового покриття при побудові лінійної моделі

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 2 – Похибка лінійної моделі, що побудовано на початковій вибірці

Джерело: розроблено авторами

В результаті аналізу графіку (рис.2) можна зробити висновок, що отримана лінійна модель, що описує рівень якості нанесеного лакофарбового покриття може застосовуватися для прогнозування якості лакофарбового покриття, знаючи 8 вхідних параметрів системи, а саме:

$X_2$ - освітлення фарбувальної камери;

- $X_4$  - піч полімеризації (принцип роботи);
- $X_5$  – спосіб подачі фарби;
- $X_9$  – потужність джерела стисненого повітря;
- $X_{11}$  – кількість розріджувача;
- $X_{13}$  - температура матеріалу, що наноситься;
- $X_{15}$  - відстань від фарбопульту до основи;
- $X_{16}$  - кількість шарів нанесеного матеріалу.

Відповідно, для підвищення якості нанесеного лакофарбового покриття можливо організувати виробництво з врахуванням незалежних вхідних параметрів системи.

**Висновки.** Запропонована методика визначення важливих чинників під час виконання лакофарбового покриття дає можливість виокремити незалежні з них та визначити ступінь вагомості кожного з них. Завдяки цьому стає можливим забезпечувати організаційно-технологічну структуру виробництва необхідним обладнанням та технологіями. Ефективність автосервісних підприємств підвищується, витрати зменшуються. Дана методика також може застосовуватися для прогнозування якості лакофарбового покриття, враховуючи важливі чинники цього процесу.

При реалізації запропонованої методики, було розроблено математичну модель визначення якості лакофарбового покриття від чинників, що впливають на даний процес. Середнє квадратичне відхилення модельних значень рівня якості отриманого лакофарбового покриття від статистичних склало  $\bar{\sigma} = 0,0008$ , що підтверджує адекватність моделі.

## Список літератури

1. Гнатов А.В., Аргун Ш.В. Сучасні технології зовнішнього магнітноімпульсного кузовного ремонту автомобілів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 4. С.103-108.
2. Kipriyanov F. A., Shushkov R. A., Mikhailov A. S. Quality research of paintwork of Volkswagen Tuareg car body elements. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. 832(1). 1-8. URL: [https://www.researchgate.net/publication/342050669\\_Quality\\_research\\_of\\_paintwork\\_of\\_Volkswagen\\_Tuar\\_eg\\_car\\_body\\_elements](https://www.researchgate.net/publication/342050669_Quality_research_of_paintwork_of_Volkswagen_Tuar_eg_car_body_elements) (дата звернення: 15.03.2024).
3. Тарандушка Л.А. Побудова функціональної моделі автосервісного підприємства. *Вісник Національного транспортного університету*. 2020. №1(46). С. 333–340.
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. Vol. 48 263-78. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584517300194> (дата звернення: 16.03.2024).
5. Лудченко О. А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів : підручник. К. : Знання-Прес, 2003. 511 с.
6. Тарандушка Л.А. Тарандушка І.П. Технологія моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2014. №1(71). С.116-122.
7. Keller, H. Steady Growth Key for Top Injection Molders. *Plastics News*. 2023. URL: [www.plasticsnews.com/all-things-data/top-injection-molders-report-growing-sales](http://www.plasticsnews.com/all-things-data/top-injection-molders-report-growing-sales). (дата звернення: 15.03.2024).
8. Методи оцінювання якості технологічних процесів у системах автосервісу : монографія / Л.А. Тарандушка та ін. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 212 с.
9. Снитюк В. Є. Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми. Київ: Маклаут, 2008. 364.
10. Shrestha N. Detecting Multicollinearity in Regression Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*. 2020. 8(2): 39-42. URL: [https://www.researchgate.net/publication/342413955\\_Detecting\\_Multicollinearity\\_in\\_Regression\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/342413955_Detecting_Multicollinearity_in_Regression_Analysis). (дата звернення: 17.03.2024).

## References

1. Hnatov, A.V. & Arhun, Sch.V. (2015). Suchasni tekhnolohii zovnishn'oho mahnitnoimpul'snoho kuzovnoho remontu avtomobiliv [Modern technologies of external magnetic pulse body repair of cars]. *Visnyk Vinnys'koho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4, 103-108. [in Ukrainian].

2. Kipriyanov, F. A., Shushkov, R. A. & Mikhailov, A. S. (2020). Quality research of paintwork of Volkswagen Tuareg car body elements. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 832(1), P.1-8. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/342050669\\_Quality\\_research\\_of\\_paintwork\\_of\\_Volkswagen\\_Tuareg\\_car\\_body\\_elements](https://www.researchgate.net/publication/342050669_Quality_research_of_paintwork_of_Volkswagen_Tuareg_car_body_elements) [in English].
3. Tarandushka, L.A. (2020). Pobudova funktsional'noi modeli avtoservisnoho pidpriemstva [Building a functional model of a car service enterprise]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, 1(46), 333–340. [in Ukrainian].
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*, 48, 263-78, Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584517300194> [in English].
5. Ludchenko, O. A. (2003). *Tekhnichne obsluhovuvannia i remont avtomobiliv [Car maintenance and repair]*. K. : Znannia-Pres [in Ukrainian].
6. Tarandushka, L.A. & Tarandushka, I.P. (2014) Tekhnolohiia monitorynhu pokaznykiv iakosti tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu avtomobiliv [Technology for monitoring quality indicators of car maintenance and repair]. *Visnyk Chernihiv'skoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Bulletin of the Chernihiv State University of Technology. Series "Technical Sciences"*, 1(71), 116-122 [in Ukrainian].
7. Keller, H. (2023). Steady Growth Key for Top Injection Molders. *Plastics News*. Retrieved from [www.plasticsnews.com/all-things-data/top-injection-molders-report-growing-sales](http://www.plasticsnews.com/all-things-data/top-injection-molders-report-growing-sales) [in English].
8. Tarandushka, L.A. et al. (2021). *Metody otsiniuvannia iakosti tekhnolohichnykh protsesiv u systemakh avtoservisu [Methods of evaluating the quality of technological processes in car service systems]*. Kherson : OLDI-PLIuS [in Ukrainian].
9. Snytiuk, V. Ye. (2008). *Prohnozuvannia. Modeli. Metody. Alhorytmy [Prognostication. Models. Methods. Algorithms]*. Kyiv: Maklout. [in Ukrainian].
10. Shrestha, N. (2020). Detecting Multicollinearity in Regression Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 8(2): 39-42. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/342413955\\_Detecting\\_Multicollinearity\\_in\\_Regression\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/342413955_Detecting_Multicollinearity_in_Regression_Analysis) [in English].

**Ludmyla Tarandushka**, Prof., DSc., **Ivan Tarandushka**, Senior Lecturer  
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

### **Development of the method for ensuring quality paint coating during painting and body work in car service systems**

A technique has been developed that makes it possible to determine the quality of paintwork in car service systems. This technique is based on the determination of important parameters that describe the technological process of applying a paint coating. Based on the Farrar-Glober algorithm, among the 16 parameters of the system, 8 independent ones affecting the quality of the coating were singled out and their degree of importance was determined. Isolation of independent parameters contributed to the construction of an adequate model for predicting the quality of the paint coating. This makes it possible to organize competitive car service systems for the restoration of vehicle paint coatings.

Thanks to the proposed methodology, it becomes possible to provide the organizational and technological structure of production with the necessary equipment and technologies. The efficiency of car service enterprises increases, costs decrease. This technique can also be used to predict the quality of the paint coating, taking into account the important factors of this process.

When implementing the proposed methodology, a mathematical model was developed for determining the quality of the paint coating from the factors affecting this process. The average quadratic deviation of the model values of the quality level of the obtained paint coating from the statistical values was  $\bar{\sigma}=0,0008$ , which confirms the adequacy of the model.

So, it can be concluded that the obtained linear model describing the level of quality of the applied paint coating can be used to predict the quality of the paint coating, knowing the 8 input parameters of the system, namely:

$X_1$  - lighting of the dyeing chamber;  $X_2$  - polymerization furnace (principle of operation);  $X_3$  - method of paint feeding;  $X_4$  - compressed air source capacity;  $X_5$  - amount of diluent;  $X_6$  - temperature of the applied material;  $X_7$  - distance from the spray gun to the base;  $X_8$  - the number of applied material layers.

**parameters, car service systems, paint coatings, mathematical model**

*Одержано (Received) 25.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 01.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

УДК 681.3.06

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.144-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.144-151)

**М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Ю.В. Кулешков**, проф., д-р техн. наук, **І.В. Шепеленко**, проф., д-р техн. наук, **Р.А. Осін**, доц. канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: krasotamv@ukr.net*

## Дослідження шляхів підвищення оперативності виконання діагностичних операцій електронних систем автотракторної техніки

В роботі наведені результати пошуку шляхів зниження часу на проведення діагностичних операцій, що супроводжують технічні обслуговування та ремонти електронних систем управління автотракторної техніки.

З метою зменшення часу на виконання діагностичних операцій при проведенні технічних обслуговувань та ремонтів автотракторної техніки пропонується виконувати прогнозування залишкового ресурсу елементів електронних систем управління та вводити в регламент робіт по технічному обслуговуванні операції по визначенню остаточного ресурсу елементів електронних систем, а також регламентній заміні окремих елементів, що вичерпали свій ресурс та мають високу імовірність виходу з ладу.

Зміна регламенту проведення технічних обслуговувань дозволить зменшити час на діагностування потенційних несправностей елементів електронних систем і таким чином знизити час виконання діагностичних дій при проведенні можливих ремонтів систем управління. **діагностування, автотракторна техніка, електронна система управління, оперативність, технічне обслуговування, ремонт**

**Постановка проблеми.** Сучасні автотракторні засоби є складними технічними системами, в яких одночасно і взаємопов'язано функціонує значна кількість різних вузлів і агрегатів, для керування роботою яких все ширше використовуються електронні системи.

«Найдорожчими та технічно складними агрегатами автотракторних систем є двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), трансмісія, підвіска, рульове управління, системи активної та пасивної безпеки, роботою яких керує електронна система управління (ЕСУ)» [1].

Застосування ЕСУ в транспортних засобах дає можливість добитися значних техніко-економічних характеристик функціонування їх систем при одночасному забезпеченні високих екологічних умов. Це можливо досягти за рахунок створення оптимальної за співвідношенням палива та повітря суміші на всіх режимах функціонування двигуна, дозування та подачі в камеру згорання і стабільного запалювання суміші, своєчасним перемиканням передач автоматичною трансмісією, налаштуванням параметрів рульового керування, керуванням спрацьовуванням гальм, підвіски та інших частин транспортних засобів.

В ЕСУ, так само, як і в інших електронних системах транспортних засобів, у процесі функціонування з часом з'являються відмови та несправності. За результатами аналізу експлуатаційної надійності транспортних засобів в наукових джерелах [1, 2] показано, що на несправності ЕСУ доводиться до 23...30% загальної кількості відмов автотракторної техніки. Відмови складових частин ЕСУ мають наслідки у вигляді

порушень функціонування інших систем транспортних засобів, а також в деяких випадках порушення ним працездатності та виникнення необхідності у виконанні дороговартісних ремонтів.

Наявність різного типу відмов істотно впливає на транспортний процес, який здійснюється автотракторною технікою. При появі відмов значний час виробничого часу витрачається на пошук несправностей та їх усунення, при цьому, якщо відмова трапляється в момент знаходження техніки на лінії, виникають додаткові витрати часу, пов'язані з транспортуванням машини до місця ремонту, пошук відмов та їх усунення. Якщо ці операції займають значний час – машина знаходиться в простой, що є небажаним.

Методи що використовуються для діагностування ЕСУ на сервісних підприємствах досить ефективні, але в значній мірі вимагають високої кваліфікації операторів-діагностів, а також застосування додаткового складного і дорогого обладнання, значної тривалості обслуговування та ремонту.

У зв'язку з цим доцільним напрямком досліджень є пошук шляхів зниження часу проведення діагностичних операцій, супутніх технічним обслуговуванням та ремонтам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із напрямків вирішення цього завдання є застосування технології комп'ютерного діагностування несправностей ЕСУ при проведенні технічного обслуговування транспортних засобів на сервісних підприємствах чи діагностичних дільницях на автотранспортних підприємствах. Значною мірою це стосується транспортних засобів, що функціонують в умовах жорстких кліматичних умов при високій вологості, значній запиленості та наявності вібрацій [1, 2, 3].

Відомі способи діагностування ЕСУ транспортних засобів [1, 2] у певній мірі функціональні, але у великій кількості випадків потребують значної кваліфікації сервісного персоналу, використання спеціалізованого вартісного устаткування, довготривалого обслуговування та ремонту, що у свою чергу підвищує трудомісткість сервісу, а також не забезпечує достатнього прогнозування несправностей та відмов електронних систем.

Отже, дослідження, які мають на меті підвищення ефективності виробничих процесів технічного обслуговування та поточних ремонтів ЕСУ з впровадженням діагностування електронних систем, є актуальними та необхідними для автомобільного транспорту.

В роботі [4] було досліджено основні шляхи удосконалення та чинники, що впливають на ефективність виконання технічних обслуговувань (ТО) та ремонтів. В роботі встановлено, що підвищення ефективності функціонування підсистем автотракторної техніки пов'язане з підвищенням якості проведення ремонтів, зниження часу на проведення ремонту та обслуговувань, підвищення достовірності діагностування несправностей, прогнозування відмов, застосування нових діагностичних засобів, що дозволяють в автоматичному режимі визначати несправності, підвищення кваліфікації персоналу шляхом покращення рівня його навчання, застосування продуктивного обладнання для проведення технічного обслуговування та ремонту машин.

В роботі [5] показано, що «найбільш перспективними напрямками є автоматизація управління процесом ТО та ремонту за результатами технічної діагностики агрегатів та систем, що вимагає застосування сучасних інформаційних технологій на всіх рівнях сервісу, починаючи з бортової електроніки машини та закінчуючи інформаційними системами, що охоплюю всі структури транспортного підприємства».

У роботі [6] розглянуто методи підвищення ефективності виробничої експлуатації та технічного сервісу транспортних та транспортно-технологічних машин

в агропромисловому комплексі (АПК). Наголошується, що нормативно-технічна документація є однією з головних складових системи технічної експлуатації машин. Одним із шляхів удосконалення організації ТО автомобілів є застосування комп'ютерних засобів для оперування нормативно-технічною документацією у процесі безпосереднього виконання операцій обслуговування.

У роботі [7] пропонується метод удосконалення технології ТО впровадженням прогресивної форми праці, як бригадний підряд, а також організованим технологічним процесом, що дозволяє значно скоротити простої техніки під час ТО, що підвищує відповідальність персоналу за якість виконуваних робіт.

Перспективним напрямком удосконалення ТО автомобілів є реалізація методу прогнозування параметрів стану агрегатів і вузлів автомобілів за результатами технічної діагностики [10]. Через значну трудомісткість і складність обчислень з прогнозування, відсутність систематизованих даних щодо реалізації на сьогоднішній день цей метод також не отримав практичного застосування.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є пошук шляхів зниження виробничого часу, що витрачається на виконання діагностичних операцій при проведенні технічних обслуговувань або ремонтів електронних систем управління автотракторної техніки.

**Викладення основного матеріалу.** Подальші кроки досліджень зі створення системи сервісу автотракторної техніки здійснюються у напрямку удосконалення нових технологій виконання контрольних та діагностичних операцій через досить активне використання інтелектуальних засобів визначення та аналізу діагностичної інформації на базі комп'ютерної техніки.

Одним із найвагоміших чинників, що мають вплив на здійснення ТО та ремонтів транспортних засобів, є оперативність та якість проведення робіт [8, 9]. Оперативність і якість в значній мірі обумовлюється кваліфікацією сервісного персоналу та наявністю необхідної нормативно-технічної документації по об'єкту, що обслуговується чи ремонтується. Оперативність виконання робіт має безпосередній зв'язок з їх трудомісткістю [10].

Зважаючи на викладений вище аналіз джерел інформації, можливо зробити висновок, що резервом зниження часу на виконання ремонтів та ТО є зменшення тривалості виконання діагностичних операцій.

Отже, в даній роботі пропонується з метою підвищення оперативності виконання ТО і поточних ремонтів здійснювати прогнозування залишкового ресурсу складових елементів ЕСУ транспортних засобів в процесі проходження ними ТО, для подальшого зменшення трудомісткості виконання діагностувальних операцій та ремонтів.

Таким чином, діагностування, що здійснюється при виконанні ТО або ремонту повинно містити прогнозування залишкового ресурсу складових елементів системи. Також, для певних найвідповідальніших елементів ЕСУ (датчиків або виконавчих пристроїв) пропонується використовувати метод їх заміни при досягненні визначеного напрацювання за величиною пробігу (чи у мото-годинах) і не експлуатувати їх до досягнення непрацездатного стану. Такий метод організації сервісу автотракторної техніки дозволить знизити простої транспортних засобів при проведенні ремонтів та зменшить час, що витрачається на пошук несправностей електронних систем при виході з ладу їх окремих елементів.

У діючих нормативах ТО машин операції по здійсненню поточного контролю технічного стану ЕСУ, як правило, не передбачаються. При проведенні сервісних дій здійснюється лише перевірка наявності кодів несправностей, що записуються в пам'яті

електронного блоку управління ЕСУ, і тільки при їх наявності виконуються контрольно-діагностичні дії відповідно до інструкцій заводу-виробника. У випадку відсутності кодів несправностей у оперативній пам'яті блоку керування, ЕСУ вважається технічно справною та спеціальні перевірки не виконуються.

Однак, як показують виконані у даній роботі дослідження, лише через те, що помилок в пам'яті електронного блоку керування (ЕБК) не виявлено, не правильно робити висновок про те, що ЕСУ справна, тому що можуть мати місце несправності, при яких не записується код помилки. Це обґрунтовується тим, що ЕБК записує у пам'ять код несправності лише при невідповідності якогось діагностичного параметра із вказаного у програмі нормативного інтервалу. Наслідком цього є випускання на лінію після проведення ТО транспортних засобів, що містять приховані несправності ЕСУ, які проявлять себе при наступній експлуатації.

Для забезпечення достатнього рівня надійності ЕСУ необхідно при регламентній періодичності ТО транспортних засобів також проводити діагностичні операції перевірки технічного стану її складових на сервісних підприємствах і при цьому здійснювати прогнозування залишку ресурсу, при якому буде забезпечена справна робота.

Перевіряти технічний стан кожного елементу ЕСУ при виконанні регламентних робіт по ТО транспортного засобу економічно недоцільно, оскільки це тягне за собою значні матеріальні та трудові витрати.



Рисунок 1 - Схема діагностування ЕСУ з проведенням прогнозування надійності елементів  
Джерело: розроблено авторами

До структури ЕСУ поруч із складовими, технічний стан яких можна перевірити шляхом контролю певних діагностичних параметрів, входять також конструктивні складові, що не мають проявів виходу з ладу.

Проконтролювати їх технічний стан і визначити несправності, що проявляються при здійсненні контрольно-діагностичних операцій в більшості випадків майже неможливо. Для цих складових ЕСУ слід використовувати методику заміни при досягненні певного напрацювання. В основному до таких складових можливо віднести датчики, частота відмов яких відповідає близько 30% від загальної кількості відмов ЕСУ.

В якості параметрів, що визначають їх надійність, можливо застосовувати інтенсивність відмов  $\lambda(t) = f(t)/P(t)$ , яка наочно демонструє залежність виникнення несправностей від пробігу транспортного засобу.

Результати отриманих досліджень залежностей зміни інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  свідчать, що у певних межах напрацювання датчиків зростає через отримання ними різних ушкоджень в процесі експлуатації.

У зв'язку з цим заміну відпрацьованих датчиків на нові пропонується здійснювати при досягненні цих значень напрацювань, оскільки наступна експлуатація з високим ступенем імовірності призведе до їх виходу з ладу.

Величина напрацювань до заміни датчиків системи управління коригується за допустимим рівнем ймовірності здійснення їх безвідмовної роботи.

Заміна датчиків до досягнення ними граничного стану дозволяє запобігти їх відмовам і забезпечує високий рівень надійної роботи при напрацюваннях між проведенням чергових регламентних обслуговувань автомобіля або трактора.

Тому, в процесі проведення ТО необхідно виконувати і визначення запасу інтервалу пробігу або мото-годин справної роботи складових ЕСУ.

При аналізі остаточного ресурсу ЕСУ застосовувалися статистичні методи аналізу залежностей, що описують закономірності зміни діагностичних параметрів при напрацюванні окремих датчиків ЕСУ.

Для структурних складових ЕСУ, які не мають проявів зміни технічного стану, величина напрацювань до їх заміни встановлювалася за результатами аналізу статистичних даних, що описують їхню експлуатаційну надійність.

У табл. 1 показано встановлені з використанням програмного забезпечення MathCad параметри безвідмовної роботи датчика тиску наддуву автомобіля Mercedes-Benz Sprinter.

Таблиця 1 Статистичні дані аналізу безвідмовної роботи датчика тиску наддуву

Показник	Межі напрацювання, тис. км									
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200
Частота відмов пі	2	0	0	1	0	1	0	25	39	47
Імовірність безвідмовного функціонування $P(t)$	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,74	0,39	0
Інтенсивність виявлення відмов $\lambda(t)10^{-4}$	0,87	0	0	0,44	0	0,45	0	12,5	29,2	91,10

Джерело: розроблено авторами

Оцінка отриманої залежності зміни інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  вказує на те, що у межах напрацювання 140 – 160 тис. км вона починає істотно зростати. Отже, заміну цього датчика на новий слід здійснювати при досягненні вказаного напрацювання, тому

що наступна експлуатація транспортного засобу без заміни з високою ймовірністю спричинить відмову.

Зважаючи на періодичність технічного обслуговування автомобілів та тракторів слід здійснювати заміну датчика тиску наддуву при виконанні планового ТО.

Аналогічним способом було встановлено рекомендовані напрацювання для заміни інших датчиків ЕСУ (табл. 2).

Таблиця 2 - Рекомендовані величини напрацювання до заміни елементів ЕСУ

Елемент ЕСУ	Середнє значення напрацювання до відмови, тис. км	Рекомендовані значення напрацювань до заміни, тис. км. (при регламентній періодичності ТО – 10 тис. км)
Датчик положення колінчастого валу	177,8	170
Датчик тиску палива	184,3	180
Датчик тиску наддуву	155,5	150
Датчик фаз (положення розподільного валу)	193,7	180
Датчик температури охолоджувальної рідини	178,5	160
Лямбда зонд (датчик кисню)	122,4	130

*Джерело: розроблено авторами*

Такий підхід дозволить скоротити час на проведення діагностичних операцій елементів ЕСУ, в разі виходу їх з ладу.

Недоліками даного методу можливо вважати потребу вести облік проведення робіт із заміни датчиків та прив'язку конкретного автомобіля чи трактора до одного сервісного пункту. Також, потрібно мати базу даних, що містить граничні напрацювання елементів ЕСУ для всіх автомобілів та тракторів.

### **Висновки.**

1. Аналіз наукових публікацій показав, що для зменшення часу на виконання ТО і ремонтів електронних систем управління слід здійснювати прогнозування остаточного ресурсу складових частин ЕСУ транспортних засобів при виконанні чергового ТО, з метою наступного зменшення трудомісткості проведення діагностування та поточного ремонту, тобто операції, які проводяться при ТО або при ремонті повинні включати прогнозування залишкового ресурсу структурних складових електронної системи управління.

2. Для деяких найважливіших елементів ЕСУ транспортних засобів пропонується використовувати метод їх заміни при досягненні певного напрацювання в км або мото-годинах, а не при виході з ладу. Такий спосіб регламентної заміни елементів дасть можливість знизити простої машин в ремонті та зменшить час, що витрачається на пошук несправностей при виході з ладу складових ЕСУ.

3. Запропоновано спосіб встановлення конструктивних елементів, що обмежують надійність ЕСУ з урахуванням рівня впливу їх відмов на техніко-економічні показники двигуна та величини витрат на відновлення її працездатності. Наявність таких даних є основою для підтримання ЕСУ у працездатному стані.

4. Розроблений алгоритм пошуку прихованих несправностей конструктивних елементів підсистем ЕСУ, що включає прогнозування виходу з ладу елементів ЕСУ та дозволить знизити трудомісткість діагностичних операцій при проведенні ТО та ремонтів.

## Список літератури

1. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин: підручник. Київ: Либідь, 2003. 424 с.
2. Загальний підхід до формування моделей оцінювання технічного стану автомобіля в умовах експлуатації / Волков В. П. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. №1. С. 27–37.
3. Аулін В. В., Панарін Д. Є. Удосконалення процесу технічного обслуговування автомобілів з використанням методів дистанційної електронної діагностики. *Машинобудування і транспорт*. 2014. Вип. 4. С. 88-91.
4. Хайменов О., Осін Р., Красота М. Дослідження шляхів підвищення ефективності технічних обслуговувань та ремонтів електронних систем автомобілів. *Збірник праць молодих науковців*. 2024. Вип. 14. С. 32-38.
5. Manasa K. V., Shashidhara K. S., Vinayaka Kulkarni Ananth Rao. Automation for Vehicle Communication Diagnostics. *IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference*, 16-17 October 2022. doi: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972561
6. Komorska I.M., Wołczyński Z., Borczuch A.D. Diagnosis of sensor faults in a combustion engine control system with the artificial neural network. *Diagnostyka*. 2019. № 20(4). P. 19-25. doi:10.29354/diag/110440.
7. Abdulaev E. K., Makharatkin P. N., Shihov A. I. Diagnostic methods and tools for truck parts and components. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Т. 1384, №. 1. P. 012001.
8. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : навч. посіб. / Форнальчик С.Ю., Олісевич М. С., Мاستикаш О. Л., Пельо Р. А. Львів : Афіша, 2004. 492 с.
9. Технічна експлуатація автомобілів: навч. посіб. / Дембіцький В.М., Павлюк В.І., Придюк В.М. Луцьк: Луцький НТУ, 2018. 473 с.
10. Коваленко В. М., Шуріхін В. К. Діагностика і технологія ремонту автомобілів : підручник. Київ : Літера ЛТД, 2017. 224 с.

## References

1. Kanarchuk, V. Ye., Polians'kyj, S. K. & Dmytriiev, M. M. (2003). *Nadijnist' mashyn [Reliability of machines]*. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
2. Volkov, V. P. et al. (2019). *Zahal'nyj pidkhyd do formuvannia modelej otsiniuvannia tekhnichnoho stanu avtomobilia v umovakh ekspluatatsii [A general approach to the formation of models for evaluating the technical condition of a car in operating conditions]*. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu - Herald of mechanical engineering and transport, 1*, 27-37 [in Ukrainian].
3. Aulin, V. V. & Panarin, D. Ye. (2014). *Udoskonalennia protsesu tekhnichnoho obsluhovuvannia avtomobiliv z vykorystanniam metodiv dystantsijnoi elektronnoi diahnostryky [Improving the process of car maintenance using methods of remote electronic diagnostics]*. *Mashynobuduvannia i transport - Mechanical engineering and transport, 4*, 88-91 [in Ukrainian].
4. Khajmenov, O., Osin, R. & Krasota, M. (2024). *Doslidzhennia shliakhiv pidvyschennia efektyvnosti tekhnichnykh obsluhovuvan' ta remontiv elektronnykh system avtomobiliv [Research of ways to improve the efficiency of technical services and repairs of electronic systems of cars]*. *Zbirnyk prats' molodykh naukovtsiv - Collection of works of young scientists, 14*, 32-38 [in Ukrainian].
5. Manasa K. V., Shashidhara K. S. & Vinayaka Kulkarni Ananth Rao (2022). *Automation for Vehicle Communication Diagnostics. IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference*. 16-17 October 2022. doi: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972561. [in English].
6. Komorska, I.M., Wołczyński, Z. & Borczuch, AD (2019). *Diagnosis of sensor faults in a combustion engine control system with the artificial neural network. Diagnostyka. 20(4)*, 19-25. doi:10.29354/diag/110440 [in English].
7. Abdulaev, E. K., Makharatkin, P. N. & Shihov A. I. (2019). *Diagnostic methods and tools for truck parts and components. Journal of Physics: Conference Series, 1384, 1*, 012001 [in English].
8. Fornal'chuk, Ye.Yu., Olyshevych, M. S., Mastykash, O. L. & Pel'o, R. A. (2004). *Tekhnichna ekspluatatsiia ta nadijnist' avtomobiliv [Technical operation and reliability of cars]*. L'viv : Afisha [in Ukrainian].
9. Dembits'kyj, V.M., Pavliuk, V.I. & Prydiuk, V.M. (2018). *Tekhnichna ekspluatatsiia avtomobiliv [Technical operation of cars]*. Luts'k: Luts'kyj NTU [in Ukrainian].
10. Kovalenko, V. M. & Schurikhin, V. K. (2017). *Diahnostryka i tekhnolohiia remontu avtomobiliv [Diagnostics and technology of car repair]*. Kyiv : Litera LTD [in Ukrainian].

Mykhailo Krasota, Assoc. Prof., Phd tech. sci Yuriy Kuleshkov, Prof. DSc., Igor Shepelenko, Prof. DSc., Ruslan Osin, Assoc. Prof., Phd tech. sci, Timofey Rudenko, Assoc. Prof., Phd tech. sci, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

### The research of ways of efficiency increasing of electronic car system diagnostic operations

The purpose of this study is to find ways to reduce production time spent on diagnostic operations during maintenance or repair of electronic control systems (ECS) in automotive vehicles.

Existing methods of diagnosing engine control systems in vehicles are sufficiently effective, but in most cases, they require highly skilled personnel, the use of additional complex and expensive equipment, prolonged service cycles, which in turn increases the complexity of maintenance, and also does not provide for prior prediction of faults and system failures.

Analysis of scientific publications has shown that to reduce the time for maintenance and repair of electronic systems, it is necessary to predict the residual life of ECS components in vehicles during maintenance, to further reduce the labor intensity of diagnostics and current repairs. In other words, diagnostics performed during maintenance or repair should include predicting the residual life of electronic system components.

For the most critical ECS components in vehicles, it is proposed to apply a strategy of replacing them upon reaching a certain mileage, rather than upon failure. This organization method will reduce vehicle downtime in repair and reduce the time to troubleshoot ECS component failures.

A method has been proposed for identifying design elements that limit the reliability of the ECS, taking into account the degree of influence of their failures on the engine's technical and economic characteristics and the cost of restoring its performance. The availability of such information is the basis of the ECS maintainability support system.

An algorithm has been developed to search for hidden faults in the components of ECS subsystems, which includes predicting the failure of ECS components. This will help reduce the labor intensity of diagnostic operations during maintenance and repair.

**diagnostics, tractor equipment, electronic control system, operational efficiency, maintenance, repair**

Одержано (Received) 10.01.2024

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2024

Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024

УДК 621.891+539.538:621

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.151-164](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.151-164)

В.В. Аулін<sup>1</sup>, проф., д-р техн. наук, О.В. Кузик<sup>1</sup>, доц., канд. техн. наук, С.В. Лисенко<sup>1</sup>, доц., канд. техн. наук, А.Б. Гупка<sup>2</sup>, доц., канд. техн. наук, А.В. Гриньків<sup>1</sup>, ст. дослідник, канд. техн. наук, І.В. Жилова<sup>1</sup>, асист.

<sup>1</sup> Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: AulinVV@gmail.com

<sup>2</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: gupkab@gmail.com

## Методика розрахунку основних характеристик підшипників ковзання систем і агрегатів автомобілів та аналізу їх трибологічної ефективності

Запропоновано методику розрахунку основних характеристик підшипників ковзання систем і агрегатів автомобілів. Зазначений методичний підхід є важливим при оцінці показників трибологічної ефективності спряжень деталей, вузлів, систем і агрегатів та експлуатаційної надійності автомобілів в цілому.

Модель спрацювання підшипника дає можливість сформулювати заходи щодо підвищення трибологічної ефективності спряжень деталей та рівня експлуатаційної надійності вузлів, систем і агрегатів і автомобілів в цілому. Крім цього параметри моделі спрацювання реагують і на режими тертя.

© В.В. Аулін, О.В. Кузик, А.Б. Гупка, А.В. Гриньків, І.В. Жилова, 2024

Показано, що підвищити трибологічну ефективність підшипника ковзання можливо конструкторськими, технологічними та експлуатаційними методами.

Наведені основні формули, що дають можливість розробити алгоритми розрахунку сукупності характеристик підшипника: контактний тиск, напруження, міцність, опір ковзанню, знос, ресурс. Для цього використовуються величини: коефіцієнти піддатливості та відносне навантаження, кут контакту, контактні тиски, контактні переміщення та напружений стан в зоні контакту.

До розробленої методики і алгоритму залучені геометричні і силові параметри підшипника. Враховуються також і режими тертя та характер і величина навантаження на підшипник.

**підшипник ковзання, характеристика, трибологічна ефективність, модель спрацювання, знос, ресурс підшипника**

**Постановка проблеми.** При експлуатації автомобілів 80...90% їх відмов становлять відмови через процеси тертя та зношування в спряженнях деталей вузлів, систем та агрегатів. Удосконалення машин, підвищення їх надійності відбувається підвищенням трибологічної ефективності трибоспряжень деталей конструкційними, технологічними та експлуатаційними методами. При цьому важливим є розрахунок основних характеристик трибо спряжень деталей, в тому числі підшипників ковзання. Важливим є методичний підхід до цього розрахунку і розроблення самої методики, моделі й алгоритму. Розрахунки в поєднанні з випробуванням зразків і деталей на машинах тертя, стендах є ефективним інструментом удосконалення вузлів, систем і агрегатів машин, підвищення їх експлуатаційної надійності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У підвищенні трибологічної ефективності спряжень деталей конструкційними методами зниження зносу відбувається за рахунок вибору раціональних форм корпусу, втулок, подачі мастила у зону тертя та ін.. До цього можна віднести різноманітні рекомендації, нормативи і стандарти. Використання останніх є доцільним, якщо вони дають правильно спроектувати підшипник. Конструкційні методи цієї групи слід шукати у довідниках з проєктування деталей машин [1-3]. При цьому важливі основи конструювання опор ковзання [4,11,12].

До другої групи конструкційних методів відносять методи удосконалення конструкції поверхні. Це є методи конструювання системи підведення й утримання на поверхні зразків і деталей мастильних матеріалів за допомогою мікро- і макроканавок [5].

Технологічні методи підвищення трибологічної ефективності підшипників ковзання полягають у створенні і вибору зносостійких матеріалів та способів їх зміцнення. Інформація і загальні рекомендації з вибору зносостійких матеріалів викладені в роботах [5-7,26,27].

За окремими видами антифрикційних та зносостійких матеріалів є спеціальна література [8-10]. Найбільш ефективним для підвищення зносостійкості є полімерні і порошкові композити [13-15,19].

Серед експлуатаційних методів підвищення трибологічної ефективності спряжень деталей є методи вдосконалення умов і режимів змащення [16,17].

При гідродинамічному змащенні шляхом оптимізації параметрів роботи реалізується гідродинамічний режим, а при граничному терті (граничному змащенні) процес підвищення трибологічної ефективності набагато складніший: вдосконалюється змащення за рахунок різного роду присадок до мастил [18].

Методи поліпшення умов змащення викладені в роботах Ауліна В.В. [4,15,20,21], Дихи О.В. [17,18,22], Войтова В.А. [11,16] та інших. В цих роботах йде мова й про присадки і добавки до мастильних матеріалів.

Умови роботи підшипника починаються з кінематичного і силового аналізів механізмів, в яких працює підшипник. Ці методи добре вивчені в теорії машин і

механізмів [22-25]. У процесі кінематичного аналізу встановлюються сумарні сили, що діють на підшипник, відносні переміщення (ковзання) поверхонь тертя в контактї, швидкості ковзання поверхонь контакту. Зазначене є істотно важливим для подальших розрахунків: сили – для визначення контактних тисків; відносного ковзання – для визначення шляху тертя однієї і іншої поверхонь; швидкості ковзання – для визначення умов змащення.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка методики розрахунку основних характеристик підшипника ковзання систем і агрегатів машин та аналізу їх трибологічної ефективності.

**Виклад основного матеріалу.** При усталеному процесі зношування, постійній площі контакту (ППК) та постійному навантаженні на спряження "ролик-колодочка", рівняння спрацювання (модель спрацювання) має вигляд:

$$\frac{du}{dL} = k_u p_u^{m_u}, \quad (1)$$

де  $u$  – знос, м;  $L$  – шлях тертя, м;

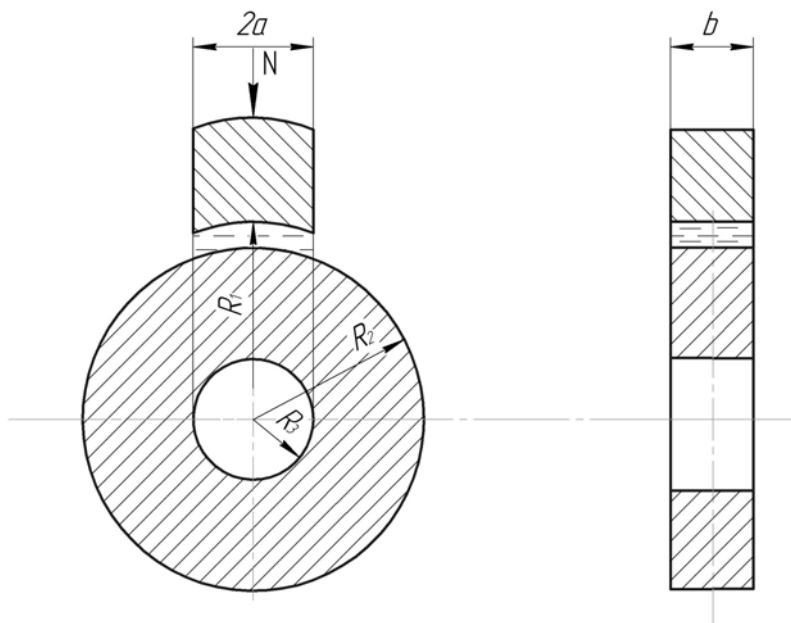
$p_u$  – тиск на спряження зразків і деталей, Па;

$k_u, m_u$  – параметри моделі спрацювання спряження.

Розрахунок моделі полягає у визначенні параметрів спрацювання.

Традиційні лабораторні випробування на знос на машинах тертя з метою визначення цих параметрів проводяться при постійній площі контакту, постійному навантаженні  $N_p (N_p = const)$ , а отже, при постійному тиску  $p (p = const)$ .

Випробування за цією моделлю звичайно проводяться на машині тертя СМЦ-2 за схемою: "обертовий ролик – нерухома колодочка" (рис. 1).



$2a$  – довжина;  $b$  – ширина контакту;  $R_1$  – радіус контактної поверхні;  
 $R_2, R_3$  – зовнішній та внутрішній радіуси ролика

Рисунок 1 – Розрахункова схема лабораторних випробувань спряження зразків "ролик-колодочка"

Джерело: розроблено авторами

При постійному навантаженні  $N = const$  розв'язок для рівняння (1), після інтегрування, дорівнює:

$$u = k_u p_u^{m_u} L. \quad (2)$$

Якщо випробовування на спрацювання проводити при двох навантаженнях  $N_1$ ,  $N_2$ , то їм відповідають тиски:

$$p_{u1} = \frac{N_1}{S_k} = \frac{N_1}{2ab}; \quad p_{u2} = \frac{N_2}{S_k} = \frac{N_2}{2ab}, \quad (3)$$

де  $a, b$  – розміри площі контакту (рис. 1);  
 $S_k$  – площа, м.

При усталеному зношуванні згідно виразу (2) маємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= k_u p_1^{m_u} L \\ u_2 &= k_u p_2^{m_u} L \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

з якої визначають параметр  $m$ :

$$m_u = \frac{\ln\left(\frac{u_1}{u_2}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}. \quad (5)$$

При різних тисках навантаження значення параметра  $m$  можна усереднити:

$$\bar{m}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{ui}, \quad (6)$$

де  $n$  – число випробувань.

Знаючи параметр  $m_u$  моделі спрацювання спряжень зразків та деталей, з системи рівнянь (4) визначають другий параметр  $k_u$ :

$$k_u = \frac{u_1}{p_1^{m_u} L_1}. \quad (7)$$

Якщо при випробуваннях використовується більше двох навантажень на трибоспряження зразків, то параметр  $k_u$  також усереднюється:

$$\bar{k}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ui}. \quad (8)$$

Зазначимо, що усереднення можливе з використанням методу найменших квадратів.

Модель спрацювання (1) при порівнянні матеріалів зразків і деталей за зносостійкістю зручно представити в безрозмірній формі:

$$\frac{du}{dL} = k \left( \frac{p}{p_u} \right)^{m_u}, \quad (9)$$

де  $\frac{p}{p_u}$  – характерні відносні контактні тиски.

Це можуть бути: тиски, при яких проведені випробовування; тиски, при яких працює спряження; границя текучості матеріалу; модуль пружності матеріалу і т.д.

Якщо заздалегідь не обговорено характер тиску, то вважають, що  $\bar{p}_u$  – середній тиск випробовувань по визначенню параметрів  $k_u, m_u$  моделі спрацювання зразків та деталей.

Між величинами  $k$  і  $k_u$  у моделях (1) і (9) існує зв'язок:

$$k = k_u (p_u)^{m_u}. \quad (10)$$

Для розрахунку основних характеристик підшипника ковзання використаємо схему, що представлена на рис. 2.

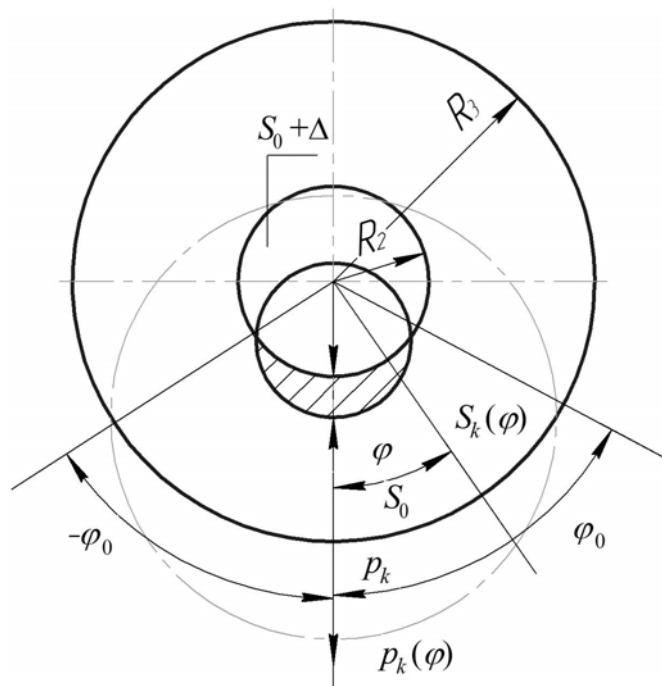


Рисунок 2 – Схема для розрахунку характеристик підшипника ковзання

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо систему позначень геометричних, силових та фізичних факторів:

$R_1$  – радіус контактної поверхні вала, м;

$R_2$  – радіус зовнішньої поверхні втулки, м;

$R_3$  – радіус внутрішньої робочої контактної поверхні втулки, м;

$l$  – довжина втулки по твірній, м;

$\Delta = R_1 - R_2$  – радіальний зазор у спряженні, м;

$\varphi$  – поточна кутова координата;

$2\varphi_0$  – повний кут контакту під навантаженням;

$S_k(\varphi)$  – контактні радіальні переміщення точок підшипника, м;

$S_0$  – максимальне контактне переміщення, зсув центра вала під навантаженням

$N$ ;

$N_e$  – навантаження на одиницю довжини робочої частини втулки по твірній (погонне навантаження),  $N_e = N_u/l$ , Н/м;

$N$  – повне навантаження на підшипник, Н;

$p_k$  – контактні тиски в підшипнику, МПа;

$p_{k\max}$  – максимальні контактні тиски, МПа;

$\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z, \tau_{r\varphi}$  – радіальна, кутова, осьова та тангенціальна компоненти тензора напруження, що діють у підшипнику;

$\sigma_T$  – границя текучості матеріалу втулки;

$E_1, \mu_1, E_2, \mu_2$  – модулі пружності та коефіцієнти Пуассона матеріалів валу та втулки.

Розподіл контактних тисків  $p_k(\varphi)$  вздовж кута контакту  $\pm \varphi_{\max}$  визначається за виразами:

$$p_k(\varphi) = \frac{\Delta}{k_1^n + k_2^n} \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_{\max}} - 1 \right), \quad (11)$$

де  $k_1^n, k_2^n$  коефіцієнти піддатливості для валу і втулки.

Максимальний контактний тиск при  $\varphi = 0$  дорівнює:

$$p_{k_{\max}}(\varphi) = \frac{\Delta}{k_1^n + k_2^n} \left( \frac{1}{\cos \varphi_{\max}} - 1 \right). \quad (12)$$

Усереднене значення контактного тиску становить:

$$\bar{p}_k(\varphi) = \frac{(k_1^n + k_2^n) p_k(\varphi)}{\Delta}. \quad (13)$$

Враховуючи максимальний контактний тиск, розподіл тиску по площадці контакту можна оцінити за виразом:

$$p_k(\varphi) = p_{k_{\max}} \frac{\cos \varphi - \cos \varphi_{\max}}{1 - \cos \varphi_{\max}}. \quad (14)$$

де кут контакту  $2\varphi_{\max}$  визначають з рівняння:

$$\frac{N(\bar{k}_1^n + \bar{k}_2^n)}{R_2 \Delta} = \frac{\varphi_{\max}}{\cos \varphi_{\max}} - \sin \varphi_{\max}. \quad (15)$$

Або з рівняння:

$$\frac{\bar{N}}{N} = \frac{\varphi_{\max}}{\cos \varphi_{\max}} - \sin \varphi_{\max}, \quad (16)$$

де

$$\bar{N}_p = \frac{N(\bar{k}_1^n + \bar{k}_2^n)}{R_2 \Delta}.$$

У залежності від необхідної точності рішення трансцендентного рівняння (15) або (16) відносно кута контакту  $\varphi_{\max}$  має вигляд:

$$\varphi_{\max} = 1,13 \left( \frac{\bar{N}_p}{N_p} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,13 \left( \frac{\bar{N}_p}{N_p} \right). \quad (17)$$

Усереднені коефіцієнти піддатливості кільцевого шару вала і втулки визначаються залежностями:

$$\begin{aligned} & \text{– у випадку } E_1 \ll E_2, & \bar{k}_1^n &= 0, \\ & \text{– для плоскої деформації:} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\bar{k}_1^n = \frac{(1 - 2\mu_1)(1 + \mu_1)R_1}{E_1}, \quad (19)$$

– для плоского напруженого стану:

$$\bar{k}_1^n = \frac{(1 - \mu_1)R_1}{E_1}, \quad (20)$$

– у випадку плоскої деформації (довга втулка,  $l \geq (R_3 - R_2) \approx R$ ):

$$\bar{k}_2^n = \frac{(1 - 2\mu_2)(1 + \mu_2) \left[ \left( \frac{R_3}{R_2} \right)^2 - 1 \right] R_2}{E_2 \left[ 1 + (1 - 2\mu_2) \left( \frac{R_3}{R_2} \right)^2 \right]}, \quad (21)$$

– у випадку плоского напруженого стану (коротка втулка,  $l \approx R_3 - R_2$ ):

$$\bar{k}_2^n = \frac{(1 - 2\mu_2) \left[ \left( \frac{R_3}{R_2} \right)^2 - 1 \right] R_2}{E_2 \left[ (1 + \mu_2) + (1 - 2\mu_2) \left( \frac{R_3}{R_2} \right)^2 \right]}. \quad (22)$$

Радіальні сумарні контактні переміщення вала і втулки визначають за виразом:

$$S(\varphi) = (\bar{k}_1^n + \bar{k}_2^n) p_k(\varphi), \quad (23)$$

або

$$S(\varphi) = \Delta \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_{\max}} - 1 \right). \quad (24)$$

Максимальні контактні переміщення або зміщення вала дорівнюють:

$$S_{\max} = \Delta \left( \frac{1}{\cos \varphi_{\max}} - 1 \right). \quad (25)$$

Напружений стан у найбільш навантаженій точці підшипника можна оцінити, визначивши компоненти:  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\varphi$ ,  $\sigma_z$ :

$$\sigma_z = \sigma_0, \quad (26)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{1 - 0,4 \left( \frac{R_3}{R_2} \right)^2}{1 + 0,4 \left( \frac{R_3}{R_2} \right)^2} \sigma_r, \quad (27)$$

або

$$\sigma_\varphi = \mu_2 \sigma_r. \quad (28)$$

Для плоскої деформації маємо:

$$\sigma_z = \mu_2(\sigma_r + \sigma_\varphi) \quad (29)$$

Запас міцності  $n_{zm}$  оцінюється за формулою:

$$n_{zm} = \frac{\sigma_T}{\sigma_o - \sigma_\varphi} = \frac{\sigma_T}{\sigma_o(1 - \mu_2)} \quad (30)$$

При цьому умова пластичності матиме вигляд:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_T}{(1 - \mu_2)n_{zm}}, \quad (31)$$

де  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу підшипника.

Наведені формули дають можливість розробити алгоритм розрахунку сукупності характеристик: тиск, напруження, міцність, опір ковзання, знос, ресурс підшипників ковзання.

Спочатку визначаються допоміжні величини: коефіцієнти піддатливості та відносне навантаження, кут контакту, контактні тиски, контактні переміщення та напружений стан в зоні контакту.

Коефіцієнти піддатливості  $k_1^n$  і  $k_2^n$  оцінюють за виразами (18)-(22).

Безрозмірне навантаження  $\frac{N_p}{N_p}$  визначають за формулою (16).

Максимальний кут контакту  $\varphi_{0max}$  оцінюють за формулою (17).

Максимальний контактний тиск  $p_k$  визначають за формулою (12).

Функцію контактних тисків представлено за формулою (14).

Максимальне контактне переміщення  $S_{max}$  оцінюється за формулою (25).

Функцію переміщень визначають за формулою (24).

Напружений стан розраховується як тангенціальне напруження  $\sigma_0$  в точці  $\varphi \approx 0$  за формулами (27) або (28).

Після цього здійснюється аналіз впливу різних факторів на напружений стан і коефіцієнт запасу міцності за пластичністю, використовуючи формулу (31).

За математичною моделлю (1) можливо розрахувати опори ковзанню, знос і ресурс підшипника ковзання.

При цьому умова суцільності в контакті має вигляд функції зносу від шляху тертя:

$$u(L) = \Delta \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_{max}} - 1 \right) \quad (32)$$

Умову рівноваги математично можливо представити наступним чином:

$$N_p = R \int_{-\varphi_{max L}}^{\varphi_{max L}} \sigma(\varphi, S) (\cos \varphi) d\varphi, \quad (33)$$

де  $2\varphi_{max}(L)$  – кут контакту, що залежить від шляху тертя  $L$ .

Представимо процедуру розрахунку підшипника ковзання в загальному вигляді.

Диференціюючи функцію зносу (32) за  $L$ , та враховуючи рівняння зношування (1), маємо:

$$k_u p^{m_u} = \Delta \frac{\sin \varphi_{\max L}}{\cos \varphi_{\max L}} \cos \varphi \frac{d\varphi_{\max L}}{dL}. \quad (34)$$

Визначаємо з рівняння (34) тиск:

$$p = \left( \frac{\Delta \sin \varphi_{\max L}}{k_u \cos \varphi_{\max L}} \frac{d\varphi_{\max L}}{dL} \cos \varphi \right)^{\frac{1}{m_u}}. \quad (35)$$

Підставляючи вираз (35) в умову рівноваги (33), одержуємо диференціально-інтегральне рівняння:

$$\frac{N_p}{R} = \left( \frac{\Delta \sin \varphi_{\max}}{k_u \cos^2 \varphi_{\max}} \frac{d\varphi_{\max}}{dL_2} \right)^{\frac{1}{m_u}} \left( \int_{-\varphi_{\max L}}^{\varphi_{\max L}} (\cos \varphi)^{\frac{1}{m_u}+1} d\varphi \right), \quad (36)$$

або

$$\left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} \frac{k_u}{\Delta} L = \frac{\sin \varphi_{\max}}{\cos^2 \varphi_{\max}} \left( \int_{-\varphi_{\max L}}^{\varphi_{\max L}} (\cos \varphi)^{\frac{1}{m_u}+1} d\varphi \right) d\varphi_{\max L}. \quad (37)$$

Розв'язуючи ці рівняння, маємо:

$$\left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} \frac{k_u}{\Delta} L = \int \frac{\sin \varphi_{\max L}}{\cos^2 \varphi_{\max L}} \left( \int_{-\varphi_{\max L}}^{\varphi_{\max L}} (\cos \varphi)^{\frac{1}{m_u}+1} d\varphi \right) d\varphi_{\max L} + C. \quad (38)$$

Якщо підінтегральний вираз рівняння (38) розкласти у степеневий ряд, то у першому наближенні після інтегрування одержимо:

$$\frac{N_p}{R} \frac{k_u L}{2^{m_u} \Delta} = \frac{\varphi_{\max L}^{m_u+2}}{m_u+2} + C. \quad (39)$$

Постійну інтегрування визначають з умови піддатливості:

$$\varphi_{\max L} (L=0) = \varphi_{\max}, \quad (40)$$

де  $\varphi_{\max}$  – початковий кут контакту.

Підставляючи (40) у (39), одержуємо вираз для оцінки сталої інтегрування:

$$C = -\frac{\varphi_{\max}^{m_u+2}}{m_u+2}. \quad (41)$$

Після підстановки (41) у (39) маємо залежність поточного кута контакту від шляху тертя та інших параметрів моделі спрацювання підшипника ковзання:

$$\varphi_{\max L} = \left[ \left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} \frac{k_u (m_u+2)}{2^{m_u} \Delta} L + \varphi_{\max}^{m_u+2} \right]^{\frac{1}{m_u+2}}. \quad (42)$$

При наявності кута контакту максимальну величину зносу можна визначити за виразом:

$$u = \Delta \left( \frac{1}{\cos \varphi_{\max L}} - 1 \right). \quad (43)$$

З рівняння (32) з урахуванням виразу (42), маємо:

$$\frac{d\varphi_{\max L}}{dL} = \frac{1}{m_u+2} \left[ \left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} \frac{k_u (m_u+2)}{2^{m_u} \Delta} L + \varphi_{\max}^{m_u+2} \right]^{\frac{1}{m_u+1}-1}. \quad (44)$$

Залежність контактного тиску від шляху тертя, кута контакту й інших параметрів отримаємо, підставивши вираз (42) у (35):

$$p_k = \left[ \frac{\Delta}{k_u} \frac{\sin \varphi_{\max L}}{\cos^2 \varphi_{\max L} (m_u + 2)} \cdot \left[ \left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} \frac{k_u (m_u + 2)}{2^{m_u} \Delta} L + \varphi_{\max}^{m_u+2} \right]^{\frac{1}{m_u+1}-1} \right]^{\frac{1}{m_u}}, \quad (45)$$

або

$$p_k = \Phi(\varphi_{\max L}, \Delta, k_u, N_p, R, m_u, L, \varphi_{\max}) \cos \varphi_{\max}^{\frac{1}{m_u}}, \quad (46)$$

де

$$\Phi = \frac{\Delta}{k_u} \frac{\sin \varphi_{\max L}}{\cos^2 \varphi_{\max L} (m_u + 2)},$$

$$\varphi_{\max L} \left[ \left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} \frac{k_u (m_u + 2)}{2^{m_u} \Delta} L + \varphi_{\max}^{m_u+2} \right]^{\left( \frac{1}{m_u+1}-1 \right) \frac{1}{m_u}}.$$

Ресурс підшипника можна визначити, задавши максимальний припустимий зазор  $\Delta_{\max}$ , і визначивши гранично припустимий знос:

$$u_{\lim} = \Delta_{\max} - \Delta. \quad (47)$$

З виразу для кута контакту (42) можна знайти вираз шляху тертя через кут контакту:

$$L = \frac{\Delta(\varphi_{\max L}^{m_u+2} - \varphi_{\max}^{m_u+2}) 2 m_u}{k_u \left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} (m_u + 2)}. \quad (48)$$

Прирівнюючи (47) і (48), одержують вираз для гранично припустимого кута контакту:

$$\varphi_{\max L}^{\lim} = \arccos \left( \frac{\Delta}{u_{\lim} + \Delta} \right). \quad (49)$$

Підставляючи далі цей вираз в (48), маємо вираз для визначення ресурсу підшипника:

$$L = \left[ \left( \frac{\Delta}{u_{\lim} + \Delta} \right)^{m_u+2} - \varphi_{\max}^{m_u+2} \right] \frac{2^{m_u} \Delta}{k_u \left( \frac{N_p}{R} \right)^{m_u} (m_u + 2)}. \quad (50)$$

Якщо прийняти  $\varphi_{\max} \approx 0$ , то співвідношення (42), (48), і (50) істотно спрощуються.

При визначенні величини зносу підшипника, спочатку визначають початковий кут  $\varphi_{\max}$ , далі за виразом (42) визначають поточний кут контакту і за виразом (43) визначають максимальну величину поточного зносу. Розраховуючи ресурс підшипника ковзання враховують початковий кут  $\varphi_{\max}$ , а за виразом (50) визначають ресурс, що відповідає його граничному зносу  $u_{\lim}$ .

Методом порівняльного аналізу результатів випробувань підшипників на машинах тертя і стендах за визначеними триботехнічними характеристиками встановлюється їх трибо логічна ефективність і проводиться відповідний аналіз.

Висновки.

1. З'ясовано модельний підхід (модель спрацювання підшипника) до методики розрахунку підшипника за лабораторними випробуваннями зразків "ролик-колодочка"

на машині тертя СМЦ-2.

2. Виявлена сукупність геометричних, силових і фізичних факторів у схемі для розрахунку характеристик підшипника ковзання.

3. Розглянуто вирази для розподілу контактних тисків вздовж кута контакту, їх максимальних та усереднених значень, усереднені коефіцієнти піддатливості кільцевого шару вала і втулки, радіальні сумарні контактні переміщення вала і втулки, їх максимальне значення, напружений стан у найбільш навантаженій точці підшипника.

4. Розроблено алгоритм розрахунку допоміжних та основних характеристик підшипника ковзання. З'ясовуються умови суцільності та рівноваги в контакті. Одержується диференціально-інтегральне рівняння роботи підшипника та одержується залежність поточного кута контакту від шляху тертя та інших параметрів моделі спрацювання підшипника ковзання.

5. Показано, що трибологічну ефективність підшипників ковзання встановлюють методом порівняльного аналізу триботехнічних характеристик, визначених за результатами випробувань на машинах тертя і стенді.

## Список літератури

1. ДСТУ 3012-95 Підшипники кочення та ковзання. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01.01]. Київ, 1996.
2. ГОСТ ISO 12301-95 Підшипники ковзання. Методи контролю геометричних показників і показників якості матеріалів.
3. ГОСТ ИСО 4386-2-99 Підшипники ковзання. Металеві багатошарові підшипники ковзання. Руйнівні випробування міцності з'єднання антифрикційного шару і основи.
4. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. Львів: Афіша, 2003. 560 с.
5. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування / Фролов Є.А., Кравченко С.І., Попов С.В., Гнітько С.М. Полтава, 2019. 204 с.
6. Горкуша А.Ю., Молчанов О.Д., Стедляк В.Г. Підвищення несучої здатності підшипників ковзання поліпшенням теплового балансу робочих зон. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2004. Вип. 71. С.151-159.
7. Кіндрацький Б.І., Сулим Г.Т. Рациональне проектування машинобудівних конструкцій: монографія. Львів: КІНПАТРИ ЛТД. 2003. 280 с.
8. Новіков Ф.В. Теорія високоякісної обробки деталей машин : монографія. Х. : Вид. ХНЕУ. 2013. 384 с.
9. Малащенко В.О., Ніколайчук В.В., Тимейчук О.Ю. З'єднання змінної жорсткості: монографія. Рівне: НУВГП, 2020. 97 с.
10. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин: Довідник. Вид. 3-тє, випр. і доп. Хмельницький : ХНУ. 2013. 59 с.
11. Al-Quraan T.M.A., Alfaqs F., Haddad J., Vojtov V., Voitov A., Kravtsov A. et al. Methodological Approach to Assessing the Tribological Properties of Lubricants Using a Four-Ball Tribometer. *Lubricants*. 2023. 11. 457 p.
12. Савуляк В.І., Губанов А.В. Характеристики тертя спокою в підшипниках ковзання шестеренної гідромашини. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2005. № 2. С. 81-85.
13. Савуляк В. І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2002. 161 с.
14. Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Krutous D., & Muranov E. Development of a system for diagnosing bearing assemblies with polymer parts during operation. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. 5(1(55), P.18-20.
15. Аулін В. В., Диха О. В., Лисенко С. В., Гриньків А. В. Вплив режиму мащення на триботехнічні характеристики поверхні спряжень деталей дизелів автомобілів. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту* : міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 14-15 листоп. 2018 р., м. Кропивницький. 2018. С. 218-240.
16. Vojtov, V.A., Kravtsov, A.G. & Tsybal, B.M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics for Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant. *Frict. Wear*. 2020. 41, P.521-525.
17. Wear models and diagnostics of cylindrical sliding tribosystem : monograph / Dykha A. et al. Poland : Foundation of Mechatronics Development, 2020. 196 p.

18. Дискретне зміцнення та зносостійкість циліндричних трибосистем ковзання : монографія / Диха О.В. та ін. Хмельницький : ХНУ. 2016. 197 с.
19. Роїк Т.А., Киричок П.О., Гавриш А.П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації : монографія . К.: НТУУ "КПІ". 2007. 404 с.
20. Aulin, V., Lysenko, S., Hryniv, A., & Pashynskiy, M. Improvement of tribological characteristics of coupling parts "shaft-sleeve" with polymer and polymer-composite materials. *Problems of Tribology*. 2022. 27(3/105). P.96-107.
21. Аулін В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах : монографія. Кіровоград : ТОВ "КОД". 2014. 369 с.
22. Engineering method for calculating the wear of a cylindrical sliding bearings / Dykha O., Babak O., Makovkin O., Dytyniuk V. Actual problems of modern science : monograph / M. Skyba, T. Topolinski, J. Musial, O. Polishchuk (Eds). Bydgoszcz, 2019. P. 277-287.
23. Лавриненко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробні : енциклопедичний довідник / за ред. акад. НАН України М. В. Новікова. К.: Вид. ІНМ ім. В. М. Бакуля, 2013. 456 с.
24. Welsh, R. J. Plain Bearing Design Handbook. Publisher: Butterworth-Heinemann, 1984. 176 p.
25. Вплив технологічних факторів алмазного хонінгування на параметри шорсткості і точності поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин / А. П. Гавриш та ін. *Наукові Вісті НТУУ "КПІ"*. 2014. № 5. С. 59-75.
26. Прогресивні технології механічної обробки : монографія / Новіков Ф. В. та ін. ; за заг. ред. докт. техн. наук, професора Новікова Ф.В. Х. : Вид. ХНЕУ. 2012. 372 с.
27. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування / Фролов Є.А. та ін. Полтава, 2019. 204 с.

## References

1. Pidshyynyky kochennia ta kovzannia. Terminy ta vyznachennia [Rolling and sliding bearings. Terms and definitions]. *DSTU 3012-95 from January 1, 1996* [in Ukrainian].
2. Pidshyynyky kovzannia. Metody kontroliu heometrychnykh pokaznykiv i pokaznykiv yakosti materialiv [Sliding bearings. Methods of control of geometric indicators and indicators of material quality]. *GOST ISO 12301-95* [in Ukrainian].
3. Pidshyynyky kovzannia. Metalevi bahatosharovi pidshyynyky kovzannia. Ruinivni vyprobuvannia mitsnosti z'iednannia antyfryktsiinoho шару i osnovy [Sliding bearings. Metal multi-layer sliding bearings. Destructive tests of the strength of the connection between the anti-friction layer and the base] *GOST ISO 4386-2-99* [in Ukrainian].
4. Pavlyshe, V.T. (2003). *Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalej mashyn [Basics of design and calculation of machine parts]*. L'viv: Afisha [in Ukrainian].
5. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V. & Hnit'ko, S.M. (2019). *Tekhnologichne zabezpechennia iakosti produktsii mashynobuduvannia [Technological quality assurance of mechanical engineering products]*. Poltava [in Ukrainian].
6. Horkusha, A. Yu., Molchanov, O.D. & Stedlianko, V.H. (2004). Pidvyschennia nesuchoi zdatnosti pidshyynykiv kovzannia polipshenniam teplovoho balansu robochykh zon [Increasing the bearing capacity of sliding bearings by improving the thermal balance of the working zones]. *Naukovi pratsi Donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu - Scientific works of the Donetsk National Technical University, 71*, 151-159 [in Ukrainian].
7. Kindrats'kyj, B.I. & Sulym, H.T. (2003). *Ratsional'ne proektuvannia mashynobudivnykh konstruksij [Rational design of machine-building structures]*. Lviv: KINPATRI LTD [in Ukrainian].
8. Novikov, F.V. (2013). *Teoriia vysokoiakisnoi obrobky detalej mashyn [Theory of high-quality processing of machine parts]*. Kh. : Vyd. KhNEU [in Ukrainian].
9. Malashchenko, V.O., Nikolajchuk, V.V. & Tymejchuk, O.Yu. (2020). *Z'iednannia zminnoi zhorstkosti [Joints of variable stiffness]*. Rivne: NUVHP [in Ukrainian].
10. Kinyts'kyj, Ya.T. (2013). *Teoriia mekhanizmiv i mashyn [Theory of mechanisms and machines]*. (3d ed.). Khmel'nyts'kyj : KhNU [in Ukrainian].
11. Al-Quraan, T.M.A., Alfaqs, F., Haddad, J., Vojtov, V., Voitov, A. & Kravtsov, A. et al. (2023). A Methodological Approach to Assessing the Tribological Properties of Lubricants Using a Four-Ball Tribometer. *Lubricants*. 11. 457 p. [in English].
12. Savuliak, V.I. & Hubanov, A.V. (2005). Kharakterystyky tertia spokoju v pidshyynykakh kovzannia shesterennoi hidromashyny [Characteristics of friction at rest in sliding bearings of a gear hydraulic machine]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu - Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 2*, 81-85 [in Ukrainian].

13. Savuliak, V.I. (2002). *Synteza znosostijkykh kompozytsijnykh materialiv ta poverkhnevyykh shariv z ekzotermichnykh komponentiv [Synthesis of wear-resistant composite materials and surface layers from exothermic components]*. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia [in Ukrainian].
14. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hryn'kiv, A., Krutous, D., & Muranov, E. (2020). Development of a system for diagnosing bearing assemblies with polymer parts during operation. *Technology Audit and Production Reserves*. 5(1(55)). P.18-20 [in English].
15. Aulin, V.V., Dykha, O.V., Lysenko, S.V. & Hryn'kiv, A.V. (2018). Vplyv rezhymu maschennia na trybotekhnichni kharakterystyky poverkhni spriazhen' detalej dyzeliv avtomobiliv [The influence of the lubrication mode on the tribotechnical characteristics of the surfaces of the couplings of car diesel parts]. *Innovative technologies for the development and efficiency of road transport : mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf. (14-15 lystop. 2018 r.) - international science and practice internet conference* (pp. 218-240). Kropyvnyts'kyj [in Ukrainian].
16. Vojtov, V.A., Kravtsov, A.G. & Tsymbal B.M. (2020). Evaluation of Tribotechnical Characteristics for Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant. *Frikt. Wear*. 41, P. 521-525 [in English].
17. Dykha, A. et al. (2020). *Wear models and diagnostics of cylindrical sliding tribosystem : monograph*. Poland : Foundation of Mechatronics Development, 196 p. [in English].
18. Dykha, O.V. et al. (2016). *Dyskretne zmitsnennia ta znosostijkist' tsylindrychnykh trybosystem kovzannia [Discrete strengthening and wear resistance of cylindrical sliding tribosystems: monograph]*. Khmel'nyts'kyj : KhNU [in Ukrainian].
19. Roik, T.A., Kyrychok, P.O. & Havrysh, A.P. (2007). *Kompozytsijni pidshypnykovi materialy dlia pidvyschenykh umov ekspluatatsii [Composite bearing materials for increased operating conditions]*. K.: NTUU "KPI" [in Ukrainian].
20. Aulin, V., Lysenko, S., Hryn'kiv, A. & Pashynskyi, M. (2022). Improvement of tribological characteristics of coupling parts "shaft-sleeve" with polymer and polymer-composite materials. *Problems of Tribology*. 27(3/105). P. 96-107 [in English].
21. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh [Physical basis of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]*. Kirovohrad : TOV "KOD" [in Ukrainian].
22. Engineering method for calculating the wear of a cylindrical sliding bearings (2019) / Dykha O., Babak O., Makovkin O., Dytyniuk V. Actual problems of modern science : monograph / M. Skyba, T. Topolinski, J. Musial, O. Polishchuk (Eds). Bydgoszcz. P. 277-287 [in English].
23. Lavrynenko, V.I. & Novikov, M.V. (2013). *Nadtverdi abrazyvni materialy v mekhanoobrobni [Ultra-hard abrasive materials in machining]*. M. V. Novikov (Ed.) K.: Vyd. INM im. V. M. Bakulia [in Ukrainian].
24. Welsh, R. J. (1984). *Plain Bearing Design Handbook*. Publisher: Butterworth-Heinemann. 176 p. [in English].
25. Havrysh, A. P. et al. (2014). Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv almaznoho khoninhuvannia na parametry shorstkosti i tochnosti poverkhon' kompozytnykh pidshypnykiv kovzannia polihrafichnykh mashyn [Influence of technological factors of diamond honing on parameters of roughness and accuracy of surfaces of composite sliding bearings of printing machines]. *Naukovi Visti NTUU "KPI" – Scientific News of NTUU "KPI"*, 5, 59-75 [in Ukrainian].
26. Novikov, F. V. et al. (2012). *Prohresyvni tekhnolohii mekhanichnoi obrobky [Progressive technologies of mechanical processing]*. Novikov F. V. (Ed.). Kh. : Vyd. KhNEU [in Ukrainian].
27. Frolov, Ye.A. et al. (2019). *Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia [Technological quality assurance of engineering products]*. Poltava [in Ukrainian].

**Viktor Aulin**<sup>1</sup>, Prof., DSc., **Oleksandr Kuzyk**<sup>1</sup>, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**<sup>1</sup>, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Hupka**<sup>2</sup>, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Hrinkiv**<sup>1</sup>, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Inna Zhilova**<sup>1</sup>, Assistant

<sup>1</sup>Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

<sup>2</sup>Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

### **Methodology for calculating the main characteristics of sliding bearings of car systems and units and analyzing their tribological efficiency**

A methodology for calculating the main characteristics of sliding bearings of car systems and units is proposed. The specified methodical approach is important when evaluating indicators of tribological efficiency of couplings of parts, nodes, systems and aggregates and operational reliability of cars as a whole.

The bearing activation model makes it possible to formulate measures to increase the tribological efficiency of the couplings of parts and the level of operational reliability of nodes, systems and aggregates, and

cars as a whole. In addition, the parameters of the actuation model also respond to friction modes. It is shown that it is possible to increase the tribological efficiency of the sliding bearing by means of design, technological and operational methods.

The main formulas that make it possible to develop algorithms for calculating a set of bearing characteristics are presented: contact pressure, stress, strength, sliding resistance, wear, resource. For this purpose, the following values are used: compliance coefficients and relative load, contact angle, contact pressures, contact displacements, and the stress state in the contact zone.

The geometric and power parameters of the bearing are involved in the developed methodology and algorithm. Modes of friction and the nature and magnitude of the load on the bearing are also taken into account.

An algorithm for calculating auxiliary and main characteristics of a sliding bearing has been developed. The conditions of continuity and equilibrium in contact are clarified. The differential-integral equation of the operation of the bearing is obtained and the dependence of the current contact angle on the friction path and other parameters of the sliding bearing operation model is obtained. It is shown that the tribological efficiency of sliding bearings is established by the method of comparative analysis of tribotechnical characteristics determined by the results of tests on friction machines and a stand.

**sliding bearing, characteristics, tribological efficiency, operating model, wear, bearing life**

*Одержано (Received) 30.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.165-177](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.165-177)

**В. А. Войтов**, проф., д-р техн. наук, **Н.Г. Бережна**, доц., канд. техн. наук, **І.І. Сисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Войтов**, доц., канд. техн. наук, **Л.Ф. Кривенко**, директор АТП 16363, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук

*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*

*e-mail: vavoitovva@gmail.com*

### Прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності та швидкості руху транспортних потоків

У роботі розроблено методичний підхід прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів, які пов'язані з «годинами пік». Методичний підхід, на відміну від раніше відомих, доповнює відомий критерій робастності, розроблений авторами у попередніх публікаціях, що дозволяє підвищити точність прогнозування виникнення заторів. Запропоновано функції зміни щільності транспортного потоку та швидкості руху транспортних засобів у транспортному потоці, що змінюються у часі. Крім реального часу функції містять змінні параметри у вигляді амплітуди коливань та періоду коливань. Це дозволяє зробити адаптацію моделі прогнозування до реальної дорожньої мережі з урахуванням періоду завантаженості мережі та інфраструктури доріг.

**транспортний потік, прогнозування, динамічна модель, щільність транспортного потоку, швидкість руху, критерій робастності транспортного потоку, амплітуда коливань, період коливань, стійкість транспортного потоку, затор**

**Постановка проблеми.** Вивченню явища навантаження транспортного потоку, особливо на вулицях великих міст, останнім часом приділяється багато уваги. В наукових працях, які присвячені навантаженню транспортних потоків, таке явище підлягає детальному вивченню. Мета таких досліджень – показати, що використання даних про навантаження дорожньої мережі в стаціонарних умовах і при коливанні навантаження, може значно покращити результати прогнозів. Додавання до стаціонарних моделей коливальної складової, може підвищити точності моделювання і прогнозування виникнення заторів.

Робота є продовженням робіт [1-3], де в роботі [1] обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Математична модель враховує динаміку розвитку процесу. Продовженням досліджень, які наведено в роботі [2], є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі, який отримав назву критерій робастності. Це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон сталого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. В роботі [3] показано, що розроблений критерій робастності необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі. Однак розроблений критерій має обмеження – не враховує коливання параметрів транспортного потоку (щільності,

швидкості руху транспортних засобів в потоці), що має місце в «години пік» великих міст. Тому дослідження та прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів в часі та визначення впливу коливань на утворення заторів є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні десятиліття розвиток транспортної інфраструктури великих міст набув стрімких змін. Це призвело до загострення проблем транспортного забезпечення населення, яке проживає у таких мегаполісах. Загострилися проблеми пов'язані з виникненням заторів, що чинить прямий вплив на населення, наприклад, збільшення часу транспортних кореспонденцій, забруднення повітря вихлопними газами, збільшення витрат палива автомобілями, порушення правил дорожнього руху, шумовий вплив, дорожні аварії. Авторами роботи [4] згруповано інтелектуальні методи, що використовуються для аналізу даних про мобільність при прогнозуванні транспортних потоків у міських районах. Показано набори даних, які використані в літературі та застосовуються для прогнозування транспортних потоків. Наведено кількісні результати точності різних методів прогнозування, виділено переваги та обмеження аналізованих методів.

У роботах [5,6] представлено огляд літератури та оцінка методів прогнозування дорожнього руху. Зокрема, огляд літератури в роботі [5] стосується вивчення наукових статей з метою зробити висновки про найбільш застосовувані методи та майбутні напрями їх впровадження у міській логістиці. Алгоритми (методи), за допомогою яких здійснюється прогноз перевезень, класифіковані та проаналізовані з акцентом на їхнє потенційне застосування в системах вантажного автомобільного транспорту. Автори стверджують, що правильне використання інформації про затори на дорогах може значно підвищити ефективність транспортного обслуговування. На думку авторів розроблені алгоритми та методи будуть використовуватися для маршрутизації та планування транспортного забезпечення. У роботі [6], з метою підвищення точності прогнозування, враховується тип транспортного потоку, «гетерогенний невпорядкований» або «змішаний». Автори показали, що у більшості досліджень використовуються методи та концепції, розроблені для однорідного транспортного потоку. У цій роботі представлений огляд і методологія процесу моделювання для змішаного потоку, що відображає «заповнення прогалін», а не звичайна поведінка «слідування за автомобілем». Подано порівняння підходів до моделювання та обговорюється точність їх реалізації. На наш погляд, такий підхід є перспективним для моделювання транспортних потоків та прогнозування заторів у великих містах.

Моделюванню та прогнозуванню транспортних потоків великих міст присвячені роботи [7,8]. Наприклад, у роботі [7] представлені експериментальні результати, засновані на реалістичних трасах автомобільного руху у місті Валенсія (Іспанія). Автори показують, що деякі сегменти вулиць відповідають загальній теорії автомобільного потоку, тоді як велика кількість сегментів вулиць підпадають під інші категорії і апроксимуються іншими рівняннями. Автори пропонують застосувати кластерний аналіз та кожен окремий сегмент вулиць моделювати за різними рівняннями. У роботі [8], на основі експериментальних даних, були побудовані діаграми, що відображають залежність швидкості та щільності транспортного потоку для різних ділянок доріг. Це дозволило авторам роботи розробити нові рівняння, що дозволяють теоретично визначати щільність та швидкість транспортного потоку та прогнозувати пропускну спроможність доріг.

Прогнозування транспортних потоків з використанням інтелектуальних транспортних систем розглянуто у роботах [9,10]. Багато існуючих моделей, таких як ARIMA, SVR, ANN і т.д., використовуються для отримання важливих характеристик

транспортної мережі та прогнозування мобільності. У роботі [10] представлено імітаційну модель на основі клітинних автоматів, модель TSF. Модель отримана на основі існуючої моделі Нагеля Шрекенберга для моделювання автомобільного руху на автомагістралях. Автори роботи роблять висновок, що модель TSF може бути реалізована як основний інструмент для моделювання та прогнозування транспортних потоків великих міст.

Прогнозу виникнення заторів на вулицях великих міст присвячені роботи [11-14]. У роботі [11] представлена модель міського руху (AUTM) для прогнозування та запобігання заторам на дорогах. Модель включає три ключові компоненти: метод перетворення мапи маршруту для отримання вихідних даних для побудови прогнозу; вирішення оптимізаційних задач за обраними маршрутами; побудова раціонального маршруту, що виключає затори. Робота [12] має на меті розробити мережеві методи для ефективного пошуку маршрутів, які будуть використовуватися для з'єднання точок кореспонденцій. Роботи [13,14] спрямовані на вивчення просторово-часового поширення заторів на основі зібраних емпіричних даних про дорожній рух у великих містах. Автори розробили метод виявлення впливових центрів зупинки руху та зробили висновок, що затори поширюються радіально від центру утворення затору на інші вулиці з різними швидкостями та навіть на район [14]. На думку авторів, отримані моделі можуть дати прогноз і контролювати поширення заторів, що може бути корисним для розробки майбутніх технологій автономного водіння та інтелектуальних транспортних систем.

Вивченню явища навантаження транспортного потоку присвячені роботи [15-17]. На думку авторів, навантаження транспортних потоків підлягає детальному вивченню. Мета таких досліджень – показати, що використання даних про навантаження дорожньої мережі може значно покращити результати прогнозів виникнення заторів. Розроблені моделі, на думку авторів, можуть використовуватись спільно з будь-якою попередньою моделлю, тому немає необхідності замінювати налагоджені моделі, а використовувати їх як доповнення.

Автори робіт [18-21] стверджують, що для підвищення точності моделювання і прогнозування необхідно враховувати нестационарність (коливання) параметрів транспортного потоку. Автори доводять, що вихідний ряд коливань параметрів потоку, як функція часу, може демонструвати статистичну автокореляцію, проте сигнали коливань розділені знаками, як у позитивній області досліджень, так і в негативній. Наявність коливань підвищує похибку прогнозування. Автори пропонують заходи, наприклад, використання фільтра Калмана [20] для коригування прогнозованого стану дорожнього руху на перехрестях. У роботі [21] розглядається методичний підхід використання нестационарних даних про транспортний потік високої інформативності, отриманих за допомогою сучасних сенсорних мереж. На думку авторів, такі дані демонструють значні статистичні коливання. На основі проведених досліджень в роботі робиться висновок, що такі флуктуації найкраще описуються за допомогою двомірного розподілу ймовірностей у площині «щільність–потік».

З аналізу виконаних робіт можна зробити висновок, що при виконанні моделювання транспортних потоків великих міст і при побудові прогнозів можливості виникнення заторів, необхідно враховувати нестационарність (коливання) параметрів, наприклад, таких як щільність транспортного потоку і швидкість руху транспортних засобів в потоці в різні відрізки часу доби.

Автори роботи [22] стверджують, що інформаційні потоки та потоки даних досягли такого рівня, що можуть відігравати основну роль у моделюванні реальних транспортних систем. У цій роботі викладено концептуальну основу для моделювання

динаміки міського руху, яка пропонує використання ланцюгів Маркова у співіснуванні з безперервними потоками даних. Автори, як додаток до розробленої моделі, використовують експериментальні дані, що складаються з GPS-слідів автомобілів-таксі у місті Пекіні та зіставляють результати моделювання з експериментальними даними, що підтверджує їхню ідентичність та інформативність.

Вивченню динаміки транспортного потоку присвячено роботи [23-24]. Наприклад, у [23] розроблена інтегрована структура моделювання динаміки транспортного потоку для аналізу та прогнозу пов'язаних систем у реальному часі. Модель дозволяє прогнозувати динаміку транспортного потоку у реальному часі попиту на транспортне обслуговування. Наведено порівняння рішень мережевих потоків на основі динамічних, напівдинамічних та статичних моделей транспортної мережі. У роботі [24] виконано класифікацію структур транспортних потоків по фундаментальній діаграмі шляхом розгляду щільності потоку, як індикатора структури. Фундаментальна діаграма швидкості-щільності оновлюється, щоб відповідати схемі потоку в реальному часі. На наш погляд, облік щільності потоку, що варіюється, є більш перспективним методичним прийомом. Такий підхід дозволяє підвищити точність моделювання та знизити похибку прогнозу.

Підсумовуючи аналіз публікацій, присвячених динаміці моделювання транспортних потоків, що змінюється в часі, необхідно зазначити, що основними факторами в таких моделях виступають щільність потоку та швидкість руху транспортних засобів у потоці, коливання щільності та швидкості руху. Нестационарність (коливання) параметрів транспортного потоку в реальному часі, на нашу думку, на основі виконаного вище аналізу літературних джерел, є значущими факторами для моделювання стійкості транспортного потоку до утворення заторів. Під час використання таких моделей необхідно використовувати функції зміни щільності та швидкості руху автомобілів в потоці в реальному часі. Отримані значення межі втрати стійкості транспортного потоку дозволять враховувати стохастичність процесу та підвищити рівень прогнозування стійкості транспортного потоку до заторів.

Саме такий підхід розроблено авторами робіт [1-3]. Авторами обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальним рівнянням третього порядку. Отримано критерій оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках вулично-дорожньої мережі. Аналіз критерію дозволяє сформулювати параметри, від яких залежить стійкість. Показано, що на стійкість транспортного потоку впливають щільність та інтенсивність транспортного потоку. Їх необхідно розраховувати для кожної ділянки дорожньої мережі чи магістралі як коефіцієнти підсилення. Дано визначення робастності транспортного потоку (англ. *robust range*) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон сталого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. Доведено, що розроблений критерій робастності [3] необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження та прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів в часі та визначення впливу коливань на утворення заторів.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі [2] представлено критерій стійкості транспортного потоку *RR*, який отримав назву критерія робастності. Як було доведено

в зазначеній роботі позитивне значення критерію робастності – це діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності (швидкості) руху без затримок та заторів. Чим більше значення критерію робастності, тим більший запас стійкості має транспортний потік до утворення затору. Критерій робастності має вигляд [2]:

$$RR = \frac{[(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \times (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1)]}{[(T_1 T_2 T_3 \times K_2 K_3) + T_1 T_2 T_3] \times 500} \quad (1)$$

У роботі [3] було надано значення постійних часу  $T_i$  коефіцієнтів підсилення  $K$ , які входять у критерій (1).

Значення постійної часу  $T_1$ , яка характеризує інерційність водія, залежно від величини щільності транспортного потоку, представлено виразом:

$$T_1 = \frac{t_1^2 \cdot N \cdot l_a \cdot \sigma_a}{70 \cdot L \cdot v}, \text{ с}, \quad (2)$$

де  $t_1$  - час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, може змінюватися в межах від 0,6 до 1,4 сек;

$N$  – кількість автомобілів на контрольованій ділянці дороги;

$l_a$  – довжина автомобіля, м;

$\sigma_a$  – середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів в транспортному потоці, м/с<sup>2</sup>, формулу для розрахунку наведено в роботі [1];

$L$  – довжина контрольованої ділянки дороги, зазвичай приймається рівною 1000 м;

$v$  – швидкість автомобілів у транспортному потоці, м/с.

Значення постійної часу  $T_2$ , яка характеризує інерційність автомобіля і виявляється у здатності до маневру, представлено формулою:

$$T_2 = \frac{M \cdot l_a^2}{1000 \cdot N_e \cdot t_2^2}, \text{ с}, \quad (3)$$

де  $M$  – маса автомобіля, розмірність кг;

$N_e$  – номінальна потужність двигуна автомобіля, розмірність Вт;

$t_2$  – час на маневр, який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації на контрольованій ділянці, розмірність с.

Значення постійної часу  $T_3$ , що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, наведено формулою:

$$T_3 = \frac{n \cdot t_2^2}{5 \cdot t_3}, \text{ с}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість смуг руху на проїжджій частині;

$t_3$  – сумарний час затримок під час руху за маршрутом довжиною 1000 м, с.

Коефіцієнт підсилення  $K_1$ , який характеризує ступінь впливу щільності транспортного потоку на час реакції водія, представлений формулою:

$$K_1 = \frac{N \cdot l_a}{L}, \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення  $K_2$ , який характеризує вплив динамічності транспортного потоку на час затримок під час руху та втрату стійкості, представлений формулою:

$$K_2 = \frac{\sigma_a \cdot N^2 \cdot l_a^3}{v^2 \cdot L^2}. \quad (6)$$

Коефіцієнт підсилення  $K_3$ , який характеризує вплив зміни дорожньої ситуації, на час затримки під час руху в потоці та втрату стійкості, представлений формулою:

$$K_3 = \frac{N \cdot l_a \cdot k^2 \cdot s^2}{10 \cdot L}, \quad (7)$$

де  $k$  – кількість пішохідних переходів на контрольованій ділянці;

$s$  – кількість світлофорів на контрольованій ділянці.

Наведені вирази (2) – (7) підставляються у формулу (1) для розрахунку значення критерію робастності  $RR$  на ділянці дороги, що досліджується. Як доведено в роботах [1-3] значенню критерія робастності більше одиниці відповідає наявність руху автомобілів у потоці, це з висновків роботи [2]. Чим більша величина критерію  $RR$ , тим вище запас по робастності транспортного потоку. За значенням критерію робастності  $RR=1$ , транспортний потік втрачає стійкість, тобто відбувається зупинка руху, це межа переходу від руху до затору. При  $RR$  менше одиниці – затор, транспортний потік не рухається.

Виконаємо теоретичні дослідження впливу коливань щільності транспортного потоку та швидкості руху автомобілів в потоці на величину критерію робастності, що визначає межу утворення заторів. Такі коливання характерні для великих міст і отримали назву «години пік», коли щільність транспортного потоку збільшується до величин, які викликають утворення заторів. Відповідно швидкість руху автомобілів в транспортному потоці зменшується до нуля.

Вираз для розрахунку середнього значення щільності транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі довжиною  $L=1000$  м, яке відповідає сталому режиму руху, представимо у вигляді:

$$p_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m N_i}{L}, 1/\text{м}, \quad (8)$$

де  $m$  – кількість автомобілів в транспортному потоці на контрольованій ділянці;

Вираз для моделювання коливання щільності транспортного потоку в часі що досліджується, представимо у вигляді:

$$p(t) = p_{cp} + p_{cp} \left( A_p \cdot \sin \frac{k \cdot t}{T_{nep}} \right), 1/\text{м}, \quad (9)$$

де  $A_p$  – амплітуда коливань щільності транспортного потоку в часі що досліджується, безрозмірна величина, розраховується за формулою:

$$A_p = \frac{\sigma_p}{p_{cp}}, \quad (10)$$

де  $\sigma_p$  – середньоквадратичне відхилення щільності транспортного потоку

виразимо формулою:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_i - p_{cp})^2}, \quad (11)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини щільності транспортного потоку на контрольованій ділянці;

$p_i$  – величина щільності транспортного потоку  $i$ -го виміру;

$k$  – коефіцієнт, який враховує розмірність величин, безрозмірна величина;

$t$  – реальний час, в межах якого проводиться дослідження, розмірність година;

$T_{nep}$  – період коливань зміни щільності транспортного потоку, розмірність година.

Вираз для розрахунку середнього значення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці на ділянці дорожньої мережі довжиною 1000 м, яке відповідає сталому режиму руху, представимо у вигляді:

$$v_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m}, \quad 1/м, \quad (12)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини швидкості автомобілів в транспортному потоці на контрольованій ділянці;

Вираз для моделювання коливання швидкості руху автомобілів в транспортному потоці в часі що досліджується, представимо у вигляді:

$$v(t) = v_{cp} + v_{cp} \left( A_v \cdot \sin \frac{k \cdot t}{T_{nep}} \right), \quad 1/м, \quad (13)$$

де  $A_v$  – амплітуда коливань швидкості автомобілів в транспортному потоці в часі що досліджується, безрозмірна величина, розраховується за формулою:

$$A_v = \frac{\sigma_v}{v_{cp}}, \quad (14)$$

де  $\sigma_v$  – середньоквадратичне відхилення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці виразимо формулою:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (v_i - v_{cp})^2}, \quad (15)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини швидкості руху автомобілів в транспортному потоці на контрольованій ділянці.

Отримані значення щільності транспортного потоку в реальному часі, вираз (9) та значення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці в реальному часі, вираз (13), підставляються у формули (2) – (7) для розрахунку постійних часу  $T$  та коефіцієнтів підсилення  $K$ , а потім критерію робастності, формула (1), як функції часу. Розроблений методичний підхід дозволяє досліджувати вплив коливань (за амплітудою

та періодом) щільності та швидкості руху автомобілів в транспортному потоці на вулицях великих міст в реальному часі та визначати межу появи заторів, особливо в «години пік».

Виконаємо прогнозування стійкості (робастності)  $RR$  транспортного потоку, формула (1), під час руху міськими вулицями великого міста. Прогнозування будемо виконувати залежно від зміни щільності транспортного потоку, формула (9) та швидкості руху автомобілів, формула (13). У формули входять величини середнього значення щільності транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі довжиною  $L=1000$  м, а також середнього значення швидкості руху автомобілів в транспортному потоці. Додавання коливальної складової дозволяє врахувати коливання величин щільності та швидкості транспортного потоку, що пов'язане з «годинами пік», які притаманні для великих міст.

Аналіз представлених залежностей дозволяє зробити такі висновки. Збільшення щільності потоку (у години пік) значно зменшує діапазон робастності. Крива 1 на рис.1 відповідає щільності потоку 30 автомобілів на 1000 метрів дороги. Наявність коливань з амплітудою, що дорівнює 0,5, формула (10) зменшує величину критерію робастності, проте не призводить до утворення заторів. При щільності транспортного потоку 60 автомобілів на 1000 метрів дороги, крива 2, рис.1, виникають затори. Поданий прогноз побудовано для періоду коливань  $T_{пер} = 4$  години. Тобто, через кожні 4 години проявляється збільшення щільності від 30 автомобілів до 60 автомобілів на 1000 метрів дороги. Прогнозування виконувалося для міської вулиці, що має дві смуги для руху, 5 світлофорів та 5 пішохідних переходів на 1000 метрів дороги.

Залежності зміни швидкості руху автомобілів у транспортному потоці та їх вплив на діапазон робастності за наявності коливань швидкості, формула (13), представлені на рис.2. Залежності побудовано для постійної щільності потоку, що дорівнює 50 автомобілів на 1000 метрів дороги, амплітуда коливань 0,5, формула (14), період коливань  $T_{пер} = 4$  години. З аналізу залежностей можна зробити такі висновки. Зменшення швидкості руху автомобілів у транспортному потоці призводить до втрати стійкості потоку – виникнення заторів, що представлено кривою 3. Цей факт підтверджує функціональний зв'язок між щільністю транспортного потоку та швидкістю руху автомобілів у потоці.

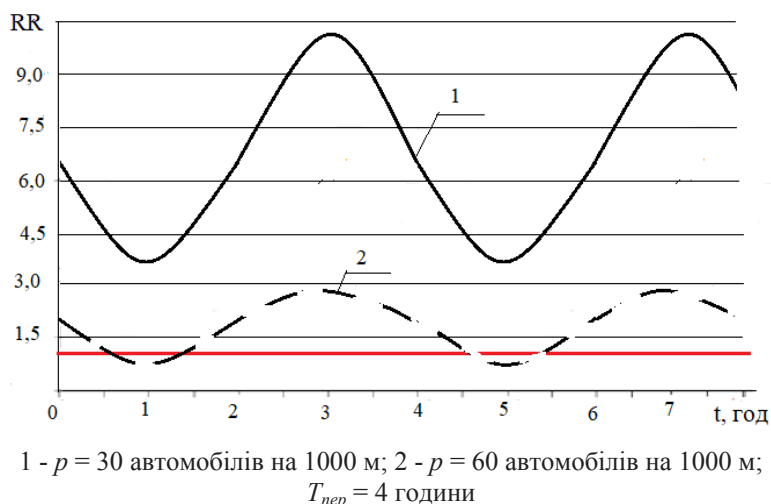
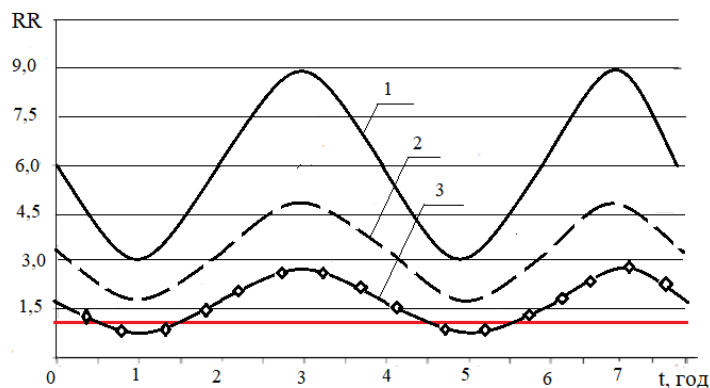


Рисунок 1 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні часу

Джерело: розроблено авторами



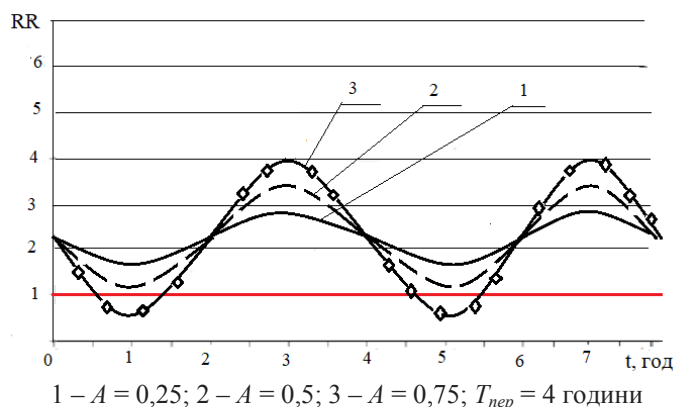
1 -  $v = 40$  км/год; 2 -  $v = 30$  км/год; 3 -  $v = 20$  км/год;  $T_{пер} = 4$  години

Рисунок 2 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень швидкості руху автомобілів при зміні часу

Джерело: розроблено авторами

Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку при зміні амплітуди коливань щільності, формула (10) і швидкості руху, формула (14), представлені на рис.3. Залежності побудовано для постійної щільності потоку, що дорівнює 60 автомобілів на 1000 метрів дороги, швидкості руху автомобілів 30 км/годину, період коливань  $T_{пер} = 4$  години. З аналізу залежностей можна зробити такі висновки. Збільшення амплітуди коливань призводить до втрати стійкості потоку. При значенні амплітуди  $A = 0,75$  транспортний потік втрачає стійкість, виникає затор, що представлено кривою 3.

Представлені залежності на рис.3 характерні як для коливань щільності транспортного потоку, так і для коливань швидкості автомобілів у транспортному потоці.



1 -  $A = 0,25$ ; 2 -  $A = 0,5$ ; 3 -  $A = 0,75$ ;  $T_{пер} = 4$  години

Рисунок 3 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень амплітуди коливань

Джерело: розроблено авторами

Вплив на стійкість транспортного потоку величини періоду коливань  $T_{пер}$  представлено на рис.4. Період коливань – це відрізок часу, коли збільшення щільності транспортного потоку (зменшення швидкості руху автомобілів у транспортному потоці) повторюється. Залежності побудовано для трьох періодів коливань:  $T_{пер} = 2$  години; 4 години; 6 годин, при постійній щільності потоку, що дорівнює 60 автомобілів на 1000 метрів дороги, швидкості руху автомобілів 30 км/годину, при різній амплітуді коливань, що дорівнює  $A = 0,25$ ; 0,5; 0,75.

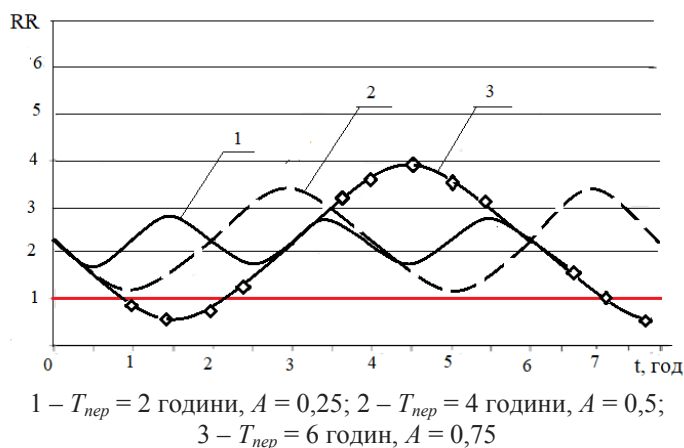


Рисунок 4 - Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень періоду коливань

*Джерело: розроблено авторами*

Як впливає з поданих залежностей, період появи «години пік» не впливає на втрату стійкості транспортного потоку. Найважливішим чинником виступає амплітуда коливань. При високих значеннях амплітуди, наприклад  $A = 0,75$ , крива 3, порушується межа втрати стійкості - виникає затор. Однак облік такого чинника, як період коливань, дозволить адаптувати математичну модель до реальних умов поведінки транспортного потоку і тим самим підвищити точність прогнозування. Для цього можна розбивати окремі вулиці на кластери і виконувати моделювання кожного кластера окремо, використовуючи відповідні значення вхідних параметрів.

**Висновки.** Розроблено методичний підхід прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності транспортних потоків та швидкості руху автомобілів, які пов'язані з «годинами пік». Методичний підхід, на відміну від раніше відомих, наведених у цій роботі в огляді літературних джерел, доповнює відомий критерій робастності, розроблений у роботах [2,3], що дозволяє підвищити точність прогнозування виникнення заторів.

Запропоновано функції зміни щільності транспортного потоку та швидкості руху транспортних засобів у потоці, що змінюються у часі. Крім реального часу функції містять змінні параметри у вигляді амплітуди коливань та періоду коливань. Це дозволяє зробити адаптацію моделі прогнозування до реальної дорожньої мережі з урахуванням періоду завантаженості мережі та інфраструктури доріг.

Показано, що облік коливальної складової транспортного потоку розширює можливості застосування критерію робастності, представленого формулою (1) і дозволяє дати більш точний прогноз для різних ділянок дорожньої мережі великих міст.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, математична модель прогнозування стійкості транспортного потоку в часі з урахуванням коливань має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних для прогнозування. На контрольованих ділянках дорожньої мережі необхідно визначати середнє значення щільності потоку, середнє значення швидкостей руху транспортних засобів, амплітуду коливань в «години пік» та період появи «годин пік». Подальший напрямок досліджень, на наш погляд, лежить у площині створення розрахункових моделей щодо визначення середнього значення щільності потоку, середнього значення швидкостей руху транспортних засобів, амплітуди коливань в «години пік» та періодів появи «годин пік». Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі.

## Список літератури

1. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі / Войтов В.А. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.І. С. 236-245 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)
2. Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі / Кравцов А.Г. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), ч.ІІ. С. 222-230 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)
3. Дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі міста / Горяїнов О.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч.І. С. 183-195 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.183-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.183-195)
4. Medina-Salgado B., Sanchez-DelaCruz E., Pozos-Parra P., Sierra J. E. Urban traffic flow prediction techniques: A review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2022. №35. P. 100739. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100739>
5. Kechagias E. P., Gayialis S. P., Konstantakopoulos G. D., Papadopoulos G. A. Traffic flow forecasting for city logistics: A literature review and evaluation. *International Journal of Decision Support Systems*. 2019. №4(2). P. 159-176. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2019.104556>
6. Verma A. Review of studies on mixed traffic flow: perspective of developing economies. *Transportation in Developing Economies*. 2016. № 2. P. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0010-0>
7. Zambrano-Martinez J. L., T. Calafate C., Soler D., Cano J. C., Manzoni P. Modeling and characterization of traffic flows in urban environments. *Sensors*. 2018. 18(7). P. 2020. <https://doi.org/10.3390/s18072020>
8. Horvat R., Kos G., Ševrović M. Traffic flow modelling on the road network in the cities. *Tehnički vjesnik*. 2015. №22(2). P. 475-486. <https://doi.org/10.17559/TV-20150127093334>
9. Bhanu M., Priya S., Dandapat S. K., Chandra J., Mendes-Moreira J. Forecasting traffic flow in big cities using modified tucker decomposition. In *Advanced Data Mining and Applications: 14th International Conference, ADMA 2018, Nanjing, China, November 16–18, 2018, Proceedings*. 2018. 14. (pp. 119-128). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05090-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05090-0_10)
10. Gora P. Traffic simulation framework. In *2012 UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. 2012, March. pp. 345-349. IEEE. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2012.57>
11. Hu W., Wang H., Qiu Z., Yan L., Nie C., Du B. An urban traffic simulation model for traffic congestion predicting and avoiding. *Neural Computing and Applications*. 2018. №30. P.1769-1781. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2785-7>
12. Hofer C., Jäger G., Füllsack M. Including traffic jam avoidance in an agent-based network model. *Computational social networks*. 2018. №5. P.1-12. <https://doi.org/10.1186/s40649-018-0053-y>
13. Jiang Y., Kang R., Li D., Guo S., Havlin S. Spatio-temporal propagation of traffic jams in urban traffic networks. *arXiv preprint arXiv:1705.08269*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08269>
14. Nagy A. M., Simon V. Traffic congestion propagation identification method in smart cities. *Infocommunications Journal*. 2021. №13(1). P. 45-57. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2021.1.6>
15. Nagy A. M., Simon V. Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities. *Advanced Engineering Informatics*. 2021. № 50. P. 101343. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101343>
16. Nagy A. M., Simon V. A novel congestion propagation modeling algorithm for smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*. 2021. №73. P. 101387. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2021.101387>
17. Liu X. C., Zhang G., Lao Y., Wang, Y. Modeling traffic flow dynamics on managed lane facility: approach based on cell transmission model. *Transportation research record*. 2012. № 2278(1). P. 163-170. <https://doi.org/10.3141/2278-18>
18. Xu N., Shang P., Kamae S. Modeling traffic flow correlation using DFA and DCCA. *Nonlinear Dynamics*. 2010. №61. P. 207-216. <https://doi.org/10.1007/s11071-009-9642-5>
19. Fulari S., Thankappan A., Vanajakshi L., Subramanian S. Traffic flow estimation at error prone locations using dynamic traffic flow modeling. *Transportation letters*. 2019. №11(1). P. 43-53. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1271761>
20. Yang H., Yu W., Zhang G., Du L. Network-Wide Traffic Flow Dynamics Prediction Leveraging Macroscopic Traffic Flow Model and Deep Neural Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2024. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3329489>
21. Kalair K., Connaughton C. Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. №127. P. 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178>

22. Moosavi V., Hovestadt L. Modeling urban traffic dynamics in coexistence with urban data streams. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing*. 2013, August. pp. 1-7. <https://doi.org/10.1145/2505821.2505822>
23. Zhou Z., Zhang X., Guo Q., Sun H. Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. №135. P. 110083. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110083>
24. Celikoglu H. B. Dynamic classification of traffic flow patterns simulated by a switching multimode discrete cell transmission model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014. №15(6). P. 2539-2550. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2317850>

## References

1. Vojtov, V.A. et al. (2023). Otsinka erhonomichnoi stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi. Identyfikatsiia matematychnoi modeli [Assessment of ergonomic sustainability of traffic flow at road network sections. Identification of a mathematical model]. *Tsentrāl'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 7(38), 236-245 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245) [in Ukrainian].
2. Kravtsov, A.H. et al. (2023). Obhruntuvannia kryteriiu stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi [Justification of the traffic flow stability criterion at the sections of the road network]. *Tsentrāl'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 7(38), 222-230 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230) [in Ukrainian].
3. Horiainov, O.M. et al. (2023). Doslidzhennia matematychnoi modeli stijkosti transportnoho potoku na dil'nytsiakh dorozhn'oi merezhi mista [Study of the mathematical model of the stability of the traffic flow in the sections of the city's road network]. *Tsentrāl'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences*, 8(39), 1, 183-195 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.183-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.183-195) [in Ukrainian].
4. Medina-Salgado, B., Sanchez-DelaCruz, E., Pozos-Parra, P. & Sierra, J. E. (2022). Urban traffic flow prediction techniques: A review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 35, 100739. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100739>
5. Kechagias, E. P., Gayialis, S. P., Konstantakopoulos, G. D. & Papadopoulos, G. A. (2019). Traffic flow forecasting for city logistics: A literature review and evaluation. *International Journal of Decision Support Systems*, 4(2), 159-176. <https://doi.org/10.1504/IJDSS.2019.104556>
6. Verma, A. (2016). Review of studies on mixed traffic flow: perspective of developing economies. *Transportation in Developing Economies*, 2, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0010-0>
7. Zambrano-Martinez, J. L., T. Calafate, C., Soler, D., Cano, J. C. & Manzoni, P. (2018). Modeling and characterization of traffic flows in urban environments. *Sensors*, 18(7), 2020. <https://doi.org/10.3390/s18072020>
8. Horvat, R., Kos, G. & Ševrović, M. (2015). Traffic flow modelling on the road network in the cities. *Tehnički vjesnik*, 22(2), 475-486. <https://doi.org/10.17559/TV-20150127093334>
9. Bhanu, M., Priya, S., Dandapat, S. K., Chandra, J. & Mendes-Moreira, J. (2018). Forecasting traffic flow in big cities using modified tucker decomposition. In *Advanced Data Mining and Applications: 14th International Conference, ADMA 2018, Nanjing, China, November 16–18, 2018, Proceedings 14* (pp. 119-128). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05090-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05090-0_10)
10. Gora, P. (2012, March). Traffic simulation framework. In *2012 UKSim 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation* (pp. 345-349). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UKSim.2012.57>
11. Hu, W., Wang, H., Qiu, Z., Yan, L., Nie, C. & Du, B. (2018). An urban traffic simulation model for traffic congestion predicting and avoiding. *Neural Computing and Applications*, 30, 1769-1781. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2785-7>
12. Hofer, C., Jäger, G. & Füllsack, M. (2018). Including traffic jam avoidance in an agent-based network model. *Computational social networks*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40649-018-0053-y>
13. Jiang, Y., Kang, R., Li, D., Guo, S. & Havlin, S. (2017). Spatio-temporal propagation of traffic jams in urban traffic networks. *arXiv preprint arXiv:1705.08269*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.08269>
14. Nagy, A. M. & Simon, V. (2021). Traffic congestion propagation identification method in smart cities. *Infocommunications Journal*, 13(1), 45-57. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2021.1.6>
15. Nagy, A. M. & Simon, V. (2021). Improving traffic prediction using congestion propagation patterns in smart cities. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101343. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101343>
16. Nagy, A. M. & Simon, V. (2021). A novel congestion propagation modeling algorithm for smart cities. *Pervasive and Mobile Computing*, 73, 101387. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2021.101387>

17. Liu, X. C., Zhang, G., Lao, Y. & Wang, Y. (2012). Modeling traffic flow dynamics on managed lane facility: approach based on cell transmission model. *Transportation research record*, 2278(1), 163-170. <https://doi.org/10.3141/2278-18>
18. Xu, N., Shang, P. & Kamae, S. (2010). Modeling traffic flow correlation using DFA and DCCA. *Nonlinear Dynamics*, 61, 207-216. <https://doi.org/10.1007/s11071-009-9642-5>
19. Fulari, S., Thankappan, A., Vanajakshi, L. & Subramanian, S. (2019). Traffic flow estimation at error prone locations using dynamic traffic flow modeling. *Transportation letters*, 11(1), 43-53. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1271761>
20. Yang, H., Yu, W., Zhang, G. & Du, L. (2024). Network-Wide Traffic Flow Dynamics Prediction Leveraging Macroscopic Traffic Flow Model and Deep Neural Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3329489>
21. Kalair, K. & Connaughton, C. (2021). Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow-density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 127, 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178>
22. Moosavi, V. & Hovestadt, L. (2013, August). Modeling urban traffic dynamics in coexistence with urban data streams. In *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing* (pp. 1-7). <https://doi.org/10.1145/2505821.2505822>
23. Zhou, Z., Zhang, X., Guo, Q. & Sun, H. (2021). Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110083. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110083>
24. Celikoglu, H. B. (2014). Dynamic classification of traffic flow patterns simulated by a switching multimode discrete cell transmission model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(6), 2539-2550. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2317850>

**Viktor Vojtov**, Prof., DSc., **Natalija Berezhna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Sysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anton Voitov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Leonid Kryvenko**, Director of the enterprise 16363, **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

### **Forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account fluctuations in the density and speed of traffic flows**

The work has developed a methodical approach for forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account the fluctuations in the density of traffic flows and the speed of movement of cars in the traffic flow, which are associated with "peak hours". The methodological approach, unlike the previously known ones, complements the well-known robustness criterion developed by the authors in previous publications, which allows to increase the accuracy of forecasting the occurrence of traffic jams.

Time-varying functions of traffic flow density and vehicle speed in the traffic flow are proposed. In addition to real time, functions contain variable parameters in the form of amplitude of oscillations and period of oscillations. This makes it possible to adapt the forecasting model to the real road network, taking into account the period of network congestion and road infrastructure. The dependences of the change in the range of robustness of the traffic flow when the density and speed of movement of vehicles in the flow change. It has been proven that in the presence of fluctuations of the listed parameters, the appearance of traffic jams occurs at average values of density and speed. A significant influence of the amplitude of fluctuations in the density and speed of movement of vehicles in the stream on the appearance of traffic jams has been proven. It is shown that the magnitude of the amplitude of oscillations during "peak times" significantly reduces the stability range of the traffic flow. The influence of the "peak hour" period on the loss of stability of the traffic flow is given. It has been proven that the period of oscillations is an insignificant factor in forecasting traffic jams. However, accounting for such a factor will allow to adapt the mathematical model to the real conditions of traffic flow behavior and thereby increase the accuracy of forecasting.

It is shown that accounting for the fluctuating component of the traffic flow expands the possibilities of applying the robustness criterion presented by the authors in previous publications and makes it possible to provide a more accurate forecast for various sections of the road network of large cities.

**traffic flow, forecasting, dynamic model, traffic flow density, traffic speed, traffic flow robustness criterion, oscillation amplitude, oscillation period, traffic flow stability, traffic jam**

*Одержано (Received) 15.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 21.02.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

**В.М. Никончук**, проф., д-р екон. наук, **І.О. Хітров**, доц., канд. техн. наук,  
**С.М. Пашкевич**, ст.викл.

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна  
e-mail: v.m.nikonchuk@nuwm.edu.ua, i.o.khitrov@nuwm.edu.ua, s.m.pashkevych@nuwm.edu.ua*

## Впровадження концепції перехоплюючих паркінгів в міське середовище

У зв'язку з постійним зростанням автопарку та зменшенням вільного простору у міських агломераціях виникає актуальна необхідність вдосконалення систем паркування. Одним із ефективних рішень є впровадження концепції перехоплюючих паркінгів, які дозволяють ефективно використовувати доступний простір та зменшувати негативний вплив автотранспорту на міську інфраструктуру. Перехоплюючі паркінги є важливим кроком у напрямку оптимізації міського простору та покращення якості життя мешканців, сприяючи зменшенню транспортних заторів у містах та розвитку сталого міського середовища. У цій науковій роботі розглядається процес впровадження концепції перехоплюючих паркінгів в міських агломераціях та його вплив на зменшення проблем паркування та покращення екологічної ситуації в містах. Основні завдання дослідження включають аналіз потенційних переваг та викликів впровадження перехоплюючих паркінгів, розробку стратегії для їх впровадження. Робота також містить рекомендації щодо подальшого розвитку та впровадження перехоплюючих паркінгів в місті Рівне з метою покращення якості обслуговування транспортної системи. Це дослідження важливе для розвитку сталого міського транспорту та покращення умов для мешканців міста, зменшення транспортних заторів та забруднення довкілля.

**міське середовище, вулично-дорожня мережа, перехоплюючий паркінг, транспортний потік, якість обслуговування транспортної системи**

**Постановка проблеми.** Місто Рівне з обсягом визначається як компактне та обмежене за площею. Висока щільність забудови сприяє мобільності мешканців, які можуть швидко діставатися до основних об'єктів інфраструктури, таких як школи, магазини, лікарні тощо, мінімізуючи витрати часу на переміщення. Така географічна конфігурація сприяє соціальній взаємодії та активному життю через легкий доступ до ресторанів, кафе, парків та громадських майданчиків.

Проте, компактність міста може приводити до таких проблем як відсутність широких вулиць та обмежена пропускна здатність, які призводять до постійних транспортних заторів, особливо в години пік; велика кількість автомобілів на малих вулицях, що призводить до підвищення рівня забрудненості повітря. Ці фактори спричиняють загострення екологічних, соціальних та економічних проблем.

Однією з ключових складових вирішення цих проблем є впровадження системи паркування для автотранспорту в умовах міського середовища.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На сьогоднішній день у багатьох країнах головною причиною виникнення вуличних парковок є інтенсивний ріст кількості транспортних засобів, недоцільна організація та недостатність спеціалізованих паркінгів, обмежене використання сучасних технічних засобів. Створення імплементації паркувальної системи в наявній муніципальній інфраструктурі включає в себе важливі завдання у сферах технічної, технологічної, організаційної, екологічної та містобудівної сфер для пасажирів, а також ефективність та економічність використання різних видів транспорту.

В працях багатьох закордонних та вітчизняних вчених розкрито загальні

тенденції розвитку мережі парковок в міському середовищі. Так Любицький Р.І. [7] в своїх працях узагальнює еволюцію політики управління паркуванням у містах Європи. К. Мезенцева, Я. Олійника [11] акцентують увагу на ролі паркінгу для міської мережі та проблемах розміщення перехоплюючих парковок; М. Вотінов, С. Кисіля, С. Шушлякової, О. Пекарчука [5]; сучасні вимоги до створення паркінгів досліджували Н. Соснова, Д. Чубарова. Глибокі дослідження різних аспектів управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях, організація руху в місті та аналіз надійності пішохідних переходів у міських умовах у містах розкрито в працях Є.Ю. Форнальчика, В.О. Вдовиченка [6,12, 13]. Проблематика Узагальнюючи, праці Лобашова О. О., Вакуленка К. Є. та Доля К. В., а також Давідіча Ю. О. та Чумаченка І. В. досліджують різні аспекти управління міським транспортом, зокрема вплив мережі паркування на транспортні потоки, методи управління міським пасажирським транспортом та моніторинг параметрів системи міського пасажирського транспорту на якість обслуговування населення [8,9,10]. Деякі праці, такі як ті, що належать до авторів Richter M. A. [1], Battarra R. [2]; та Biancuzzi N. [3], досліджують світовий досвід впровадження "розумної" міської мобільності. Вони аналізують успішно реалізовані проекти у цій галузі, зокрема щодо необхідності модернізації та впровадження нових технологій у проектування паркінгів, їх технологічних особливостей, сприйняття їх містами, дій міської влади та очікуваних ефектів.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є впровадження концепції перехоплюючих паркінгів та оцінка їх впливу на інтенсивність транспортних потоків в міському середовищі. Для досягнення мети необхідно виявити першопричини появи заторів на проблемних ділянках дороги; оцінити вплив введення перехоплюючих паркінгів на інтенсивність транспортних потоків; провести аналіз отриманих даних і визначити, наскільки ефективні перехоплюючі парковки у зменшенні транспортних заторів та покращенні руху транспорту в місті; визначити перспективні напрями подальшого розвитку та впровадження перехоплюючих паркінгів в місті.

**Виклад основного матеріалу.** Міська щільність стала необхідним інструментом для встановлення параметрів та критеріїв у процесах міського планування. Ця характеристика визначає не тільки співвідношення між забудованою територією та відкритим простором, але також відображає якість міського життя, що ґрунтується на взаємодії між людиною та міським середовищем.

Невід'ємною частиною інфраструктури міста та є важливим аспектом для житлових, офісних та адміністративних будівель, а також торгово-розважальних центрів є паркування. Для мешканців житлових районів наявність зручних і безпечних паркувальних місць є важливим фактором. Власники автомобілів повинні мати доступ до паркування біля свого мешкання, щоб забезпечити зручність та безпеку для свого автомобіля. Офіси та адміністративні приміщення зазвичай мають працівників та відвідувачів, які прибувають на роботу або на зустрічі. Для них важливо мати зручний доступ до паркувальних місць, щоб спростити процес прибуття та від'їзду. Торгово-розважальні центри зазвичай приваблюють багато відвідувачів. Наявність великої кількості паркувальних місць може стимулювати більше людей відвідувати ці об'єкти, оскільки паркування є однією з перших речей, на які звертають увагу покупців та відвідувачів.

Забезпечення належного паркування для цих типів будівель допомагає забезпечити комфорт та привабливість для мешканців та відвідувачів, сприяючи гармонійному функціонуванню міста та його інфраструктури.

Сучасні методи визначення оптимальної мережі автомобільних парковок базуються на передбаченнях стосовно їх впливу на параметри функціонування

транспортних потоків. Проте поки не відомо, як саме транспортні потоки розподіляються за різними зонами міста та як це впливає на характеристики міської інфраструктури. Встановлення нових закономірностей у поведінці транспортних потоків стосовно раціональної системи паркування може надати важливі вказівки щодо поліпшення продуктивності міської транспортної мережі [4,5,15].

Для ефективного проектування перехоплюючих паркінгів проведено дослідження потужності і визначимо характер вхідних потоків транспортних засобів в різні години доби та дні тижня на прикладі міста Рівне. Для дослідження вхідних транспортних потоків обираємо 6 основних магістральних точок в передмісті Рівного. Точка №1, вулиця Київська (Зоопарк), точка №2, вулиця Рівненська, (Гіпермаркет FOZZY), точка №3, вулиця Чорновола, (Заправка ОККО), точка №4, вулиця Дубенська, (Заправка ОККО), точка №5 Луцьке кільце, точка № 6 вулиця Льонокомбінатівська (Спорт).

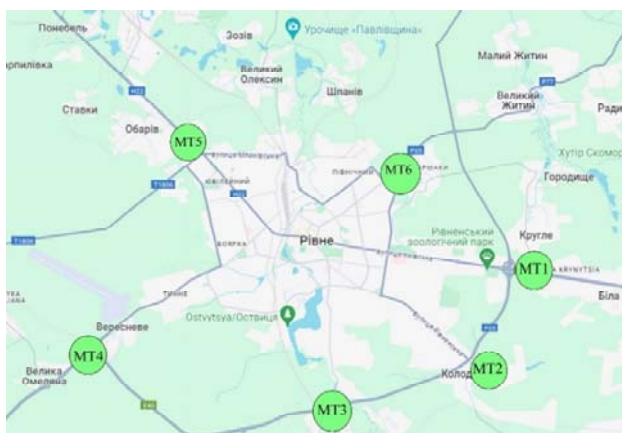


Рисунок 1 – Схема вулично-дорожньої мережі Рівного з основними магістральними точками дослідження вхідних транспортних потоків

*Джерело: розроблено авторами*

Відповідно до схеми вулично-дорожньої мережі проводимо дослідження вхідних та вихідних транспортних потоків на обраних магістральних точках (рис.2).

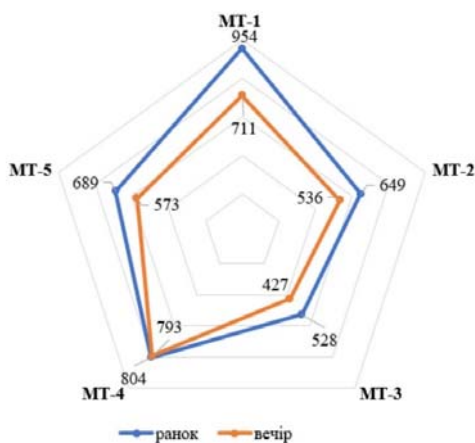


Рисунок 2 – Розподіл кількості транспортних засобів за визначеними магістральними точками

*Джерело: розроблено авторами*

За результатами досліджень визначено різницю в інтенсивності руху на цих ділянках доріг між ранком і вечором. Крім того, визначено магістральні точки, в яких потік транспортних засобів і вранці, і ввечері є найвищим порівняно з іншими

напрямами руху. Такий потік транспортних засобів пояснюється тим, що через магістральні точки (МТ-4, МТ-1) проходить магістральна траса Київ-Чоп. Так як в структурі найбільшу питому вагу займають автомобілі, то розподіл транспортних потоків проведемо за такими транспортними засобами як легкові та вантажні. Покажемо це у вигляді діаграм, які представлені на рисунку 3.

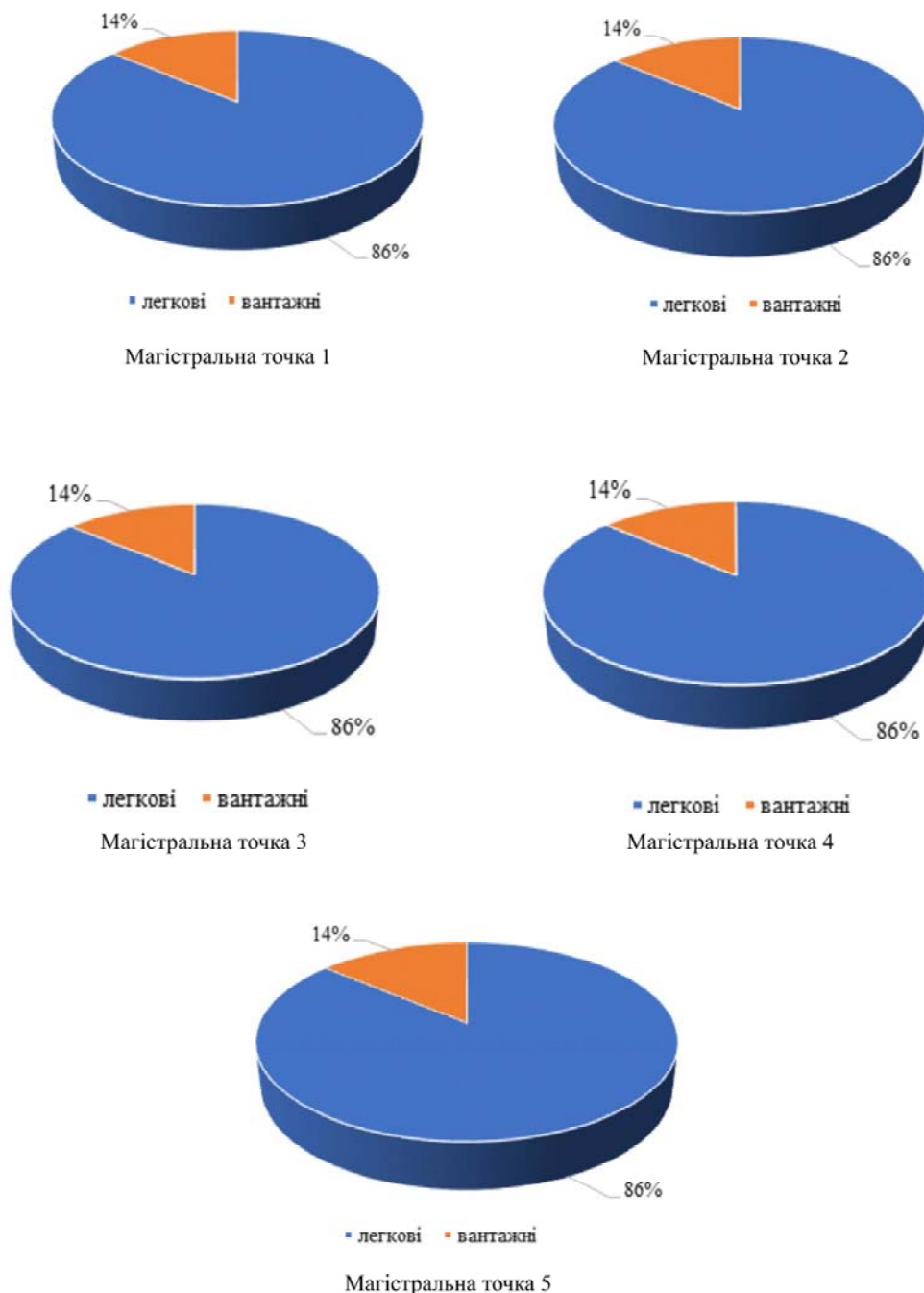


Рисунок 3 - Структура транспортного потоку за визначними об'єктами дослідження  
Джерело: розроблено авторами

Планування паркувального простору передбачає вибір методів організації, а класифікація паркувальних місць може бути корисною для систематизації різних видів паркування.

Для визначення спроможності вулично-дорожньої мережі та розрахунку ефективного використання паркувальних просторів, важливо врахувати розміри стандартних автомобілів. З урахуванням середніх габаритів, можна провести оцінку ефективності паркувальних зон (табл. 1).

Таблиця 1 – Середні габаритні розміри автомобілів класу D-E

Довжина автомобіля $l_0, м$	4,48
Ширина автомобіля $b, м$	1,88
Винос відкритих дверей, $a, м$	0,899

Джерело: [8, 14,16]

Оцінка ефективності паркувальної інфраструктури та обсягу паркувальної зони на основі середніх габаритів автомобіля надає можливість планувати та створювати паркувальні зони, що відповідають потребам міста і забезпечують ефективне використання вулично-дорожньої мережі. Виходячи з цього, нами проведено розрахунок параметрів відстані між автомобілями.

Так розрахунок відстані між автомобілями, що припарковані по фронту парковки, визначено ширину паркувальної смуги [8]. Для паралельного паркування до тротуару ( $\beta=00$ ) ширина ( $d, м$ ) становить:

$$d = 4,48 \cdot 0 + 1,88 \cdot 1 + 0,5 = 2,38 \text{ м.}$$

Далі проведено розрахунок відстані між автомобілями, що розміщені по фронту парковки за формулою:

$$L_p = 4,48 + \frac{4,48}{2} = 6,72 \text{ м.}$$

Наступним параметром є місткість парковки. Для визначення припустимої кількості місць для паркування на одиницю сумарної довжини вулиці і -тої ділянки ВДМ [мі], на 1 авто-місце/м за співвідношенням:

$$[n_i] = 1/L_{pi}, \quad (1)$$

$$[n_i] = \frac{1}{6,72} = 0,149 \text{ авт/місце.}$$

Так само, ми визначаємо ширину смуги для паркування та відстань між автомобілями з передньої сторони парковки для різних варіантів паркування під кутом 300, 450, 600, 900.

Результати проведених розрахунків представлено в таблиці 2.

Враховуючи історично сформовану вулично-дорожню мережу міста Рівне, яка не може бути розширена через високу щільність забудови, приймається, що ширина смуги проїзної частини S1 смуги мінімальною 3 м на дорогах з одностороннім рухом призначаємо одну смугу на дорогах з двостороннім рухом 2 смуги.

Корисну ширину і-того перегону ( $S_{ki}, м$ ) розраховуємо за формулою:

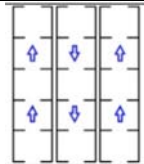
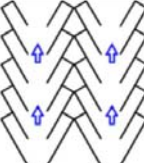
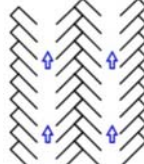
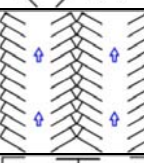
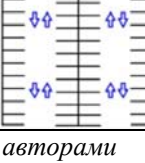
$$S_{ki} = S_{1смуги} \cdot k, \quad (2)$$

де  $k$  – кількість смуг руху, од.;

$S_{1-1} = 3 \cdot 1 = 3$  м. - для одностороннього руху;

$S_{1-2} = 3 \cdot 2 = 6$  м. - для двостороннього руху.

Таблиця 2 – Проектна кількість місць для паркування на одній досліджуваній зоні

Кут паркування автомобіля, $\beta^0$	Схематичне зображення	Ширина смуги паркування, d, м	Відстань між автомобілями по фронту парковки, $l_{Tb}$ , м	Припустима кількість місць для паркування, $[n_i]$ , на 1 авто-місце/м
$0^0$		2,38	6,72	0,149
$30^0$		3,72	5,67	0,176
$45^0$		4,4	5,03	0,199
$60^0$		5,07	3,96	0,253
$90^0$		6,41	2,44	0,410

Джерело: розроблено авторами

На основі проведених розрахунків визначимо фактичну ширину смуги для паркування за допомогою вказаної формули:

$$S_{\text{парк}i} = S_{\text{факт}i} - S_{kl}, \quad (3)$$

де  $S_{\text{факт}i}$  – ширина проїзної частини на  $i$ -тому перегоні, отримана в результаті спостережень, м.

$S_{\text{парк}i-1} = 7 - 3 = 4$  м. - для одностороннього руху.

$S_{\text{парк}i-2} = 7 - 6 = 1$  м. - для двостороннього руху.

Проведемо розрахунок максимальної кількості автомобілів, враховуючи середні значення кількості примикань від вулично-дорожньої мережі за формулою:

$$N_{\text{н}}^{\text{макс}} = \frac{\left[ \left( 340 \cdot 2 - 4 \cdot 5,5 - 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{340}{1000} \right) \cdot (20 + 3) \right) - 40 \right]}{6,72} = 57 \text{ од.};$$

$$N_{30}^{\max} = \frac{\left[ \left( 340 \cdot 2 - 4 \cdot 5,8 - 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{340}{1000} \right) \cdot (20 + 3) \right) - 40 \right]}{5,67} = 68 \text{ од.};$$

$$N_{45}^{\max} = \frac{\left[ \left( 340 \cdot 2 - 4 \cdot 5,8 - 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{340}{1000} \right) \cdot (20 + 3) \right) - 40 \right]}{5,03} = 76 \text{ од.};$$

$$N_{60}^{\max} = \frac{\left[ \left( 340 \cdot 2 - 4 \cdot 5,0 - 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{340}{1000} \right) \cdot (20 + 3) \right) - 40 \right]}{3,96} = 97 \text{ од.};$$

$$N_{90}^{\max} = \frac{\left[ \left( 340 \cdot 2 - 4 \cdot 5,0 - 2 \cdot \left( 15 \cdot \frac{340}{1000} \right) \cdot (20 + 3) \right) - 40 \right]}{2,44} = 157 \text{ од.};$$

На основі проведених розрахунків можна визначити оптимальну ширину смуги для паркування транспортних засобів на досліджуваній ділянці дороги. Це включає віднімання ширини проїзної частини від загальної ширини ділянки для визначення кількості паркувальних місць. Подальші розрахунки максимальної кількості автомобілів залежно від кута паркування показали, що максимальна сумарна кількість транспортних засобів, що може бути розміщена на одній зоні паркінгу на досліджуваній ділянці вулично-дорожньої мережі у місті Рівне становить 455 одиниць. Отримана максимальна кількість автомобілів дає загальний орієнтир для оптимального розміщення автомобілів на досліджуваній ділянці дороги, сприяючи ефективному використанню паркувальних місць у місті.

**Висновки.** Впровадження концепції перехоплюючих паркінгів є важливим кроком у напрямку оптимізації міського простору та покращення якості життя мешканців. Ефективне використання технологій та активна участь громадськості можуть сприяти успішному впровадженню цієї концепції та забезпечити стале розвиток міських агломерацій у майбутньому.

Наукові дослідження підтверджують, що створення перехоплюючих паркінгів може бути ефективним засобом зменшення транспортних заторів у містах. Це рішення дозволяє зменшити кількість автомобілів, що в'їжджають у центр міста, та стимулює використання громадського транспорту. Практичне впровадження цих нових наукових підходів до визначення мережі автомобільних парковок покращить якість обслуговування транспортної системи міста.

Важливо також правильно розташовувати ці паркінги, враховуючи потреби місцевого населення та транспортну інфраструктуру. Крім того, створення перехоплюючих паркінгів на в'їзді в місто сприятиме розвитку інфраструктури та зменшить навантаження на транспорту мережу міста, сприятиме створенню безпечного простору та розвитку міських середовищ.

## Список літератури

1. Richter M. A., Hagenmaier M., Bandte O., Parida V., Wincentf J. Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities needs different sustainable investment strategies.

- Technological Forecasting & Social Change. 2022. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121857>
2. Battarra R., Gargiulo C., Tremitterra M. R., Zucaro Fl. Smart mobility in Italian metropolitan cities: A comparative analysis through indicators and actions. *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 41. P. 556–567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140096>
  3. Biancuzzi H., Massaro M., Bagnoli C. Smart mobility in Venice: An ecosystem perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140096>
  4. Аулін В. В., Голуб Д. В. Якість перевезень пасажирів як невід’ємна частина транспортного процесу. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2008. №5(58) С. 80 -84.
  5. Вотінов М.А., Чубарова Д.С. Паркінги як об’єкти гуманізації середовища. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2019. № 53. С. 116–125.
  6. Великодний Д.О., Вдовиченко В.О. Підвищення ефективності взаємодії міського пасажирського транспорту в пересадочному транспортному вузлі. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали IV міжнародної науково-практичної інтернетконференції, 15-16 квітня 2016 р. Вінниця: ВНТУ*. 2016. С. 25-27.
  7. Любицький Р.І. Формування мережі об’єктів паркування індивідуального автотранспорту в історично сформованих містах (на прикладі м. Львова) : дис. на здобуття вч. ступеню канд. арх.: 18.00.01 / Львів, 2018. 271 с.
  8. Лобашов О. О. Моделювання впливу мережі паркування на транспортні потоки в містах: монографія. Х.: ХНАМГ, 2010. 170 с.
  9. Вакуленко К. Є., Доля К. В. Управління міським пасажирським транспортом: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 257 с.
  10. Давідч Ю. О., Чумаченко І. В. Моніторинг впливу параметрів системи міського пасажирського транспорту на якість обслуговування населення. *Комунальне господарство міст*. 2016. №128. С. 89-93.
  11. Урбаністична Україна: в епіцентрі просторових змін : монографія / за ред. К. Мезенцева, Я. Олійника, Н. Мезенцевої. Київ: Видавництво «Фенікс», 2017. 438 с.
  12. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах : монографія / Є. Ю. Формальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич ; за заг. ред Є. Ю. Формальчика. Львів, Видавництво Львівської політехніки. 2018. 236 с.
  13. Корушков Д. М., Vdovichenko V. O. Evaluation of urban passenger transportation operational efficiency in terms of socio-technical approach. *Молодий вчений*. 2017. №3. С. 729-734.
  14. Воліков В.В., Вдовиченко В.О. Транспортна інфраструктура Харкова (аналіз та основні тенденції). *Бізнес Інформ*. 2017. №12(479). С. 292-299.
  15. Пашкевич С.М., Никончук В.М., Кристочук М.С. Оцінка пропускної спроможності міської дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. №2(21). С. 163-173. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/1221>
  16. Гнедіна К. В. Методичні засади оцінювання економічної ефективності функціонування системи міського пасажирського транспорту. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. 2013. № 3 (68). С. 199-208.

## References

1. Richter, M. A., Hagenmaier, M., Bandte, O., Parida, V., & Wincentf, J. (2022). Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities needs different sustainable investment strategies. *Technological Forecasting & Social Change*, 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121857>
2. Battarra, R., Gargiulo, C., Tremitterra, M. R., & Zucaro, Fl. (2018). Smart mobility in Italian metropolitan cities: A comparative analysis through indicators and actions. *Sustainable Cities and Society*, 41, 556–567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140096>
3. Biancuzzi, H., Massaro, M., & Bagnoli, C. (2023). Smart mobility in Venice: An ecosystem perspective. *Journal of Cleaner Production*, 434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140096>
4. Aulin, V. V., & Holub, D. V. (2008). Yakist' perevezen' pasazhyriv iak nevid'iemna chastyna transportnoho protsesu [Quality of passenger transportation as an integral part of the transport process]. *Visnyk KDPU im. M. Ostrogradskoho – Bulletin of the KDPU named after M. Ostrogradskiyi*, 5(58), 80-84 [in Ukrainian].

5. Votinov, M. A., & Chubarova, D. S. (2019). Parkinyh yak ob'iekty humanizatsii seredovyscha [Parking lots as objects of environment humanization]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, 53, 116–125 [in Ukrainian].
6. Velykodnyj, D. O., & Vdovychenko, V. O. (2016). Pidvyschennia efektyvnosti vzaiemodii mis'koho pasazhyrs'koho transportu v peresadochnomu transportnomu vuzli [Increasing the efficiency of interaction of urban passenger transport at the transfer transport hub]. *Problems and Prospects of Automotive Transport Development: IV mizhnarodna naukovo-praktychna internetkonferentsiia (15-16 kvitnia 2016r.) – IV International Scientific and Practical Internet Conference*. (pp.25-27). Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
7. Lyubitskyi, R. I. (2018). Formuvannya merezhi ob'ektiv parkuvannya indyvidual'noho avtotransportu v istorychno sformovanykh mistakh (na prykladi m. L'vova) [Formation of a network of parking facilities for individual motor vehicles in historically formed cities (on the example of Lviv)]. *Candidate's thesis*. L'viv [in Ukrainian].
8. Lobashov, O. O. (2010). *Modeliuvannya vplyvu merezhi parkuvannya na transportni potoky v mistakh [Modeling the influence of parking network on traffic flows in cities]*. Kh.: KhNAMH [in Ukrainian].
9. Vakulenko, K. Ye., & Dolia, K. V. (2015). *Upravlinnia mis'kym pasazhyrs'kym transportom [Management of urban passenger transport]*. KhNUMH im. O. M. Beketova [in Ukrainian].
10. Davidich, Yu. O., & Chumachenko, I. V. (2016). Monitorynh vplyvu parametriv systemy mis'koho pasazhyrs'koho transportu na yakist' obsluhovuvannya naseleennia [Monitoring the impact of urban passenger transport system parameters on the quality of service to the population]. *Komunal'ne hospodarstvo mist – Communal Economy of Cities*, 128, 89-93 [in Ukrainian].
11. Mezentseva, K., Olijnyka, Ya. & Mezentsevoi N. (Eds.) (2017). *Urbanistychna Ukraina: v epitsentri prostorovykh zmin [Urban Ukraine: at the epicenter of spatial changes]*. Kyiv: Vydavnytstvo «Feniks» [in Ukrainian].
12. Fornal'chuk, Ye. Yu., Mohyla, I. A., Trushevs'kyj, V. E., & Hilevych, V. V. (2018). *Upravlinnia dorozhnim rukhom na rehul'ovanykh perekhrestiakh u mistakh [Traffic Management at Regulated Intersections in Cities]*. Ye. Yu. Fornal'chuk (Ed.). L'viv, Vydavnytstvo L'vivs'koi politekhniki [in Ukrainian].
13. Kopytkov, D. M., & Vdovichenko, V. O. (2017). Evaluation of urban passenger transportation operational efficiency in terms of socio-technical approach. *Molodyy vchenyj – Young Scientist*, 3, 729-734 [in English].
14. Volikov, V. V., & Vdovychenko, V. O. (2017). Transportna infrastruktura Kharkova (analiz ta osnovni tendentsii) [Transport infrastructure of Kharkiv (analysis and main trends)]. *Biznes Inform – Business Inform*, 12(479), 292-299 [in Ukrainian].
15. Pashkevych, S. M., Nykonchuk, V. M., & Krystopchuk, M. Y. (2023). Otsinka propusknoi spromozhnosti mis'koi dorozhn'oi merezhi z urakhuvanniam propozytsii parkuvannya [Evaluation of urban road network capacity considering parking supply]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, No2(21), 163-173. Retrieved from: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/1221> [in Ukrainian].
16. Hnedina, K. V. (2013). Metodichni zasady otsiniuvannya ekonomichnoi efektyvnosti funktsionuvannya systemy mis'koho pasazhyrs'koho transportu [Methodical principles of evaluating the economic efficiency of the urban passenger transport system]. *Visnyk Chernyhivs'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, № 3 (68), 199-208 [in Ukrainian].

**Viktoriia Nykonchuk**, Prof., Dr. Econ. Sci, **Ihor Khitrov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Svetlana Pachkevych**, Senior Lecturer

*National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine*

### **Implementation of Intercept Parking Concept in Urban Environment**

The implementation of intercept parking concepts in urban environments is crucial for improving transportation infrastructure and enhancing residents' quality of life. The city of Rivne, while compact, faces challenges of traffic congestion and air pollution due to its limited area and high population density. One of the key measures to address these issues is the implementation of parking systems, specifically intercept parking. Intercept parking involves creating parking zones outside the city center to reduce the flow of cars in central areas. This can significantly reduce traffic congestion and promote the use of public transportation, thereby improving the city's transportation system. For example, research has shown that effectively utilizing intercept parking can reduce the number of cars entering the city center and encourage the use of public transport.

However, successful implementation of intercept parking requires a comprehensive approach and consideration of various aspects, including the needs of the local population, characteristics of the transportation infrastructure, and potential implications for city development and road safety.

The article presents research and data collection on the capacity of inbound car flows in various parts of the intercept parking network aimed at evaluating the load on the road network of the city of Rivne during peak periods, taking into account the city's level of motorization. The study analyzed inbound traffic flows at six key points on the main arterial streets of the city. The research results identified a significant load on Rivne's road network from inbound traffic flows, negatively impacting the city's mobility. The only viable solution to this problem is the implementation of an automated intercept parking network both in the suburbs and in the central part of the city. Intercept parking represents a crucial step towards optimizing urban space and improving residents' quality of life by reducing traffic congestion in cities and fostering the development of sustainable urban environments.

Implementing intercept parking concepts proves to be a significant step in urban space improvement and enhancing residents' quality of life. The practical application of this concept can contribute to further development and optimization of urban agglomerations, as it promotes efficient use of parking spaces and the development of safe and balanced urban environments.

**urban environment, road network, intercept parking, traffic flow, transportation system service quality**

*Одержано (Received) 29.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 05.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

УДК 338.47:656.615

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.187-197](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.187-197)

**О.С. Хачатурян**, канд. екон. наук

*Льотна академія Національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: elenarice1210@gmail.com*

**О.В. Щербак**, доц., канд. техн. наук

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна*

*e-mail: olegcherbak@gmail.com*

## Методологія досліджень логістичних процесів у регіоні

Досягнення високої точності прогнозу розвитку логістичних систем у сфері міжрегіонального та міжнародного обміну є однією з основних вимог здійснення принципів логістичного менеджменту регіону.

У роботі обґрунтована необхідність створення програми логістичних досліджень, у яких передбачався б порядок їх проведення, інструментарій, методи обробки та аналізу маркетингової й логістичної інформації. Виокремлена група факторів, які впливають на ефективність розвитку регіону.

Запропонована класифікація процесів логістичного менеджменту регіону за видами функціональних потоків логістики та логістичними операціями. Розроблено алгоритм проведення досліджень логістичних процесів у регіоні.

Розглянута можливість керування ефективністю логістичних процесів у межах стратегічного планування розвитку території. При цьому потік представлено як керовану підсистему в складі системи керування, котру доцільно здійснювати в просторі чотирьох перемінних: часової, просторової, кількісної та якісної.

Запропоновано індекс ефективності, котрий визначає оцінку параметрів ефективності реалізації логістичної стратегії та за допомогою якого можна виявити невідповідності в діяльності підсистем логістики регіону.

**логістичні дослідження у регіоні, логістична система, логістичні потоки, ефективність логістичного процесу, параметри керування логістикою**

**Постановка проблеми.** Однією з основних вимог здійснення принципів логістичного менеджменту регіону є досягнення високої точності прогнозу розвитку логістичних систем у сфері міжрегіонального та міжнародного обмінів. Розширення глобальних економічних зв'язків регіонів, насамперед, пов'язано зі збільшенням міжнародних контактів між Україною, ЄС, США і іншими країнами, що надають військову та гуманітарну допомогу після введення воєнного стану. Крім того, враховуючи те, що майбутні й існуючі українські підприємства різноманітні за типом кінцевого продукту, створення схем логістичних процесів також повинно бути диференційовано. Створення великомасштабних логістичних комплексів вимагає організації і проведення різноманітних розрахункових і дослідницьких підготовчих робіт, частиною котрих є маркетингові та логістичні дослідження.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Питання обґрунтування необхідності проведення логістичних досліджень раніше розглядалися такими закордонними вченими, як Пол Р. Мерфі мл. і Дональд Майкл Вуд [1], Д. Уотерс, С. Рінслер і Е. Суїні [2, 3]. У працях зазначених учених підкреслювались можливості логістики в частині дослідження, прогнозування та подальшої оптимізації витрат, оптимізації логістичних процесів у галузях, у тому числі питання розташування логістичних центрів, підприємств і складів. Як відмічають вітчизняні дослідники, особливо зростає роль теорії та методології в логістиці в епоху глобалізації світової економіки з урахуванням специфічних періодів трансформації транспортних і виробничих систем та тотально-планово організованої економіки у постіндустріальну і комерціалізовану [4]. У той же час нагальним є удосконалення правових, організаційних і економічних механізмів розвитку транспортної системи з використанням Європейського досвіду, залучення інвестицій у розвиток інфраструктури та формування транспортних вузлів і міжгалузевих кластерів, ефективного просторового планування та масштабного впровадження новітніх технологій [5]. Не зважаючи на певні досягнення в тематиці дослідження, недостатньо уваги приділяється проблемі управління ефективністю логістичних процесів на регіональному рівні.

**Постановка завдання.** Обґрунтування необхідності проведення логістичних досліджень у регіоні як специфічного виду дослідження факторів, які впливають на ефективність логістичного менеджменту, і на їх основі розробка системи показників для визначення ефективності діяльності суб'єктів логістичної системи.

**Виклад основного матеріалу.** Логістична система управління матеріальними потоками регіону містить у собі множину взаємопов'язаних елементів. В умовах дослідження структури та логістичної системи на рівні міжнародного співробітництва можна виділити:

- транспортно-логістичні центри з розподілу готової продукції та ресурсів;
- логістичні схеми товароруку;
- виробничі логістичні системи;
- системи митного оформлення та контролю;
- розрахунково-аналітичні центри;
- транспортні системи з переміщення вантажів.

Створення системи логістичного менеджменту в регіоні та реалізації логістичних стратегій вимагає здійснення низки підготовчих процедур, пов'язаних із збором і обробкою маркетингової та логістичної інформації.

Вирішення такої проблеми неможливе на рівні логістичних або маркетингових відділів окремих підприємств і організацій, отже необхідно створення програми

логістичних досліджень, у яких передбачався б порядок їх проведення, інструментарій, методи обробки та аналізу маркетингової й логістичної інформації.

Наразі логістичні дослідження є окремим науковим напрямком, який розвивається на основі методології маркетингових досліджень і аналізу витрат у логістиці. Крім того, дослідження вже існуючих логістичних процесів повинно давати інформацію щодо основних показників їх ефективності, що в подальшому буде впливати на розробку оптимальних логістичних схем товароруху. Дослідження логістичних потоків направлено на вивчення потреби в транспортних, кадрових, складських ресурсах, які забезпечують логістичний процес товароруху.

Дослідження процесів логістичного менеджменту зумовлено необхідністю регулювання соціально-економічного розвитку регіону, де логістиці належать такі визначальні функції, як ефективне забезпечення регіону ресурсами, а також їх розподіл і перерозподіл. Як базові фактори, крім володіння природними ресурсами, котрі впливають на ефективність розвитку регіону, необхідно виділити територіальні, адміністративні, економічні, інституціональні, організаційні та демографічні (рис. 1).

Усе це в цілому визначає можливу успішність розвитку регіону, але тільки в умовах ефективно організованих логістичних процесів і потоків.

Існуючі розробки в сфері методології логістичних досліджень і аналізу міжрегіонального товарообміну являють собою широке поле для вибору інструментарію дослідження поточкових процесів, хоча не дають конкретних рекомендацій стосовно до системи міжнародних логістичних операцій.

Дослідження поля логістичного менеджменту являє собою послідовний організований процес сегментування логістичних потоків за пріоритетними ознаками вивчення факторів, які впливають на ефективність логістики регіону.



Рисунок 1 – Групи факторів, які впливають на ефективність розвитку регіону

Джерело: розроблено авторами

Усі логістичні потоки в регіоні можна класифікувати за низкою ознак:

- ресурсу: матеріальні, фінансові, інформаційні, трудові;
- входу та виходу: вхідні та вихідні;
- відношення до середовища регіону: зовнішні та внутрішні;
- місця виникнення: потоки закупівель, внутрішньо системні виробничі потоки, розподільчі потоки;
- за галузевими сферами господарювання.

Логістичні процеси, пов'язані з керуванням потоками ресурсів, також підлягають класифікації за видами функціональних потоків логістики та логістичним операціям (рис. 2).

На початковому етапі здійснення логістичних досліджень потокових процесів необхідно визначити потреби та параметри моніторингу. Ними в сфері керування транспортними потоками є:

- рівень потреби в транспортних одиницях для перевезення пасажирів і вантажів;
- тривалість часу виконання одного маршруту;
- час чекання на зупинках громадського транспорту чи час простою в процесі навантажувально-розвантажувальних робіт і здійснення транспортно-експедиційних послуг.

На другому етапі виявляють фактори, що впливають на досягнення потреб, які раціонально диференціювати за видами логістичних функцій. У цьому випадку можна виділити функції: формування замовлення, забезпечення виконання замовлення, розподілення ресурсів, керування процесом. Це можуть бути:

1. Визначення величини замовлення, тобто кількості транспортних одиниць, яка залежить від ефективної методики розрахунку відносно таких параметрів, як чисельність населення, насиченість конкурентного ринку, сезон.
2. Забезпечення замовлення, котре залежить від достатнього фінансування, надійності постачальника, внутрішніх факторів самого підприємства.
3. Визначення факторів, які впливають на розподілення транспортних одиниць.
4. Визначення факторів, які впливають на ефективність процесу перевезень: безпека, виробнича дисципліна, диспетчеризація.

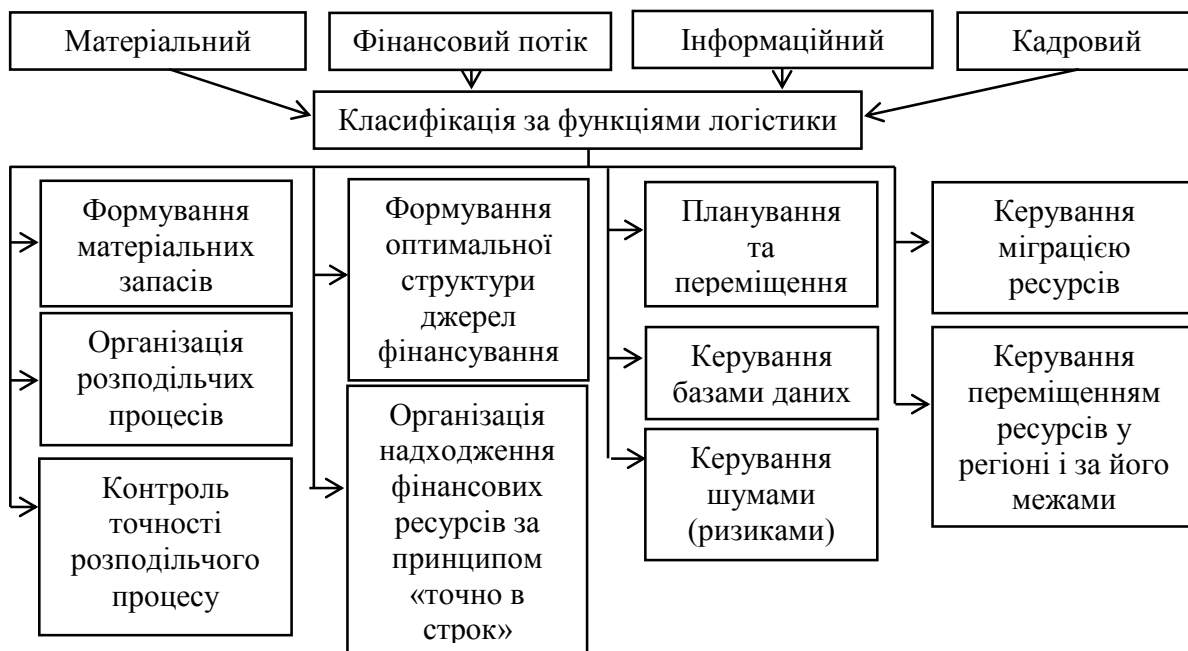


Рисунок 2 – Класифікація процесів логістичного менеджменту регіону за видами потоків  
Джерело: розроблено авторами

Як видно з наведеної послідовності, кожна група функцій передбачає виявлення власної групи факторів, з-за чого аналіз стає достатньо об'ємною та трудомісткою процедурою (рис. 3).

На третьому етапі безпосередньо виконується збір даних щодо процесу за результатами прямого спостереження, збору звітних даних, які групуються за функціями логістики: формування замовлень, керування запасами та складування, транспортування, розподілення, сервіс.

Прогнозування розвитку логістичних процесів полягає у вимірюванні таких параметрів логістичного процесу, як обсяг матеріальних ресурсів, час і період їх постачання, запланований рівень якості процесу, прогнозування середніх цін договору, прогноз сум фінансування бюджету територій у межах обслуговування логістичних процесів.

Застосовуючи процесний підхід до дослідження процедур керування матеріальними, фінансовими, інформаційними потоками, необхідно визначити потреби на вході логістичного процесу керування потоком і відповідність їх реалізованому кінцевому продукту керування.



Рисунок 3 – Алгоритм проведення досліджень логістичних процесів у регіоні

Джерело: розроблено авторами

Представлена задача передбачає постановку мети дослідження. У даному випадку як мету дослідження можна розглядати створення та оптимізацію транспортно-логістичної схеми руху логістичних потоків у системі міжнародного обміну між Україною та Польщею. Поставлена мета вимагає розв'язання таких задач дослідження, як визначення обсягів ресурсів, які постачаються, визначення базових і оптимальних параметрів постачання у споживача; розробка схем транспортування та складування матеріальних ресурсів; забезпечення безпеки переміщення та

розташування матеріалів; визначення можливих логістичних ризиків і розробка заходів з їх зниження; визначення параметрів ефективності логістичної схеми транспортування вантажів. Для прогнозування кожного параметру процесу використовуються банки статистичної інформації та математичні моделі.

Визначення параметрів і оцінка ефективності логістичного процесу початково передбачає формулювання власне поняття ефективності стосовно до умов територіальності та організації логістичного керування матеріальним потоком.

Ефективність є результативним параметром логістичної системи. Існує велика кількість загальних підходів до оцінки ефективності процесів. Початково ефект можна визначити як результат деяких причин або дій. Поняття економічного ефекту пов'язано з визначенням різниці між результатами діяльності та витратами на досягнення цих результатів.

Стратегічна ефективність являє собою ступінь повноти реалізації стратегії, якості розв'язання поставлених задач стосовно до логістичної стратегії, повноту та якість реалізації цілей логістики в межах організації логістичних процесів.

На думку різних спеціалістів, ефективність логістичної системи – це співвідношення між заданим показником результату функціонування логістичної системи та фактично реалізованим [6, 7, 8]. Проте результат логістичного процесу не завжди є співставним з рівнем економічних витрат і неспівставний відносно одиниць вимірювання. Результат може мати якісну чи тимчасову характеристику, у той час як витрати мають вартісну характеристику. Крім того, результат логістичної стратегії та логістичного процесу може не характеризуватися високими кількісними показниками. При цьому ефекти, який він здійснює на зовнішню систему, може бути мультиплікативним і мати вирішальне значення для розвитку множини взаємопов'язаних систем. У зв'язку з цим частіше визначають не ефективність логістичних систем, стратегій, процесів, а ефективність логістичних функцій. Тому для розробки підходів до аналізу та розрахунку ефективності логістичних процесів, логістичних систем і стратегій, необхідна подальша формалізація цих понять у межах територіальних систем.

Підвищення ефективності логістичної системи може бути пов'язано як з екстенсивними, так і з інтенсивними факторами. До екстенсивних факторів слід віднести кількісне нарощування об'ємних характеристик логістичного процесу. До інтенсивних факторів відносять зусилля, спрямовані на раціональне використання наявних ресурсів, яке виражається в перерозподілі матеріальних потоків, кадрових і фінансових ресурсів у процесі здійснення логістичних операцій.

Ефективність логістичних процесів можна також класифікувати за статичною та динамічною ознаками. До статичної ефективності логістичних процесів відносять ефективність функціонування логістичної системи в зовнішньому середовищі без орієнтації на її подальше зростання. Динамічна ефективність визначає надійність, якість і безпеку системи в довгостроковій перспективі.

Оскільки логістичний процес охоплює матеріальні, фінансові, інформаційні та кадрові потоки, то поняття його надійності та безпеки також буде пов'язано з поняттям «ефективність процесу».

З урахуванням розуміння територіального визначення ефективності логістичних процесів необхідно інтегрувати принципи оцінки управлінської ефективності в систему логістичного менеджменту.

Найбільш зручний у розрахунку показник динамічної ефективності:

$$E_{\partial} = H \cdot B \cdot Я,$$

де  $H$  – надійність логістичної системи;

$B$  – безпека логістичної системи;

$Я$  – якість логістичної системи.

Показник динамічної ефективності характеризує не тільки рівень, але й якість роботи логістичної системи. Це пояснюється його інтегрованим характером, а також тим, що складові компоненти цього показника є цілком вимірні й можуть бути також використані, як критерії. Так, при вимірюванні надійності розраховується співвідношення частки виконаних замовлень у різні роки. Вимірювання безпеки характеризується співвідношенням показників частки замовлень, виконаних без порушення норм безпеки будь-яких логістичних процесів. Вимірювання показника якості найбільш специфічне, так як залежить від стратегії його формування, котра визначається керівництвом.

У цілому, під керуванням ефективністю розуміють сукупність процесів керування, аналізу та інформаційних технологій у сфері фінансової та операційної діяльності організацій. Дані процеси зв'язані зі сферою стратегічного планування й дозволяють оцінювати ефективність діяльності господарських систем і керувати процесом досягнення запланованих результатів. Методи оцінки ефективності керування використовуються в даний момент при оцінці ефективності керування регіональним утворенням і можуть стати основою для розробки показників ефективності керування логістичними процесами на території [9, с. 52-53, 10].

Керування ефективністю логістичних процесів у регіоні ґрунтується на підході до аналізу трьох груп індикаторів:

- соціально-економічного розвитку регіону;
- ефективності реалізації маркетингових стратегій, так як логістичні стратегії часто реалізуються в межах маркетингових;
- реалізації логістичного підходу в керуванні потоковими процесами на території.

Збір і аналіз інформації за першими двома групами індикаторів ґрунтується на систематизації економіко-статистичних і маркетингових досліджень процесів регіонального розвитку та міжрегіонального обміну.

Для визначення ефективності третьої групи індикаторів необхідно означити напрямки логістичних досліджень. Як видно з алгоритму, центральне місце в дослідженні ефективності поточкових процесів займає визначення та дослідження його параметрів. В якості параметрів логістичного процесу за кордоном використовують такі показники [11]:

- рівень обслуговування клієнтів;
- величину запасів матеріальних цінностей;
- рівень витрат на логістику, в тому числі транспортних;
- рівень адміністративних витрат на логістику.

Перед здійсненням вибору параметрів, які вимірюють ефективність логістики на територіальному рівні та рівні міжнародних обмінних операцій, необхідно класифікувати підходи до визначення процесів, які протікають у існуючій логістичній системі відповідно до цілей дослідження.

В основу запропонованої до розгляду класифікації покладені підходи до керування ефективністю організації, суть яких полягає в підвищенні узгодженості різних напрямків ділової активності. У даному випадку розглядається можливість керування ефективністю логістичних процесів у межах стратегічного планування розвитку території. Як відомо, процес керування передбачає здійснення контролю над

показниками діяльності об'єкту керування, тому виділено три підходи до вимірювання ефективності логістичних процесів:

- 1) вимірювання параметрів ефективності потокових процесів у логістиці;
- 2) вимірювання ефективності методів керування логістичним процесом;
- 3) вимірювання ефективності логістичних стратегій, які реалізуються, та/чи вимірювання невідповідностей результатів діяльності існуючих логістичних систем.

З точки зору логістики потік – економічна величина, що характеризує систему структурно взаємопов'язаних елементів, які динамічно змінюються впродовж деякого періоду часу та приймаються як єдине ціле.

Потік у логістиці є динамічною величиною та диференціальною функцією запасу. Отже, вимірювання ефективності потокового процесу повинно ґрунтуватися на показниках територіальних запасів у системі вимірювання часу та натуральних показниках. Якість потокового процесу може бути охарактеризована за допомогою показників динаміки стану запасів і резервів логістичної системи регіону.

Представляється необхідним розглядати потік як керовану підсистему в складі системи керування, котру доцільно здійснювати в просторі чотирьох перемінних: часової; просторової; кількісної; якісної.

Для просторового вимірювання потоку характерні такі категорії, як траєкторія, довжина, початкова та кінцева точки, для тимчасового – тривалість часу постачання, для кількісного – обсяг постачань і т. п.

Стосовно кожного потокового процесу повинні бути виявлені деякі специфічні риси, відповідно до котрих вибираються параметри вимірювань.

У напрямку вимірювання ефективності методів керування логістичним процесом найбільш дійовим підходом вважається порівняння очікуваних і фактичних результатів, а також очікуваних і фактичних витрат. Таким чином параметри керування логістикою спираються на показники витрат, що характеризує економічну ефективність керування, і результатів, що характеризують стратегічну ефективність керування.

Пропонується проводити попарні порівняння: «очікувані витрати-фактичні витрати», «очікувані витрати-очікувані результати», «фактичні витрати-фактичні результати» та «очікувані витрати-очікувані результати».

Остання пара характеризує порівняння фактичної та очікуваної ефективності від використання нових методів керування логістикою.

До третьої групи параметрів можна віднести:

1. Досяжність цілей за часом

$$T_p = T_{\text{факт}} / T_{\text{план}},$$

де  $T_{\text{факт}}$  – фактичний час;

$T_{\text{план}}$  – запланований час.

2. Досяжність цілей за якістю реалізації стратегії

$$E_{\text{я}} = K_{\text{з}} / K_{\text{с}},$$

де  $K_{\text{з}}$  – кількість задоволених контрагентів;

$K_{\text{с}}$  – загальна кількість контрагентів.

3. Дотримання повноти реалізації стратегії

$$P_{\text{м}} = M_{\text{ф}} / M_{\text{пл}},$$

де  $M_{\text{ф}}$  – фактична кількість виконаних заходів;

$M_{\text{пл}}$  – загальна кількість запланованих заходів.

4. Комбінаторність стратегії – дотримання сполучуваності цілей логістичної стратегії зі стратегіями маркетингу та загальним стратегічним планом розвитку території

$$K_u = U_{\text{лог}} / U_p,$$

де  $U_{\text{лог}}$  – кількість цілей логістики;

$U_p$  – кількість цілей стратегії регіону.

Таким чином, можна представити індекс ефективності, котрий визначає оцінку параметрів ефективності реалізації логістичної стратегії та за допомогою якого можна виявити невідповідності в діяльності підсистем логістики, в такому вигляді:

$$I_e = T_p E_y P_m K_u.$$

**Висновки.** Отже, з вище викладеного можна зробити такі висновки щодо методології дослідження логістичних процесів у регіоні:

1. Методи дослідження логістичних процесів повинні бути спрямовані на вивчення взаємозв'язку факторів ефективності керування логістикою регіону та рівнем якості життя й соціально-економічного розвитку території.

2. Постановка мети, формулювання задач і вибір інструментарію дослідження логістичних процесів залежать від класифікаційної групи логістичного процесу.

3. Базове значення має визначення ефективності керування логістичними процесами в регіоні. З цією метою критерії ефективності повинні бути наперед сформовані та наведена методика їх розрахунку.

4. Вибір критеріїв ефективності повинен ґрунтуватися на визначенні ефективності логістичної стратегії, яка реалізується в регіоні.

## Список літератури

1. Paul R. Murphy Jr., Donald Michael Wood. Contemporary Logistics. Pearson Education. 2014. 326 p.
2. Waters D., Rinsler S. (2014). Global Logistics (7th ed.). Kogan Page. URL: <https://www.perlego.com/book/1589965/global-logistics-new-directions-in-supply-chain-management-pdf>.
3. Sweeney, E. & Waters, D. Global logistics. New directions in supply chain management, 8th Edition. Kogan Page Limited. 2021. 453 p.
4. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія / Аулін В.В. та ін.; за ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.
5. Оцінка ефективності логістичного менеджменту на регіональному та національному рівнях / Іртишева І.О. та ін. *Ефективна економіка*. 2020. № 4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7842> (дата звернення: 14.03.2024). DOI: 10.32702/2307-2105-2020.4.10
6. Лисько Т.Г., Луценко І.С. Основні засади функціонування логістичної системи підприємства *Актуальні проблеми економіки та управління : збірник наукових праць молодих вчених*. 2012. Вип. 6.
7. Репіч Т.А., Дячкова Т.О. Ефективність логістичної системи підприємства. *Ефективна економіка*. 2018. № 12. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6739> (дата звернення: 18.03.2024). DOI: 10.32702/2307-2105-2018.12.82
8. Колісніченко А.В., Семенова А.О. Підвищення ефективності логістичних процесів шляхом автоматизації управління логістичним підприємством в умовах цифрової трансформації. *Політ. Сучасні проблеми науки: тези доповідей XXI Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, 28 червня 2021 р. Київ: Національний авіаційний університет. 2021. С. 49-50.
9. Юрійчук С.М. Особливості управління соціально-економічним розвитком регіонів у сучасних умовах. *Інвестиції: практика та досвід*. 2011. №6. С. 52-53.
10. Слінівський В.Ю. Наукові засади управління сталим соціально-економічним розвитком регіонів. *Ефективна економіка*. 2018. № 12. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4934#> (дата звернення 20.03.2024).
11. Paul Murphy Jr., Knemeyer A. Contemporary Logistics. 12th Edition. Pearson. 2017. 320 p.

## References

1. Paul R., Murphy Jr. & Donald Michael Wood. (2014). *Contemporary Logistics*. Pearson Education. 326 p. [in English].
2. Waters, D. & Rinsler, S. (2014). *Global Logistics (7th ed.)*. Kogan Page. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1589965/global-logistics-new-directions-in-supply-chain-management-pdf> [in English].
3. Sweeney, E. & Waters, D. *Global logistics (2021)*. New directions in supply chain management, 8th Edition. Kogan Page Limited. 453 p. [in English].
4. Aulin, V.V. et al. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychyykh system [Theoretical and methodological foundations of the logistics of transport and production systems]*. Aulin V.V. (Ed). Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
5. Irtysheva, I. et al (2020). Otsinka efektyvnosti lohistychnoho menedzhmentu na rehional'nomu ta natsional'nomu rivniakh [Evaluation of logistic management efficiency at regional and national levels]. *Efektivna ekonomika – Efficient economy*, 4. Retrieved from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7842> DOI: 10.32702/2307-2105-2020.4.10\_ [in Ukrainian].
6. Lys'ko, T.H. & Lutsenko, I.S. (2012). Osnovni zasady funktsionuvannya lohistychnoi systemy pidpryemstva [Basic principles of operation of the logistics system of the enterprise]. *Aktual'ni problemy ekonomiky ta upravlinnia : zbirnyk naukovykh prats' molodykh vchenykh – Actual problems of economics and management: a collection of scientific works of young scientists*, 6 [in Ukrainian].
7. Repich, T.A. & Diachkova, T.O. (2018). Efektyvnist' lohistychnoi systemy pidpryemstva [Efficiency of the logistic system of the enterprise]. *Efektivna ekonomika – Efficient economy*, 12. Retrieved from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6739> DOI: 10.32702/2307-2105-2018.12.82\_ [in Ukrainian].
8. Kolisnichenko, A.V. & Semenova, A.O. (2021). Pidvyschennia efektyvnosti lohistychnykh protsesiv shliakhom avtomatyzatsii upravlinnia lohistychnym pidpryemstvom v umovakh tsyvrovoi transformatsii [Increasing the efficiency of logistics processes by automating the management of a logistics enterprise in the conditions of digital transformation]. *Flight. Modern problems of science: tezy dopovidey XXI Mizhnar. nauk.-prakt. konf. zdobuvachiv vyschoi osvity i molodykh uchenykh0 (28 chervnnia 2021 r.) – 21st International Scientific and Practical Conference of Graduates of Higher Education and Young Scientists* (pp. 49-50) [in Ukrainian].
9. Yuriychuk, S.M. (2011). Osoblyvosti upravlinnia sotsial'no-ekonomichnym rozvytkom rehioniv u suchasnykh umovakh [Peculiarities of management of socio-economic development of regions in modern conditions]. *Investytsii: praktyka ta dosvid - Investments: practice and experience*, 6, 52-53 [in Ukrainian].
10. Yelinievs'kyj, V.Yu. (2018). Naukovi zasady upravlinnia stalym sotsial'no-ekonomichnym rozvytkom rehioniv [Scientific principles of management of sustainable socio-economic development of regions]. *Efektivna ekonomika – Efficient economy*, 12. Retrieved from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4934#> [in Ukrainian].
11. Paul Murphy Jr. & Knemeyer, A. (2017). *Contemporary Logistics*. 12th Edition. Pearson. 320 pages [in English].

**Olena Khachaturian**, senior lecturer, PhD in econ. sci.

*Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Oleh Shcherbak**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci.

*National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

### **Research methodology of logistics processes in the region**

In the conditions of conducting business, which are constantly changing, there is a need to adapt existing and create new mechanisms in logistics. The creation of large-scale logistics complexes requires the organization and implementation of various calculation and research preparatory works, part of which are marketing and logistics studies.

The work substantiates the need to create a program of logistics research, which would include the order of their conduct, tools, methods of processing and analysis of marketing and logistics information. The basic factors that affect the effectiveness of the region's development are highlighted, including, in addition to the possession of natural resources, territorial, administrative, economic, institutional, organizational and demographic factors. The study of the field of logistics management is defined as a consistent organized process of segmentation of logistics flows according to the priority features of the study of factors that affect the efficiency of logistics in the region.

The proposed classification of logistics management processes of the region by types of functional logistics flows and logistics operations. An algorithm for researching logistics processes in the region has been developed. It is clear from the algorithm that the central place in the study of the efficiency of flow processes is

occupied by the definition and study of its parameters: the level of customer service; the amount of stocks of material values; the level of logistics costs, including transport costs; the level of administrative costs for logistics.

The possibility of managing the efficiency of logistics processes within the strategic planning of the territory development is considered. At the same time, the flow is presented as a managed subsystem in the control system, which should be implemented in the space of four variables: temporal, spatial, quantitative and qualitative.

An efficiency index is proposed, which determines the evaluation of the parameters of the efficiency of the implementation of the logistics strategy and with the help of which inconsistencies in the activity of the logistics subsystems of the region can be detected.

**logistics research in the region, logistics system, logistics flows, logistics process efficiency, logistics management parameters**

*Одержано (Received) 24.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

УДК 656.1/5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.197-204](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.197-204)

**М. М. Мороз**, проф., д-р техн. наук, **Т. В. Гайкова**, доц., канд. техн. наук,

**І. О. Солошич**, проф., д-р пед. наук

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,*

*м. Кременчук, Україна*

*e-mail: mykolai.moroz@gmail.com*

## Оптимізація режимів взаємодії магістрального та міського пасажирського транспорту м. Кременчук

У статті розглядаються ключові компоненти організації та оптимізації взаємодії пасажирського магістрального та міського транспорту на прикладі міста Кременчука. Магістральний пасажирський транспорт представлений такими видами транспорту як автомобільний, залізничний та річковий, а міський – тролейбусами, автобусами та маршрутними таксомоторами. Оптимізацію взаємодії поведено за критерієм зменшення сумарних приведених затрат, що пов'язані з роботою міського пасажирського транспорту та очікуванням пасажирів поїздки при пересадці з одного на інший видів транспорту. Запропоновано узагальнений критерій оцінки сумарних витрат коштів учасників транспортного процесу, який в результаті організації перевезень проявляє тенденцію мінімізуватися.

**магістральний пасажирський транспорт, міський пасажирський транспорт, оптимізація, затрати перевізника, соціальні витрати часу пасажирів**

**Постановка проблеми.** Пасажирський транспорт забезпечує потреби населення в послугах з переміщення як зовнішніх (магістральний) так і внутрішніх (міський). При переході пасажиропотоку з магістрального на міський пасажирський транспорт гостро стоїть питання щодо структури парку транспортних засобів за їх кількістю, пасажиромісткістю, видами та витратами палива, екологічними показниками.

У таких умовах проблема збалансованого та ефективного використання і розвитку пасажирського транспорту отримує виключну актуальність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перед перевізниками стоїть завдання вибору заходів, які найбільш результативні та вимагають менших витрат. При цьому зазначено, що показники якості визначаються як залежності від параметрів, що описують умови пересування [1, 2]. Також ефективність функціонування пасажирського транспорту визначається формою якісно-кількісного вираження мети транспортного обслуговування населення [3, 4, 5].

Робота транспортних засобів на маршруті впливає на загальну величину витрат часу населення на пересування та їх ефективне використання [3, 6, 14]. Деякі з критеріїв є зниження витрат часу пасажирів на поїздки, ефективність функціонування автобусів та рівень доходів перевізника [5, 7]. Згідно [6, 7, 15] якість продукції (послуги) – сукупність її властивостей, що обумовлюють здатність задовольняти потреби населення.

**Постановка завдання.** Визначити оптимальне значення кількості транспортних засобів на маршрутній мережі міста при взаємодії магістрального та внутрішнього пасажирського транспорту.

**Основні результати досліджень.** Магістральний транспорт м. Кременчук, що обслуговує пасажиропотоки (прибуття та відправка), представлений автомобільним (рис. 1), залізничним (рис. 2) та водним (рис. 3) видами транспорту.

Автобусний вокзал у Кременчуку розташований на вулиці Театральній, 32/6, і служить для організації міжміських та міжнародних перевезень. На цьому вокзалі діють п'ять кас, є зала очікування, камери схову, а також буфет, розташований у будівлі вулиці Театральної.

Залізничний вокзал "Кременчук" входить до складу залізничного вузла міста і є частиною комплексу потужних підприємств. Цей вокзал забезпечує більше 80% перевезень на Полтавській дирекції та понад 60% на Південній залізниці.

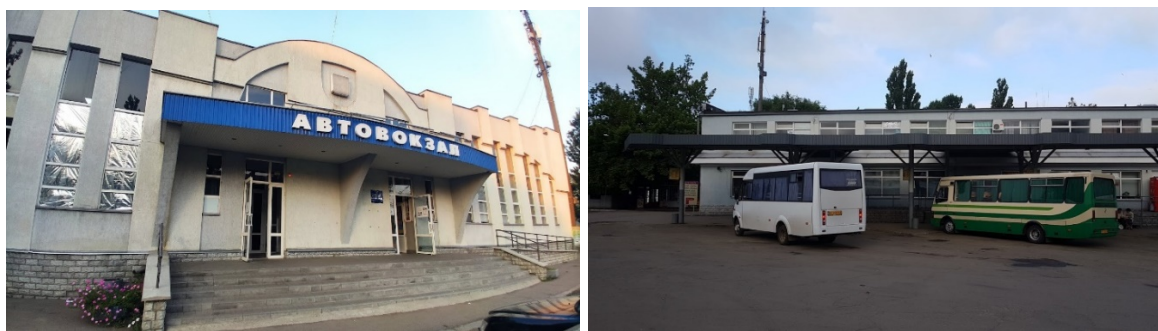


Рисунок 1 – Загальний вигляд автовокзалу «Кременчук» та перонів

Джерело: [8]

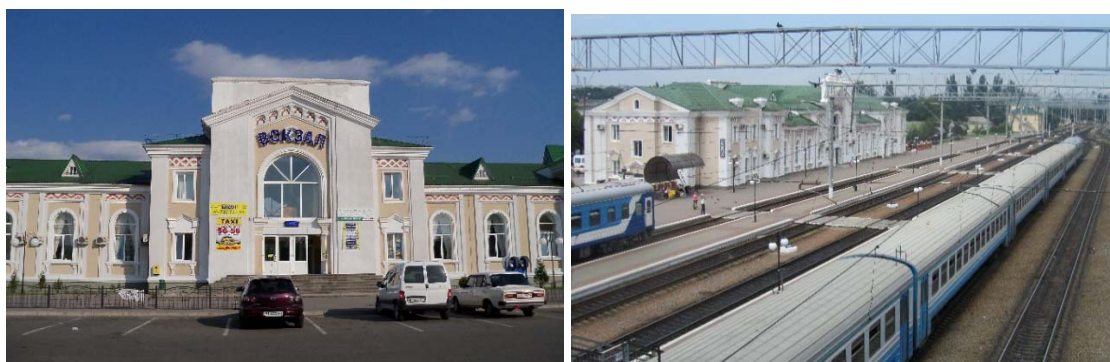


Рисунок 2 – Загальний вигляд залізничного вокзалу «Кременчук» та перонів

Джерело: [9]

Південна залізниця, під керівництвом Державної адміністрації залізничного транспорту «Укрзалізниця», завершила реконструкцію будівлі вокзалу, яка включала у себе не лише відновлення самого вокзалу, але й ремонт привокзальної площі з пероном. Робітники виконали повний комплекс робіт, включаючи заміну вікон, системи опалення, укладення гранітної підлоги, оновлення кімнати для матері і дитини, а також

камер схову. В середині вокзалу були відремонтовані квиткові каси, зал чекання, кафе, пункт зв'язку, аптека, кімната міліції та туалети. Після реконструкції вокзал має місткість близько 1000 осіб [10]. У січні 2006 року був запущений швидкісний поїзд № 173/174 «Кремінь», який з'єднав Кременчук з Києвом, а пізніше було запущено також поїзд № 177/178 «Дніпровські зорі», який працює на маршруті Харків - Кременчук. З січня 2009 року пасажирський рух на електротязі був відкритий на ділянці Кременчук - Знам'янка. Лінія була електрифікована змінним струмом (~25 кВ). Упродовж 2010–2011 років також була електрифікована лінія Кременчук – Полтава. В зв'язку з цим у 2007 році в Кременчуці була створена нова дистанція електропостачання (ЕЧ-8).



Рисунок 3 – Загальний вигляд річного вокзалу «Кременчук» та причалу

Джерело: [11]

Кременчуцький річковий вокзал розташований на одній з пристаней порту «Кременчук» і знаходиться на лівому березі річки Дніпро в центральній частині міста.

Від річкового вокзалу починається вулиця, яка закінчується на привокзальній площі залізничного вокзалу, до якої примикає автовокзал (рис. 4). Тому комплекс магістрального пасажирського транспорту міста розташований компактно, а обслуговує його рухомий склад  $n_j$  міського пасажирського транспорту, що представлений мережею маршрутів тролейбусів №№ 1, 2, 5, автобусів №№ 3А, 17, 25 та маршрутними таксомоторами №№ 1, 3А, 10, 15, 15Б, 16, 16А, 17, 18, 20, 24, 28, 30. Таким чином, взаємодію розглянемо як систему обміну пасажиропотоків  $Q_i$  магістрального (автомобільний  $i = 1$ , залізничний  $i = 2$ , річковий  $i = 3$ ) і міського  $Q_j$  (тролейбуси  $j = 1$ , автобуси  $j = 2$ , маршрутні таксомотори  $j = 3$ ) видів транспорту. При повному задоволенні потреб пасажирів при взаємодії магістрального пасажирського транспорту з міським пасажирським транспортом та ефективній організації їх роботи виконується умова  $Q_i = Q_j$ .

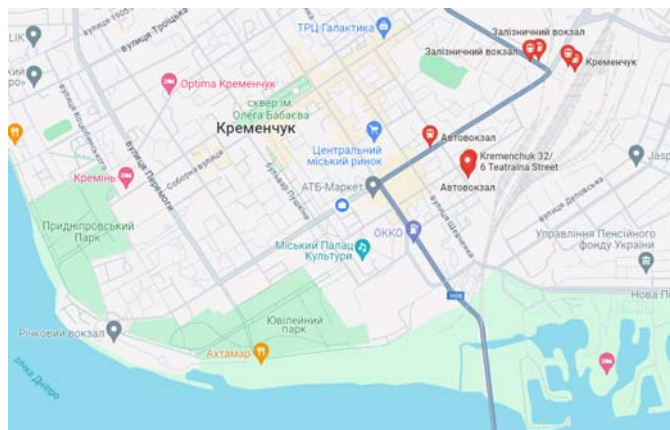


Рисунок 4 – Схема комплексу магістрального та міського пасажирського транспорту м. Кременчук  
Джерело: [12]

Режим взаємодії магістрального та міського пасажирських видів транспорту залежить від середньодобової кількості  $Q_i$  прибуття (відправлення) пасажирів  $i$ -го магістрального виду транспорту (автомобільного, залізничного, річкового. На сьогодні перевезення пасажирів на річковому вокзалі «Кременчук» не відбувається, як і в цілому по акваторії р. Дніпро, тобто  $Q_3 = 0$ ,  $i = 3$ ), середньої місткості одиниці рухомого складу міського транспорту  $q_j$ , що обслуговують вокзал (пристань), середню вартість їх однієї машино-години  $Z_{ек}$  та пасажиро-години  $B_{нас-год}$ . Оптимальна взаємодія міського з магістральним транспортом досягається якщо сумарні приведені затрати  $\sum Z$ , пов'язані з роботою міського пасажирського транспорту  $Z_{пер}$  та очікуванням пасажирів  $Z_{нас}$ , будуть мінімальні:

$$\sum Z = Z_{пер} + Z_{нас} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $Z_{пер}$  – приведені експлуатаційні затрати перевізника, пов'язані з роботою міського пасажирського транспорту;

$Z_{нас}$  – вартісна оцінка соціальних витрат часу поїздки, пов'язаних з очікуванням пасажирів.

Експлуатаційні витрати підприємства визначаються як добуток експлуатаційних витрат одного транспортного засобу  $Z_{ек}$  на їх кількість  $n_j$ , що працюють на конкретному маршруті за заданий період часу  $T_j$ :

$$Z_{пер} = Z_{ек} n_j T_j. \quad (2)$$

Соціальні витрати, пов'язані з очікуванням пасажирів визначаємо за формулою:

$$Z_{нас} = B_{нас-год} t_{оч} Q_j, \quad (3)$$

де  $Q_j$  – середня кількість пасажирів, що обслуговується  $j$ -м міським пасажирським транспортом за період  $T_j$ ;

$B_{нас-год}$  – вартість однієї пасажиро-години, який розраховується як частка від ділення доходів пасажирів на фонд робочого часу;

$t_{оч}$  – середня тривалість очікування пасажиром рухомого складу міського транспорту при відправці з привокзальної площі. Пасажиромісткість одиниці рухомого складу магістрального пасажирського транспорту  $q_i$  відрізняється від пасажиромісткість одиниці рухомого складу міського пасажирського транспорту  $q_j$ , як правило,  $q_i \gg q_j$ . При відправці магістральним транспортом, група пасажирів за кореспонденцією формується в терміналі в спеціально облаштованих місцях (зал очікування) шляхом їх підвезенням до привокзальних площ міським транспортом. Також, враховуючи, що міський пасажирський транспорт працює в умовах значних коливань пасажиропотоків, виникають періоди коли завантаження рухомого складу перевищує номінальну місткість  $q_j$ , тобто статичний коефіцієнт використання пасажиромісткості рухомого складу більше одиниці:  $\gamma_c > 1$ . Тому час очікування  $t_{оч}$  пасажирів транспортних засобів міського транспорту визначаємо за формулами:

$$t_{оч} = \frac{I}{2} = \frac{T_{об}}{2n_j}, \quad (\gamma_c < 1);$$

$$t_{оч} = \frac{T_{об}}{2n_j} + \frac{t}{2}(\gamma_c - 1), \quad (\gamma_c > 1),$$
(4)

де  $I$  – інтервал руху транспортних засобів;

$T_{об}$  – час обороту на маршруті;

$t$  – тривалість пікового періоду, коли завантаження рухомого складу міського пасажирського транспорту  $\gamma_c > 1$ .

Підставив  $Z_{пер}$  та  $Z_{nac}$  в (1), отримаємо:

$$\sum Z = Z_{ек} n_j T_j + B_{nac-зод} \left( \frac{T_{об}}{2n_j} Q_{jm} + \left( \frac{T_{об}}{2n_j} + \frac{t}{2}(\gamma_c - 1) \right) Q_{jn} \right),$$
(5)

$Q_{jm}$  – кількість пасажирів, що вибувають з привокзальної площі в «міжпіковий» період при  $\gamma_c \leq 1$ ;

$Q_{jn}$  – кількість пасажирів, що вибувають з привокзальної площі в «піковий» період при  $\gamma_c > 1$ .

При визначенні експлуатаційних витрат до уваги беруться статті [13].

В якості аргументу для розрахунку годинних витрат приймаємо кількість рухомого складу міського пасажирського транспорту на лінії, від чого залежить інтервал його руху та час очікування пасажиром на зупинці.

Теоретично оптимальну кількість ТЗ можна визначити диференціюючи рівняння (5) за кількістю транспортних засобів  $n_j$ , отримаємо:

$$\frac{d\sum Z}{dn_j} = Z_{ек} T_j - \frac{B_{nac-зод} T_{об} (Q_{jm} + Q_{jn})}{2n_j^2}.$$
(6)

Враховуючи, що  $Q_{jm} + Q_{jn} = Q_j$  із рівняння  $\frac{d\sum Z}{dn_j} = 0$  знаходимо оптимальне значення кількості транспортних засобів:

$$n_{opt} = 0,71 \sqrt{\frac{B_{nac-зод} T_{об} Q_j}{Z_{ек} T_j}}.$$
(7)

Таким чином, оптимальне значення кількості транспортних засобів міського пасажирського транспорту, що забезпечує його взаємодію з магістральним транспортом прямо пропорційно  $\sqrt{\frac{B_{nac-зод} T_{об} Q_j}{Z_{ек} T_j}}$ . Чим більша їх кількість на маршруті, тим менший час очікування пасажирів, що зменшує соціальні витрати, але тим більші експлуатаційні затрати перевізника.

Поєднання цих аспектів дозволить збалансувати як економічний ефект від надання транспортних послуг, так і соціальний аспект, що безпосередньо позитивно

впливає на розвиток взаємодії магістрального пасажирського транспорту з міським транспортом і міста в цілому.

**Висновки.** Пошуки шляхів зменшення сумарних приведених затрат, що пов'язані з роботою міського пасажирського транспорту та очікуванням пасажирів поїздки дозволяють покращити рівень якості пасажирських перевезень при взаємодії магістрального транспорту з міським. Використання в якості узагальнюючого критерію транспортних послуг дозволяє визначити компроміс інтересів надавача транспортних послуг (перевізника) і споживача послуг (пасажира).

Оптимальне значення кількості транспортних засобів на маршрутній мережі міста прямо пропорційне вартості часу транспортного обслуговування і обернено пропорційне експлуатаційним витратам підприємства перевізника. Також збільшення пасажирообороту, що переходить з магістрального на міський пасажирський транспорт, та довжини маршруту, яка визначає час обороту, вимагає збільшення кількості транспортних засобів.

## Список літератури

1. Коробов С. С. Міські пасажирські перевезення: проблеми та перспективи. *Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, 13-15 березня 2019 р. Вінниця: ВНТУ. 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/paper/view/7268>.
2. Мороз М.М. Підвищення ефективності технологічного процесу транспортного обслуговування м. Кременчук. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2014. Вип. 43. С. 103–109.
3. Вдовиченко В.О. Оцінка ресурсних можливостей міського пасажирського транспорту. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень*. 2014. Вип. 8. С. 35–39. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu\\_tstp\\_2014\\_8\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2014_8_7)
4. Мороз М.М. Розробка заходів удосконалення маршрутної мережі громадського транспорту м. Кременчук на основі розподілу пасажиропотоків гравітаційним методом. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. Вип. 2. С. 44–49.
5. Башинська І.О., Філіппов В.Ю. Проблеми та шляхи удосконалення функціонування міського пасажирського транспорту. *Економіка. Фінанси. Право*. 2017. Вип. 7/1. С. 35-37. URL: [https://www.researchgate.net/publication/319127818\\_Problemi\\_ta\\_slahi\\_udoskonalenna\\_funkcionuvanna\\_miskogo\\_pasazirskogo\\_transportu](https://www.researchgate.net/publication/319127818_Problemi_ta_slahi_udoskonalenna_funkcionuvanna_miskogo_pasazirskogo_transportu)
6. Богаченко М.В. Оцінка якості та ефективності діяльності міського пасажирського автомобільного транспорту в Україні. *Проблеми системного підходу в економіці*. 2019. Вип. № 2(70). С. 65-70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2520-2200/2019-2-9>
7. Левковець П.Р., Мороз М.М., Бубела А.В., Лабута А.В. Системні аспекти вдосконалення логістичного сервісу. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 5. С. 108–111.
8. Автовокзал Кременчука відправив та прийняв перших пасажирів: веб-сайт. URL: <https://www.telegraf.in.ua/kremenchug/10086611-avtovokzal-kremenchuka-vidpraviv-ta-prijnjav-pershih-pasazhiriv.html> (дата звернення: 22.04.2024).
9. Кременчук (станція): веб-сайт. URL: <http://surl.li/svjqw> (дата звернення: 22.04.2024).
10. Історія залізничного вокзалу: веб-сайт. URL: <https://okrain.net.ua/article/read/istoriya-zheleznodorozhnogo-vokzala.html> (дата звернення: 22.04.2024).
11. Кременчуцький річковий вокзал: веб-сайт. URL: <http://surl.li/svjvm> (дата звернення: 22.04.2024).
12. Google карта м. Кременчук: веб-сайт. URL: <https://www.google.com/maps/@49.0635419,33.4207393,16.75z?entry=tту> (дата звернення: 22.04.2024).
13. Методичні рекомендації з формування собівартості перевезень (робіт, послуг) на транспорті, затверджені наказом Міністерства транспорту України від 05.02.2001 р. № 65. <https://ips.ligazakon.net/document/FIN2565>
14. Moroz M.M., Khorolskyi V.L., Moroz O.V., Herasymchuk V.V., Vasylykova K.V. Organization and provision of buses operation on the route taking into account the expenditures of participants of the transportation process. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 206-210.
15. Moroz M., Korol S., Plichko A. Improvement of urban transport system. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2016. Вип. 6 (1). С. 71-75.

## References

1. Korobov, S. S. (2019). Mis'ki pasazhyr'ski perevezennia: problemy ta perspektyvy [Urban passenger transportation: problems and prospects]. *XLVIII naukovo-tekhnichna konferentsiia pidrozdiliv VNTU, (13-15 bereznia 2019 r.) – XLVIII scientific and technical conference of VNTU subdivisions Vinnytsia*. Retrieved from : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/paper/view/7268> [in Ukrainian].
2. Moroz, M.M. (2014). Pidvyschennia efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu transportnoho obsluhovuvannia m. Kremenchuk [Increasing the efficiency of the technological process of transport services in the city of Kremenchuk.]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI» – Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 43, 103–109 [in Ukrainian].
3. Vdovychenko, V.O. (2014). Otsinka resursnykh mozhlyvostej mis'koho pasazhyr'skoho transportu [Assessment of resource capabilities of urban passenger transport.]. *Zbirnyk naukovykh prats' Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana. Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen' – Collection of scientific papers of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Transport systems and transport technologies*, 8, 35–39. Retrieved from : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu\\_tstp\\_2014\\_8\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2014_8_7) [in Ukrainian].
4. Moroz, M.M. (2015). Rozrobka zakhodiv udoskonalennia marshrutnoi merezhi hromads'koho transportu m. Kremenchuk na osnovi rozpodilu pasazhyropotoku hravitatsijnym metodom [Development of measures to improve the route network of public transport in the city of Kremenchuk based on the distribution of passenger traffic using the gravity method]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 2, 44–49 [in Ukrainian].
5. Bashyn'ska, I.O. & Filippov, V.Yu. (2017). Problemy ta shliakhy udoskonalennia funktsionuvannia mis'koho pasazhyr'skoho transportu [Problems and ways of improving the functioning of urban passenger transport]. *Ekonomika. Finansy. Pravo – Economy. Finances. Right*, 7/1, 35-37 Retrieved from : <https://www.researchgate.net/publication/319127818> [in Ukrainian].
6. Bohachenko, M.V. (2019). Otsinka iakosti ta efektyvnosti diial'nosti mis'koho pasazhyr'skoho avtomobil'noho transportu v Ukraini [Assessment of the quality and efficiency of urban passenger road transport in Ukraine]. *Problemy systemnoho pidkhodu v ekonomitsi Problems of the systemic approach in economics*, № 2(70), 65-70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2520-2200/2019-2-9> [in Ukrainian].
7. Levkovets', P.R., Moroz, M.M., Bubela, A.V., Labuta A.V. (2014). Systemni aspekty vdoskonalennia lohistychnoho servisu [Systemic aspects of logistics service improvement]. *Visnyk KDPU imeni Mykhajla Ostrohrads'koho – Herald of Mykhailo Ostrogradsky KDPU*, 5, 108–111 [in Ukrainian].
8. Avtovokzal Kremenchuka vidpravyv ta pryjniav pershykh pasazhyriv: veb-sajt [Kremenchuk bus station sent and received the first passengers: website]. Retrieved from : <https://www.telegraf.in.ua/kremenchug/10086611-avtovokzal-kremenchuka-vidpraviv-ta-prijnyav-pershiih-pasazhiriv.html> (Last accessed: 22.04.2024) [in Ukrainian].
9. Kremenchuk (stantsiia): veb-sajt [Kremenchuk (station): website]. Retrieved from: <http://surl.li/svjqw> (Last accessed: 22.14.2024) [in Ukrainian].
10. Istoriiia zaliznychnoho vokzalu: veb-sajt [History of the Railway Station: Website]. Retrieved from : <https://okrain.net.ua/article/read/istoriya-zheleznodorozhnogo-vokzala.html> (Last accessed: 22.04.2024) [in Ukrainian].
11. Kremenchuts'kyj richkovyj vokzal: veb-sajt [Kremenchuk river station: website]. Retrieved from: <http://surl.li/svjvm> (Last accessed: 22.04.2024) [in Ukrainian].
12. Google karta m. Kremenchuk: veb-sajt [Google map of Kremenchuk: website]. Retrieved from: <https://www.google.com/maps/@49.0635419,33.4207393,16.75z?entry=ttu> (Last accessed: 22.04.2024) [in Ukrainian].
13. Metodychni rekomendatsii z formuvannia sobivartosti perevezen' (robit, posluh) na transporti, zatverdzeni nakazom Ministerstva transportu Ukrainy vid 05.02.2001 r. № 65 [Methodological recommendations for the formation of the cost of transportation (works, services) in transport, approved by the order of the Ministry of Transport of Ukraine dated 05.02.2001. No. 65]. <https://ips.ligazakon.net/document/FIN2565> [in Ukrainian].
14. Moroz, M.M., Khorolskyi, V.L., Moroz, O.V., Herasymchuk, V.V. & Vasylykova, K.V. (2018). Organization and provision of buses operation on the route taking into account the expenditures of participants of the transportation process. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. Vol. 7 (4.3). P. 206-210 [in English].

15. Moroz, M., Korol, S. & Plichko, A. (2016). Improvement of urban transport system. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhajla Ostrohrads'koho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 6 (1), 71-75 [in English].

**Mykola Moroz**, Prof., DSc., **Tetiana Haikova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Iryna Soloshych**, Prof., Doctor of Pedagogical Sciences

*Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine*

### **Optimizing modes of interaction between highway and urban passenger transport in Kremenchuk**

The purpose of the article is to determine the optimal value of the number of vehicles on the route network of Kremenchuk in the interaction of mainline and internal passenger transport by organizing the work of participants in the transport process of moving passengers during the transition from mainline (car, railway, river) to urban (trolley buses, buses, route taxis) transport.

Optimization of the interaction was carried out according to the criterion of reducing the total reduced costs. A generalized criterion for assessing the total costs of participants in the transport process is proposed, which tends to be minimized as a result of the organization of transportation. The passenger capacity of a unit of rolling stock of mainline passenger transport differs from the passenger capacity of a unit of rolling stock of urban passenger transport. Taking into account that urban passenger transport operates in conditions of significant fluctuations in passenger flows, there are periods when the loading of rolling stock exceeds the nominal capacity, that is, the static coefficient of utilization of the passenger capacity of rolling stock is greater than one. The greater the number of vehicles of urban passenger transport, which ensures its interaction with mainline transport, on the route, the shorter the waiting time of passengers, which reduces social costs, but the higher the operating costs of the carrier. The combination of these aspects will allow to balance both the economic effect of the provision of transport services and the social aspect, which has a direct positive effect on the development of the interaction of highway passenger transport with city transport and the city as a whole.

The search for ways to reduce the total costs can improve the level of quality of passenger transportation in the interaction of highway and urban transport. Using transport services as a generalizing criterion allows you to determine a compromise between the interests of the provider of transport services (carrier) and the consumer of services (passenger).

The optimal value of the number of vehicles on the city's route network is directly proportional to the cost of transport service time and inversely proportional to the operating costs of the carrier's enterprise. Also, the increase in passenger turnover, which goes from highway to city passenger transport, and the length of the route, which determines the turnover time, requires an increase in the number of vehicles.

**highway passenger transport, urban passenger transport, optimization, costs of the carrier, social costs of passengers' time**

*Одержано (Received) 30.01.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 628.971.6:004.891:510.644:681.516.42

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.205-217](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.205-217)

**О.М. Сінчук**, проф., д-р техн. наук, **О.Ю. Михайленко**, доц., канд. техн. наук,  
*Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна*  
*e-mail: mykhailenko@knu.edu.ua*

**В.В. Горшков**  
*ВСП «Гірничо-електромеханічний фаховий коледж Криворізького національного університету», м. Кривий Ріг, Україна*

### Нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення населених пунктів

У статті розглядається питання підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів, що забезпечують комфортні умови життєдіяльності для населення міст та населених пунктів, а саме вуличного освітлення. Створена нечітка система керування групою LED-світильників ділянки дороги, що регулює потужність освітлювальних приладів і, відповідно, їх яскравість та керує підключенням до джерела живлення (або до електромережі, або до акумулятора) залежно від рівня освітленості, інтенсивності руху автотранспорту і тарифу на електроенергію. Встановлено, що більш ефективною є керована система з комбінованим живленням. Вона дозволяє знизити споживання електроенергії в типову літню ніч на 75,31% і 74,93%, в зимову – на 80,4% і 77,68% якщо співставляти з традиційним варіантом вуличного освітлення, коли освітлювальна мережа на ніч або відключається повністю, або працює тільки на 50% потужності, відповідно.

**вуличне освітлення, енергоефективність, керування, нечіткий логічний вивод, моделювання**

**Постановка проблеми.** На теперішній час керування вуличним освітленням вулиць здійснюється з використанням достатньо простих алгоритмів. Після початку заходу сонця з настанням сутінок включаються освітлювальні прилади на 50% потужності, з приходом ночі світлоточки починають працювати на повну потужність. Після цього зовнішнє освітлення працює без зміни режиму роботи до 23 години після чого відключається до початку світанку. Разом з тим, це узагальнений режим, який може змінюватися залежно від міста або селища, інтенсивності руху автотранспорту та пішоходів тощо [1].

Наприклад, у м. Києві здійснюється 50% відключення світлоточок між 23.00 і 6.00 [2]. Таке неповне відключення пояснюється високим темпом життя в цьому місті. У полтавській громаді з 23.00 до 00.00 освітлюються вулиці вздовж тролейбусних маршрутів після чого зовнішнє освітлення вимикається до ранку [3]. У м. Кривий Ріг з 23.00 до 05.00 освітлювальна мережа відключається практично повністю, а о 5 годині знову вмикається до початку світанку [4]. Це пояснюється тим, що місто є промисловим і завершення нічної зміни або початок денної на виробництвах починаються дуже рано, тобто працівникам потрібно дістатися на робочого місця або повернутися додому. Звісно, усі вищеописані графіки роботи відповідають мирному часу, під час військового стану вони, як правило, не дотримуються зі зрозумілих причин.

© О.М. Сінчук, О.Ю. Михайленко, В.В. Горшков, 2024

Такий підхід до керування вуличним освітленням можна вважати ручним. Спеціальні засоби, як-то дистанційне керування тощо, при цьому використовуються тільки під час включення/відключення освітлювальних установок, а регулювання енергоспоживання як такого не відбувається.

Автоматизація керування вуличним освітленням може забезпечити адаптування рівня освітленості освітлювальних приладів до змінних умов у яких вони повинні працювати, таких як час доби, погодні особливості та рух пішоходів або автотранспорту. Керування рівнем освітленості знижує споживання електроенергії, що є важливим аспектом сталого розвитку міст та селищ.

Не слід відкидати також і соціальну складову. Автоматизованого керування освітлювальними приладами дозволяє використовувати світлоточки тільки коли в цьому є потреба, тобто навіть в ті години, коли раніше зовнішнє освітлення відключалося повністю, що призводить до підвищення рівня комфортабельності міста та підвищує його привабливість для населення. При чому на рівень споживання електроенергії таке включення не можливо не матиме суттєвого впливу через низьку інтенсивність автомобільного та пішохідного руху у темний час доби, а також можливості створити достатню освітленість при потужності нижче номінальної. Це твердження потребує підтвердження, що є одним із завдань цієї статті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний розвиток систем збору даних [5–7], інформаційних технологій, зокрема, інтернету речей (IoT) [8, 9], засобів дистанційного й автоматизованого керування призвів до створення нових підходів до керування вуличним освітленням, які прийнято називати інтелектуальними (smart). Їх застосування дозволяє суттєво знизити рівень споживання електроенергії обладнанням освітлювальних мереж [10].

Наприклад, масштабний огляд smart-методів керування вуличним освітленням наведений у роботі [11]. Серед них особливо виділяються ті, що використовують методологічний апарат нечіткої логіки [12–18], керування з прогнозуючими моделями [19] або машинного навчання [20, 21] через високу ефективність.

Разом з тим, системи нечіткого логічного виводу отримали найбільше поширення зважаючи на свою простоту. Проте ці системи мають і свої особливості.

У роботі [12] нечітка система керування окремою освітлювальною установкою складається з двох нечітких підсистем. Одна, з них регулює яскравість LED-світильника, залежно від освітленості та світлового шуму. Інша – тривалість включення залежно швидкості автомобіля. У [13] автори приводять практичну реалізацію системи.

Нечітка система керування вуличною світлоточкою також запропонована у [14]. Входами в ній виступають рівень сонячного освітлення і присутність об'єкта в районі дії освітлювальної установки, виходом – рівень яскравості LED-світильника.

У статті [15] авторами розроблена інтелектуальна нечітка система керування вуличними ліхтарями, що базується на інформації з датчиків швидкості транспортних засобів та освітленості, яка дозволяє заздалегідь регулювати кількість ввімкнених ліхтарів перед транспортним засобом, а також рівень освітленості LED-світильників. Система дозволяє динамічно керувати традиційними вуличними ліхтарями відповідно до конкретних умов на дорозі в нічний час.

Відзначимо роботу [16]. У ній запропонована нечітка система динамічного регулювання яскравості штучного вуличного освітлення, враховуючи різні фактори, такі як інтенсивність природнього освітлення, інтенсивність світлового шуму та швидкість руху автотранспорту. Запропонований алгоритм нечіткого керування значно знижує енергоспоживання освітлювального пристрою.

У [17] пропонується ще одна система керування вуличними ліхтарями, заснована на теорії нечіткого керування. Яскравість кожного LED-світильника можна регулювати відповідно до рівня природного освітлення. Авторами встановлено, що метод дозволяє досягнути енергозбереження. Проте зазначимо, система керування не враховує наявність автотранспорту або пішоходів.

Стаття [18] присвячена розробці концепції енергозбереження в системах вуличного освітлення в шляхом керування яскравістю світлодіодних освітлювальних приладів. Пропонована система оснащена датчиками визначення інтенсивності природного освітлення, руху транспортного засобу по дорозі, а також фіксації дощу. Вихідною величиною для системи є яскравість освітлення.

Проведений аналіз літератури вказує на те, що системи керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення, котрі використовують методи нечіткої логіки сфокусовані тільки на рівні освітленості (як основної величини) та інтенсивності руху автотранспорту, проте не враховують тариф на електроенергію при генерації величини керуючої дії за напругою або струмом (залежно від типу LED-драйвера). Також жодна з розглянутих систем не надає рекомендації щодо вибору джерела живлення для освітлювальної установки. Незважаючи, що деякі мають сонячні панелі з акумуляторами.

**Постановка завдання.** Враховуючи, що задача керування зовнішнім освітленням має враховувати складні нечіткі зв'язки між вхідними та вихідними змінними й представляти висновки системи в термінах нечітких значень, то в такому варіанті розбудові системи потрібно застосувати нечіткий логічний вивід Мамдані (НЛВМ). Це дає можливість вираження нечітких правил у вигляді «ЯКЩО – ТО», при чому вихідні лінгвістичні змінні в НЛВМ описуються нечіткими множинами на відміну від нечіткого висновку Такагі-Сугено-Канга або Цукамото, де виходом є, відповідно, лінійні або монотонні функції.

Загальне завдання роботи полягає в створенні системи керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення на базі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані з багатьма входами і виходами, котра, по-перше враховували би поміж інших величину тарифу на електроенергію при генерації керування, а також надавала рекомендацію щодо вибору джерела живлення освітлювальних установок для досягнення зниження рівня споживання електричної енергії обладнанням освітлювальних мереж.

**Викладення основного матеріалу.** Аналізувати роботу нечіткої системи керування будемо на прикладі блоку освітлення дорожнього покриття для проїзду автотранспорту по вулиці Костенко між перехрестями вулиць Костенко – Героїв АТО і Костенко – проспект Університетський у м. Кривий Ріг (рис. 1).

Блок містить 10 освітлювальних установок вздовж вулиці. Така ділянка дороги типова для міст. Вдень рух по ній достатньо жвавий, а вночі – поодинокий. Обабіч цієї дороги вже встановлені консольні LED-світильники з двома СОВ-матрицями сумарною потужністю 100 Вт. Напруга живлення складає 230 В. Струм номінальний освітлювального пристрою 
$$I_{LED} = \frac{P}{U} = \frac{100 \text{ Вт}}{230 \text{ В}} = 0,435 \text{ А}.$$
 Зовнішнє освітлення дороги, а

не пішохідної зони або двору, є більш вагомим ураховуючи більшу потужність і кількість освітлювальних установок на одиницю площі вулично-дорожніх мереж. Зважаючи на аналіз літератури входами системи НЛВМ будуть освітленість і рух автотранспорту до яких додається ще тариф на електроенергію.

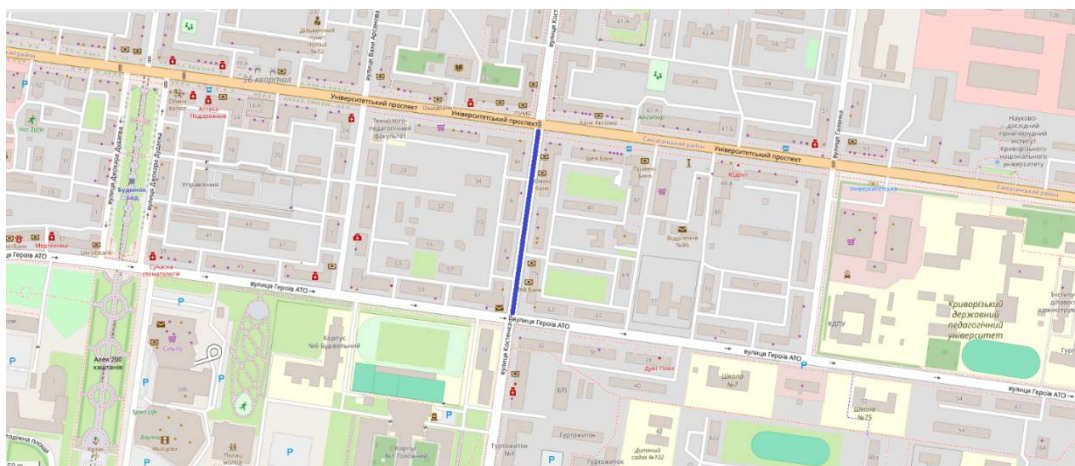


Рисунок 1 – Ділянка дорожнього покриття м. Кривого Рогу, яка освітлюється LED-світильниками  
Джерело: Google Maps

Керування джерелами світла реалізується LED-драйвером, який підтримує постійний струм на світлодіодах і регулює освітленість широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) напруги. Так як драйвер LED-світильника регулює освітленість ШІМ напруги, то першим виходом нечіткої системи керування буде «шпаруватість ШІМ». Ураховуючи, що живлення освітлювальної установки можна здійснювати або від електромережі або від акумуляторів, які зберігають енергію вироблену сонячною панеллю вдень, тому система має визначати, яке джерело живлення раціонально використовувати в даний момент. Тому другим виходом буде «джерело живлення».

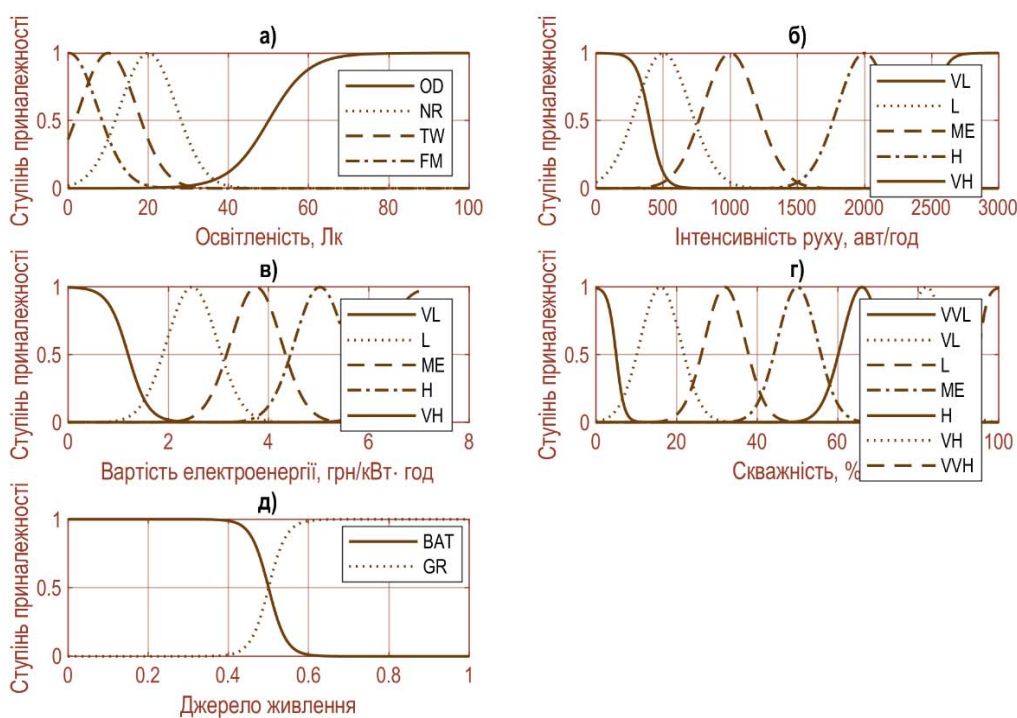
Розробимо систему НЛВМ для керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення.

Фазифікація функцій приналежності до множин лінгвістичної змінної «освітленість» ( $E$ ) провадиться таким чином. Під час розробки нечіткої системи керування вуличним освітленням недоцільно брати до уваги рівні освітленості, котрі відповідають ясному або похмурому дню. Так як у такому варіанті в застосуванні освітлювальних установок немає потреби. Включати вуличне освітлення потрібно з настанням сутінок. У [22] показані значення освітленості для різних часів доби. Сутінкам відповідає значення 10 лк, а дуже похмурому дню – 100 лк. Освітленість при якій потрібно освітлювати дороги повинно бути десь між цими двома значеннями, тому прийнято 50 лк. З іншого боку, освітленість може бути близькою до нуля, проте не може бути від'ємною. Отже обмежимо кінцеву множину  $E$  значеннями  $0 \leq e \leq 100$  лк. Виділимо тут чотири нечіткі множини: «дуже похмурий день», «нормована освітленість», «сутінки», «повний місяць». Середні значення для функцій приналежності до цих множин взяті з [22] і становлять 50, 20, 10, 0,267 лк, відповідно. Нормована освітленість для доріг прийнята за вимогами ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [23]. Графіки функцій приналежності наведені на рис. 2 а.

Використовувати додатково значення освітленості з [22], а саме такі як-то «глибокі сутінки» (1 лк) або «зоряне саяво» ( $2 \cdot 10^{-3}$  лк), недоцільно через практично повне співпадіння середніх значень функцій приналежності, що у розглянутих межах освітленості призводить до їх незначної відмінності та може викликати неоднозначність у встановленні приналежності результатів вимірювання до нечітких множин при нечіткому виводі.

При керуванні освітленням потрібно враховувати наявність транспорту або людей в області дії освітлювальної установки. Достатньо поширеним є підхід, коли проводять індивідуальне керування світильниками, коли фіксується присутність

об'єктів. Разом з тим, при такому підході можлива часта зміна рівня освітленості світлоточками через постійну появу або зникнення об'єктів. У випадку транспортної магістралі це може викликати зоровий дискомфорт, перенапруження водіїв та призвести до аварії. Тому більш доцільним буде використовувати як керуючу дію інтенсивність руху автотранспорту між двома світлофорами або двома перехрестями. Тобто проводити блочне керування освітлювальними установками. При фазифікації лінгвістичної змінної «інтенсивність руху автотранспорту» ( $T$ ) скористаємося вимогами до освітлення вулиць і доріг із регулярним рухом з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [23]. Кінцеву множину  $T$  обмежимо значеннями  $0 \leq t \leq 3000$  авто/годину. Вона буде описана п'ятьма нечіткими множинами: «дуже висока інтенсивність» (VL), «висока інтенсивність» (L), «середня інтенсивність» (ME), «низька інтенсивність» (H), «дуже низька інтенсивність» (VH). Їх середні значення становлять 400, 500, 1000, 2000, 2500 авто/годину. Графіки функцій приналежності наведені рис. 2 б.



а) «освітленість»; б) «інтенсивність руху автотранспорту»; в) «тариф на електричну енергію»; г) «шпаруватість ШІМ-контролера» д) «джерело живлення»

Рисунок 2 – Функції приналежності до множин змінних:

Джерело: розроблено авторами

Для фазифікації лінгвістичної змінної «тариф на електричну енергію» проаналізуємо сучасний стан питання розрахунків між електропостачальними компаніями та споживачами. На сьогодні діє система погодинної зміни тарифу на електричну енергію. Підприємство попередньо за добу робить замовлення на обсяг потужностей, які протягом наступного дня будуть споживатися. Це відрізняється від того, як розрахунки проводились раніше. Тоді тарифи хоча і були диференційованими за періодами доби, але практично не змінювалися день від дня. Тільки в моменти їх перегляду. Розглянувши дані про тарифи на електричну енергію виділяються різні рівні, як-то коли він дуже високий, високий, середній, низький або дуже низький. Тому лінгвістичну змінну «тариф на електричну енергію» опишемо п'ятьма аналогічними

нечіткими множинами з середніми значеннями 1,2, 2,475, 3,75, 5,025 і 6,3 грн/кВт·год. Сама її кінцева множина вона буде обмежена значеннями  $0 \leq p \leq 7$  грн/кВт·год. Графіки функцій приналежності наведені рис. 2 в.

Шпаруватість ШІМ може змінюватися від 0 до 100 %, тобто від значення, котрі відповідають з одного боку відсутності напруги, з іншого максимально можливого рівню напруги, тому кінцеву множину **D** для такої вихідної лінгвістичної змінної обмежимо так:  $0 \leq d \leq 100$  %. Для більш точного регулювання освітленості лінгвістична змінна «шпаруватість ШІМ-контролера» під час фазифікації буде описана сімома нечіткими множинами: «дуже-дуже низька» (VVL), «дуже низька» (VL), «низька» (L), «середня» (ME), «висока» (H), «дуже висока» (VH), «дуже-дуже висока» (VVH). Графіки функцій приналежності наведені рис. 2 г. Усі вони є функціями гладкими. Середні значення для них становлять 5, 16, 32, 50, 66, 82 і 95 %, відповідно.

Лінгвістична змінна «джерело живлення» містить тільки дві нечіткі множини – «електрична мережа» і «акумулятор». У принципі, для цей вихід системи описується чіткою логікою – або жити від акумуляторної батареї, або ні. Проте для того, щоб не гібридувати систему нечіткого виводу також її фазифікуємо. Кінцеву множину **S** обмежимо значеннями  $0 \leq s \leq 1$ . Параметри функції підібрані таким чином (див. рис. 2 д), щоб гладкі функції приналежності були максимально подібні до чіткого логічного представлення. Значення 0,5 є своєрідним пороговим значенням в такому випадку. Якщо НЛВМ встановлює на виході число, що вище або дорівнює 0,5, то живлення здійснюється від електромережі міста, якщо менше – то від акумулятора.

Розглянемо принципи створення бази правил нечіткої системи керування вуличним освітленням.

При прийнятті рішення про джерело живлення береться до уваги висновок нечіткої системи керування вуличного освітлення, проте підключення акумуляторної батареї здійснюється за умови наявності достатнього рівня заряду. Тобто нечітка логіка поєднується з класичною. Якщо рівень освітленості й інтенсивність руху низькі, то потужність освітлювального пристрою залишаємо низькою.

Нечіткий висновок про вибір джерела живлення проводиться на основі оцінки тарифу на електроенергію, коли вона середня, висока і дуже висока, то дається рекомендація на підключення акумулятора, коли низька і дуже низька – на живлення від електромережі міста.

Завжди при високій освітленості дорожнього покриття, котра відповідає дуже похмурому дню, тобто від 50 лк і більше, шпаруватість ШІМ дуже дуже низька. Тариф на електроенергію та інтенсивність руху автотранспорту тут до уваги не беруться, тому що згідно норм [23] освітленість має бути 20 лк або нижче. Також враховуючи низький рівень енергоспоживання освітлювальним приладом у цьому випадку живлення може здійснюватися від акумулятора і тільки коли вартість електроенергії дуже низька можна переключитися на мережу.

При низькому рівні освітленості «повний місяць» і трафіку вище середнього, якщо є можливість жити освітлювальний пристрій від акумуляторної батареї то це потрібно робити, так як у цьому випадку буде найвище енергоспоживання і тому жити від електромережі недоцільно через високі витрати на покупку електроенергії.

Від мережі живлення відбувається коли середня вартість електроенергії. Якщо вартість електроенергії або електроспоживання високі тоді доцільно вводити в дію акумулятори.

Вихідні поверхні для НЛВМ наведені на рис. 3.

Для оцінки енергоефективності нечіткого керування вуличним освітленням потрібно змоделювати роботу створеної системи. Здійснено генерування тестових сигналів, які будуть відповідати фактичним умовам роботи.

Вхідний тестовий сигнал за освітленістю складається з трьох частин. Перша і третя частини відповідають природнім сутінкам, котрі наступають під час заходу або сходу сонця. Ці дві ділянки мають експоненціальні форми.

Вночі освітленість дорівнює 20 лк, що відповідає нормованому значенню штучного зовнішнього освітлення для дорожніх покриттів. Зміна освітленості покриття, наприклад, від світла фар автомобілів, імітується додаванням випадкової величини, як описано нижче.

Для генерації основної форми сигналу в літню та зимову пори року взяті дані по схід і захід сонця за періоди 14.01.2024 – 15.01.2024 і 14.07.2024 – 15.07.2024. 15.01.2024 сутінки починаються о 16.55 і тривають до настання ночі о 17.34, тобто 39 хвилин. Сама ніч триває до 06.19, тобто 765 хвилину. Потім починається світанок, який триває 38 хвилин до повного сходу сонця о 06.57. 15.07.2024 сутінки починаються о 21.21 і тривають до настання ночі о 22.14, тобто 52 хвилини. Сама ніч триває до 03.32, тобто 318 хвилину. Потім починається світанок, який триває 53 хвилини до повного сходу сонця о 04.25. До основного сигналу додається випадкова величина зі стандартним відхиленням 20 лк, яка змінює значення на кожному системному дискретному відліку. Мінімальне значення сумарного сигналу обмежується 0 лк, так як освітленість негативною бути не може. Приклад тестового сигналу для зимового часу наведений на рис. 4 а.

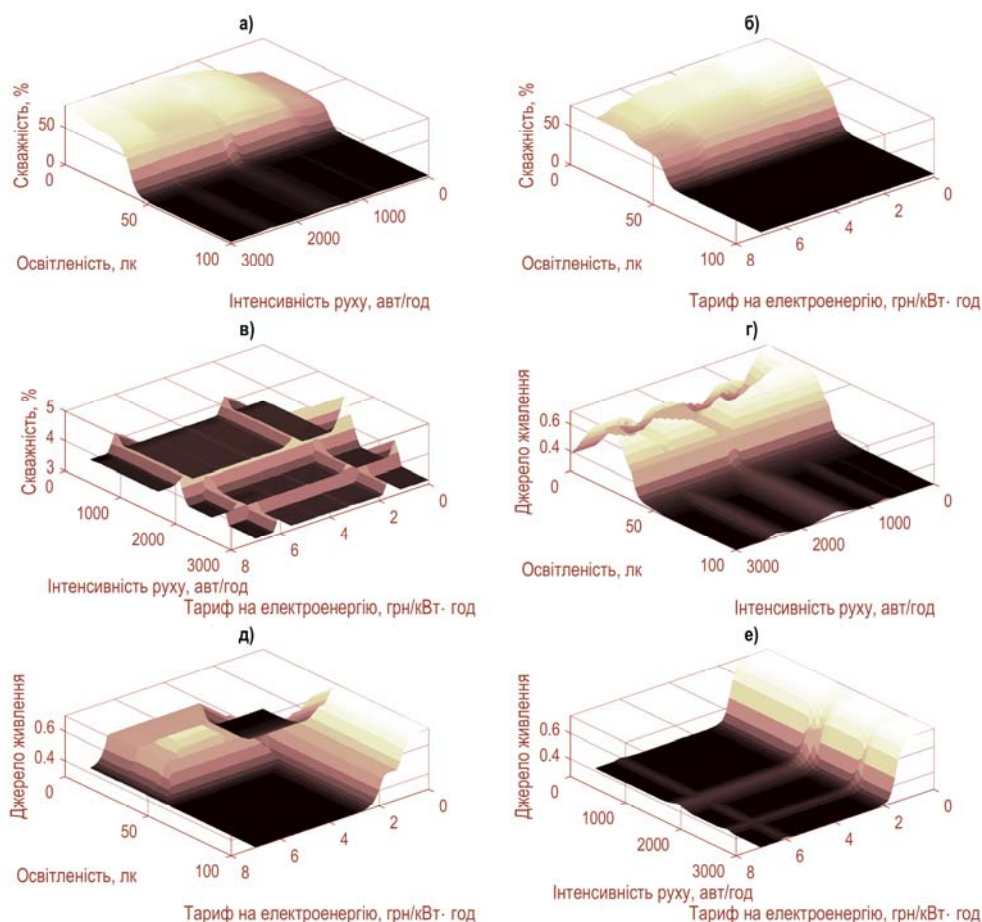


Рисунок 3 – Вихідні поверхні НЛВМ

Джерело: розроблено авторами

Як показують дослідження [24–26] у нічний період доби дорожній трафік являє собою опуклу функцію. Приблизно о 19-20 годині кількість автотранспорту на дорогах починає знижуватись і досягає мінімуму десь в середині ночі, а потім збільшується до 6-8 години. Це пов'язано з необхідністю ввечері та зранку добиратися з роботи додому і навпаки, а також відсутністю робочих переїздів у нічний час. Така залежність спостерігається для доріг у різних містах і країнах. При цьому графіки інтенсивності руху автотранспорту не демонструють сезонного характеру. І це очікувано, так як дорожній рух прямо корелює з робочими годинами [25], а вони завжди постійні не дивлячись на зиму або літо. Інтенсивність трафіку буде мати більший вплив на роботу системи у тих сезонах, коли тривалість ночі більша, тому що в цьому випадку буде охоплювати як періоди з високою так і низькою інтенсивністю руху. У інший час, особливо влітку, освітлення буде більше працювати в час з низькою інтенсивністю руху. Для моделювання вхідного сигналу за автотрафіком використовуємо параболічну залежність [27] до якої додаємо випадкові величини. Приклад тестового сигналу для зимового часу наведений на рис. 4 б.

Вхідний тестовий сигнал за тарифом на електричну енергію генеруємо беручи за основу ринкові дані до яких додаємо випадкову величину розподілену за нормальним законом зі стандартним відхиленням 0,5 грн/кВт·год. Для аналізу роботи зовнішнього освітлення в зимовий період взято дані про тарифи з 17:00 14.02.2024 по 08:00 15.02.2024, в літній період – з 21:00 17.04.2024 по 08:00 18.04.2024. У останньому варіанті взята інформація за квітень 2024, так як брати за 2023 вже не дуже актуально, а реальні тарифи для дати 15.07.2024 на момент виконання дослідження ще не відома. Приклад тестового сигналу для зимового часу наведений на рис. 4 в.

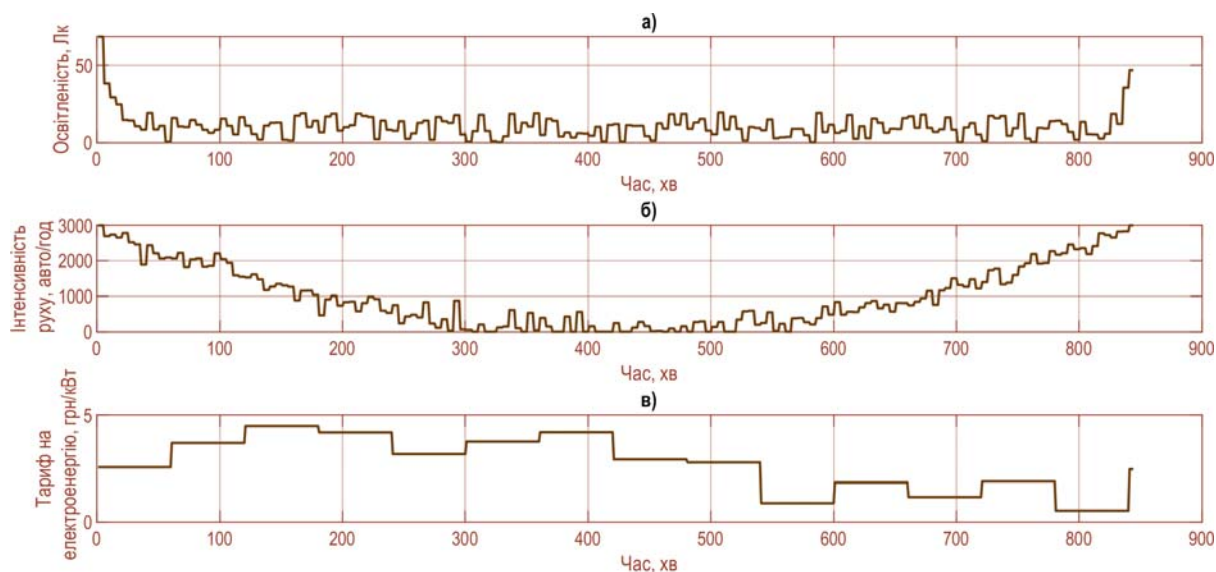


Рисунок 4 – Тестові сигнали для моделювання роботи нечіткої системи керування вуличним освітленням

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо результати моделювання роботи системи.

У зимовий час споживання електроенергії в системі без керування обчислюється за графіком роботи вуличного освітлення в місті Кривий Ріг. Тобто з урахуванням того, що з моменту заходу сонця і до 23.00 та після 05.00 і до повного світанку освітлення працює на повну потужність, а між 23.00 і 05.00 освітлювальні установки або споживають 50% від загальної потужності, або освітлювальна мережа не працює. Для

літнього часу прийнято, що зважаючи на те, що початкова стадія сутінок починається вже о 02.19 (дані за 15.07.2024) і повністю світає вже о 04.25, час відключення зовнішнього освітлення становить 3 години: з 23.00 по 02.00, так як до 05.00 потреби в зовнішньому освітленні вже немає. Аналізуємо два випадки роботи освітлення без керування у нічний час: освітлювальні установки споживають 50% від загальної потужності; освітлювальна мережа не працює.

Обчислення електроспоживання при залученні нечіткої системи керування провадилося для декількох варіантів налаштування дискретного кроку (5 і 10 хвилин) між вимірюваннями освітленості та інтенсивністю руху автомобільного транспорту і джерел живлення освітлювальних установок (тільки від електромережі та від електромережі або акумулятора). Прийнято, що акумулятор має достатній заряд для живлення освітлювальної установки протягом того часу, коли нечітка система рекомендує отримувати енергію від неї. У реальному випадку це, звісно, не так, але для оцінки енергоефективності цього достатньо.

Проаналізуємо результати моделювання роботи нечіткої системи керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення для літньої та зимової ночі і десятих LED-світильників, наведені у табл. 1. Графіки роботи системи НЛВМ взимку показані на рис. 5.

Таблиця 1 – Результати моделювання роботи систем керування вуличним освітленням

Крок, хв	Конфігурація системи	Споживання електроенергії, Вт·год	
		Взимку	Влітку
-	Без керування / 50% потужності	11033.3	5533.33
-	Без керування / Відключено	8033.33	4033.33
10	Нечітка система керування з живленням від електромережі	7959.55	2613.57
5	Нечітка система керування з живленням від електромережі	7936.19	2571.66
10	Нечітка система керування з живленням від електромережі /акумулятора	2162.34	1365.95
5	Нечітка система керування з живленням від електромережі /акумулятора	2462.89	1387.04

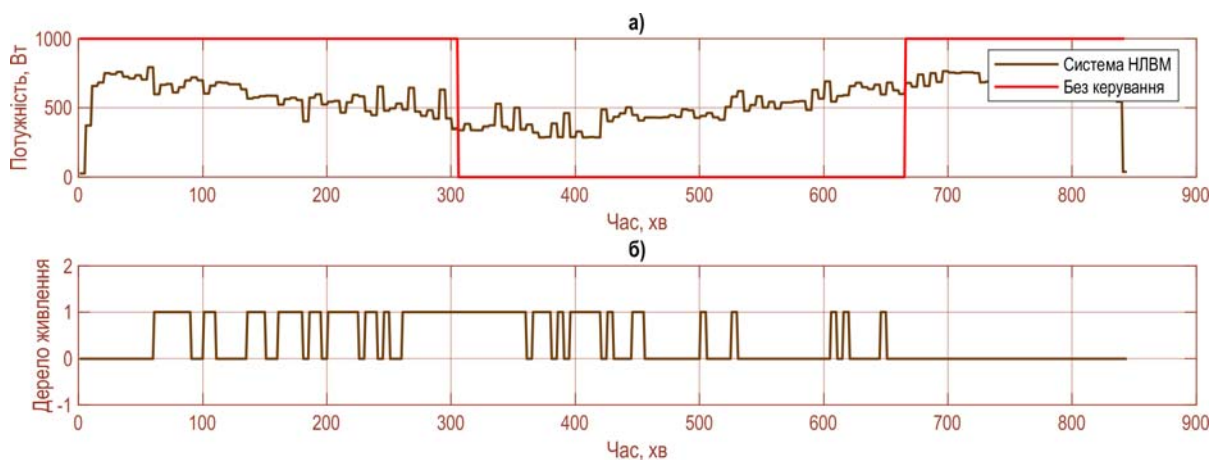


Рисунок 5 – Моделювання системи НЛВМ керування 10 LED-світильниками вуличного освітлення

Джерело: розроблено авторами

Як і очікувалося електропостачання освітлювальних установок від двох джерел живлення зменшує споживання електричної енергії більш значно. Так, у зимову ніч при живленні тільки від електромережі споживання скорочується на 0.92% і 1.21%, для дискретних кроків 10 і 5 хвилин, якщо співставляти з системою без керування коли освітлювальна мережа відключається на 6 годин, якщо ж вночі протягом 6 годин споживається тільки 50% потужності освітлювальним установками, то ці відсотки дорівнюють 27.85% і 28.07%. Якщо дивитися на живлення від електромережі або акумулятора, то має місце скорочення на 73.08% і 69.34% та на 80.4% і 77.68%, відповідно. Для літньої ночі ситуація така сама. Живлення керованої системи тільки від електромережі дає скорочення споживання на 35.2% і 36.24%, якщо співставляти з системою без керування і відключенням освітлювальної мережі на 3 години, якщо співставляти з 50% споживанням потужності, то на 52.77% і 53.52%. Якщо дивитися на живлення від електромережі або акумулятора, то має місце скорочення на 66.13% і 65.61% та на 75.31% і 74.93%, відповідно.

Звернемо увагу на те, що скорочення споживання електроенергії в зимову ніч, в системі з нечітким керування і живленням тільки від електромережі не дуже велике, якщо співставляти з системою без керування і повним відключенням вуличного освітлення, тобто тільки 0.92% або 1.21% залежно від дискретного кроку. Це зумовлюється більшим часом нульового енергоспоживання освітлювальними приладами взимку ніж влітку. Проте економія невелика, але вона є, і тому сама система може використовуватися.

Дискретний крок практично не має впливу, у більшій частині змодельованих варіантів роботи нечіткої системи, на споживання електроенергії. Так, наприклад, при живленні тільки від електромережі різниця становить лише 0.29% для освітлення в зимову ніч та 1.04% в літню. При живленні від акумулятора або електромережі для літньої ночі різниця для різних дискретних кроків становила 0.52%. Тільки, коли було розглянуто живлення від акумулятора або електромережі для зимової ночі, різниця між налаштуваннями дискретного кроку 5 і 10 хвилин була значнішою – 3.72%. Це дані якщо порівнювати розглянуті системи з системою без керування і нульовим споживанням освітлювальною мережею протягом 6 годин ночі. Для системи без керування з 50% споживанням вночі відсотки не дуже різняться. Така ситуація виникає, тому що за такі кроки освітленість та інтенсивність руху автотранспорту дуже кардинально не міняється.

**Висновок.** Можна констатувати, що нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення є енергоефективною. Також рекомендується спеціалізованим підприємствам населених пунктів, у сфері відповідальності яких знаходиться освітлювальна мережа, більше уваги приділяти не тільки заміні джерел світла на нові більш енергоефективні, а й впровадженню альтернативних джерел живлення освітлювальних установок, котрі дозволяють заряджати акумулятори в світлий час, як-то, наприклад, сонячних панелей. Це, разом з залученням розглянутої нечіткої системи керування, дасть можливість ще більше зекономити на витратах на електроенергію, що дуже актуально в сучасних умовах.

## Список літератури

1. Салтиков В.О. Освітлення міст: навч. посібник. Харків: ХНАМГ, 2009. 221 с.
2. Зовнішнє освітлення. *Офіційний портал Києва* : веб-сайт. URL: [https://kyivcity.gov.ua/navkolysnshnie\\_seredovyshche\\_mista/vulychne\\_osvitlennia/zovnishnie\\_osvitlennia/](https://kyivcity.gov.ua/navkolysnshnie_seredovyshche_mista/vulychne_osvitlennia/zovnishnie_osvitlennia/) (дата звернення: 10.03.2024).

3. У Полтавській громаді змінили графік зовнішнього освітлення. *Суспільне Полтава* : веб-сайт. URL: <https://suspilne.media/poltava/540495-v-poltavskij-gromadi-zminili-grafik-zovnisnogo-osvitlenna/> (дата звернення: 10.03.2024).
4. З 1 жовтня у Кривому Розі змінять графік зовнішнього освітлення вулиць. *Рудана* : веб-сайт. URL: <https://rudana.com.ua/news/z-1-zhovtnya-u-kryvomu-rozi-zminyay-grafik-zovnishnogo-osvitlennya-vulyc> (дата звернення: 10.03.2024).
5. Alhamwi A., Unaichi C., Medjroubi W. Modeling Urban Street Lighting Infrastructure Using Open Source Data Sets. ETG Congress 2021. 2021. P. 1–6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9469640>
6. Kumar S., Dshpande A., Ho S. S., Ku J. S., Sarma S. E. Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, No 12. P. 4981–4994. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2552249>
7. Liu Y. Research on the Innovation of Urban Street Visualization Light Monitoring System based on GIS Technology. 2017 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer (MACMC 2017). 2018. P. 19–22. <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.5>
8. Omar A., AlMaeni S., Attia H., Takruri M., Altunajji A., Sanduleanu M., Shubair R., Ashhab M. S., Al Ali M., Al Hebsi G. Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT. *Journal of Sensors*. 2022. e5249187. <https://doi.org/10.1155/2022/5249187>
9. Kabir M. H., Al Noman A., Al Afiq A., Raju R. H., Hasan M. N., Ahmad. Design and Implement IoT-Based Intelligent Manageable Smart Street Lighting Systems for Future Smart City. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 56, No 1. Article 1. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15535>
10. Balázs L., Braun F., Lengyel J. Energy Saving Potential of Traffic-Regulated Street Lighting. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No 8. Article 8. <https://doi.org/10.3390/su15086750>
11. Agramelal F., Sadik M., Moubarak Y., Abouzahir S. Smart Street Light Control: A Review on Methods, Innovations, and Extended Applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No 21. Article 21. <https://doi.org/10.3390/en16217415>
12. Yan P., Wang J. Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Technology. *Academic Journal of Computing & Information Science*. 2022. Vol. 5, No 4. P. 35–40. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050406>
13. Wang J., Yan P. Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Algorithm. *Academic Journal of Computing & Information Science*. 2022. Vol. 5, No 7. P. 27–32. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050705>
14. Satam I. A. Fuzzy-based smart system for controlling road lights. *Vojnotehnički Glasnik*. 2022. Vol. 70, No 2. P. 297–313. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-36670>
15. Zeng J., Ni W., Zhang R., Shi L., Guo C., Chen Y. Intelligent Street Lamp Control System with Dynamic Light Control Function. 2018 17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES). 2018. P. 181–183. <https://doi.org/10.1109/DCABES.2018.00054>
16. Wu H., Li C., Duan G. Research on a fuzzy algorithm for intelligent power-saving control of urban street lamps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*. 2024. Vol. 177, No 1. P. 3–14. <https://doi.org/10.1680/jsmic.23.00010>
17. Ai M., Wang P., Ma W. Research and application of smart streetlamp based on fuzzy control method. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 183. P. 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.069>
18. Shadli A. A. A., Hanafi D. Development of An Intelligence Street Light Using Fuzzy Logic in Control System. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 1, No 1. Article 1.
19. Shaheen H. I., Gapit M., Martinović A., Lešić V. Street Lighting Optimal Dimming with Model Predictive Control. 2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC). 2023. P. 8864–8869. <https://doi.org/10.1109/CDC49753.2023.10383919>
20. Kolasa M. The concept of intelligent system for street lighting control using artificial neural networks. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016. Vol. 1, No 7. P. 34–39. <https://doi.org/10.15199/48.2016.07.05>
21. Moretti F., Pizzuti S., Annunziato M., Panzieri S. Advanced Street Lighting Control through Neural Network Ensembling. SMART 2013, The Second International Conference on Smart Systems, Devices and Technologies. 2013. 76–81.
22. Radiometry and photometry in astronomy. URL: <https://www.stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html> (дата звернення: 10.04.2024).
23. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00078> (дата звернення: 10.03.2024).
24. He H., Wang J., Wei H., Ye C., Ding Y. Fractal behavior of traffic volume on urban expressway through adaptive fractal analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2016. Vol. 443. P. 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.10.004>

25. Venkatanarayana R., Smith B. L., Demetsky M. J. Quantum-Frequency Algorithm for Automated Identification of Traffic Patterns. *Transportation Research Record*. 2007. Vol. 2024, No 1. P. 8–17. <https://doi.org/10.3141/2024-02>
26. Järv O., Ahas R., Saluveer E., Derudder B., Witlox F. Mobile Phones in a Traffic Flow: A Geographical Perspective to Evening Rush Hour Traffic Analysis Using Call Detail Records. *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7, No 11. e49171. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049171>
27. Zambrano-Martinez J. L., Calafate C. T., Soler D., Cano J.-C., Manzoni P. Modeling and Characterization of Traffic Flows in Urban Environments. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No 7. Article 7. <https://doi.org/10.3390/s18072020>

## References

1. Saltykov, V.O. (2009). *Osvitlennia mist: navch. posibnyk*. [Lighting of cities: a textbook]. Kharkiv: KhNAMH [in Ukrainian].
2. Zovnishnie osvittennia. Ofitsijnyj portal Kyieva : veb-sajt. [Outdoor lighting. Official portal of Kyiv: website]. Retrieved from: [https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie\\_seredovyshe\\_mista/vulychne\\_osvittennia/zovnishnie\\_osvittennia/](https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie_seredovyshe_mista/vulychne_osvittennia/zovnishnie_osvittennia/) [in Ukrainian].
3. U Poltavsk'ij hromadi zminyly hrafik zovnishn'oho osvittennia: veb-sajt. [Outdoor lighting schedule changed in Poltava community]. (2024, April 10). *Suspil'ne Poltava*. Retrieved from: <https://suspilne.media/poltava/540495-v-poltavskij-gromadi-zminili-grafik-zovnisnogo-osvittenna/> [in Ukrainian].
4. Z 1 zhovtnia u Kryvomu Rozi zminiat' hrafik zovnishn'oho osvittennia vulyts'. Rudana : veb-sajt. [Starting October 1, Kryvyi Rih will change its street lighting schedule] (2024, April 10). Rudana. Retrieved from: <https://rudana.com.ua/news/z-1-zhovtnya-u-kryvomu-rozi-zminyvat-grafik-zovnishnogo-osvittennya-vulyc> [in Ukrainian].
5. Alhamwi, A., Unaichi, C., & Medjroubi, W. (2021). Modeling Urban Street Lighting Infrastructure Using Open Source Data Sets. *ETG Congress 2021*, 1–6. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9469640> [in English].
6. Kumar, S., Deshpande, A., Ho, S. S., Ku, J. S., & Sarma, S. E. (2016). Urban Street Lighting Infrastructure Monitoring Using a Mobile Sensor Platform. *IEEE Sensors Journal*, 16(12), 4981–4994. Retrieved from: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2552249> [in English].
7. Liu, Y. (2018). Research on the Innovation of Urban Street Visualization Light Monitoring System based on GIS Technology. *2017 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer (MACMC 2017)*, 19–22. <https://doi.org/10.2991/macmc-17.2018.5> [in English].
8. Omar, A., AlMaeni, S., Attia, H., Takruri, M., Altunajji, A., Sanduleanu, M., Shubair, R., Ashhab, M. S., Al Ali, M., & Al Hebsi, G. (2022). Smart City: Recent Advances in Intelligent Street Lighting Systems Based on IoT. *Journal of Sensors*, 2022, e5249187. <https://doi.org/10.1155/2022/5249187> [in English].
9. Kabir, M. H., Al Noman, A., Al Afiq, A., Raju, R. H., Hasan, M. N., & Ahmad. (2023). Design and Implement IoT-Based Intelligent Manageable Smart Street Lighting Systems for Future Smart City. *Engineering Proceedings*, 56(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15535> [in English].
10. Balázs, L., Braun, F., & Lengyel, J. (2023). Energy Saving Potential of Traffic-Regulated Street Lighting. *Sustainability*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su15086750> [in English].
11. Agramelal, F., Sadik, M., Moubarak, Y., & Abouzahir, S. (2023). Smart Street Light Control: A Review on Methods, Innovations, and Extended Applications. *Energies*, 16(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/en16217415> [in English].
12. Yan, P., & Wang, J. (2022). Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Technology. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 5(4), 35–40. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050406> [in English].
13. Wang, J., & Yan, P. (2022). Intelligent Street Light Control System Based on Fuzzy Control Algorithm. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 5(7), 27–32. <https://doi.org/10.25236/AJCIS.2022.050705> [in English].
14. Satam, I. A. (2022). Fuzzy-based smart system for controlling road lights. *Vojnotehnički Glasnik*, 70(2), 297–313. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-36670> [in English].
15. Zeng, J., Ni, W., Zhang, R., Shi, L., Guo, C., & Chen, Y. (2018). Intelligent Street Lamp Control System with Dynamic Light Control Function. *2018 17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*, 181–183. <https://doi.org/10.1109/DCABES.2018.00054> [in English].

16. Wu, H., Li, C., & Duan, G. (2024). Research on a fuzzy algorithm for intelligent power-saving control of urban street lamps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 177(1), 3–14. <https://doi.org/10.1680/jsmic.23.00010> [in English].
17. Ai, M., Wang, P., & Ma, W. (2021). Research and application of smart streetlamp based on fuzzy control method. *Procedia Computer Science*, 183, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.069> [in English].
18. Shadli, A. A. A., & Hanafi, D. (2020). Development of An Intelligence Street Light Using Fuzzy Logic in Control System. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 1(1), Article 1 [in English].
19. Shaheen, H. I., Gapit, M., Martinović, A., & Lešić, V. (2023). Street Lighting Optimal Dimming with Model Predictive Control. *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 8864–8869. <https://doi.org/10.1109/CDC49753.2023.10383919>
20. Kolasa, M. (2016). The concept of intelligent system for street lighting control using artificial neural networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1(7), 34–39. <https://doi.org/10.15199/48.2016.07.05>
21. Moretti, F., Pizzuti, S., Annunziato, M., & Panzieri, S. (2013). Advanced Street Lighting Control through Neural Network Ensembling. *SMART 2013, The Second International Conference on Smart Systems, Devices and Technologies*, 76–81.
22. Radiometry and photometry in astronomy. *stjarnhimlen.se*. Retrieved from: <https://www.stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html> (Last accessed: 10.04.2024).
23. DBN V.2.5-28:2018 Pryrodne i shtuchne osvittlennia [DBN V.2.5-28:2018 Natural and artificial lighting]. Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00078> [in Ukrainian].
24. He, H., Wang, J., Wei, H., Ye, C., & Ding, Y. (2016). Fractal behavior of traffic volume on urban expressway through adaptive fractal analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 443, 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.10.004> [in English].
25. Venkatanarayana, R., Smith, B. L., & Demetsky, M. J. (2007). Quantum-Frequency Algorithm for Automated Identification of Traffic Patterns. *Transportation Research Record*, 2024(1), 8–17. <https://doi.org/10.3141/2024-02> [in English].
26. Järv, O., Ahas, R., Saluveer, E., Derudder, B., & Witlox, F. (2012). Mobile Phones in a Traffic Flow: A Geographical Perspective to Evening Rush Hour Traffic Analysis Using Call Detail Records. *PLOS ONE*, 7(11), e49171. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049171> [in English].
27. Zambrano-Martinez, J. L., Calafate, C. T., Soler, D., Cano, J.-C., & Manzoni, P. (2018). Modeling and Characterization of Traffic Flows in Urban Environments. *Sensors*, 18(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/s18072020> [in English].

**Oleh Sinchuk**, DSc (tech.), Professor, **Oleksii Mykhailenko**, PhD, Associate Professor,  
*Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

**Viktor Horshkov**

*Mining and Electromechanical College of Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine*

### **Fuzzy control system for the electrical complex of street lighting in settlements**

The article deals with the issue of improving the energy efficiency of electrical systems that provide comfortable living conditions for the population of cities and towns, namely street lighting.

A fuzzy control system for a group of LED luminaires of a road section is created that regulates the power of the lighting devices and, accordingly, their brightness and controls the connection to a power source (either to the grid or to a battery) depending on the level of illumination, traffic intensity and electricity tariff. It was found that a controlled system with combined power supply is more efficient. It reduces electricity consumption on a typical summer night by 75.31% and 74.93%, and on a winter night by 80.4% and 77.68% compared to the traditional street lighting option, when the lighting network is either completely shut down at night or operates at only 50% of capacity, respectively.

It can be stated that the fuzzy control system for the electrical complex of street lighting is energy efficient. It is also recommended that specialized enterprises in settlements responsible for the lighting network pay more attention not only to replacing light sources with new, more energy-efficient ones, but also to introducing alternative power sources for lighting installations that allow charging batteries during daylight hours, such as solar panels. This, along with the use of the fuzzy control system under consideration, will make it possible to save even more on electricity costs, which is very important in today's environment.

**street lighting, energy efficiency, control, fuzzy inference, modeling**

*Одержано (Received) 18.03.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024*

## ЗМІСТ

**Комп'ютерні науки**

<i>Ю.М. Пархоменко, О.В. Медведєва, Д.В. Богатирьов, В.В. Босько, О. А. Кислун</i> Використання інформаційних технологій в екології та процесах охорони навколишнього середовища.....	3
---	---

**Кібербезпека**

<i>О.С. Улічев, К.О. Задорожний</i> Стандартизація еліптичних кривих: аналіз та впровадження в криптографічні протоколи .....	14
---	----

**Матеріалознавство**

<i>В.М. Кропівний, М.В. Босий, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост</i> Термодинамічні закономірності структуроутворення високоміцного чавуну при модифікуванні та різних умовах кристалізації розплаву.....	27
--	----

**Галузеве машинобудування**

<i>Ю.А. Невдаха, В.В. Пукалов, В.В. Пирогов, Н.А. Невдаха, М.О. Васильковський</i> Визначення запасу міцності деталей при нестандартній зміні напружень.....	37
---	----

**Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології**

<i>О.Ф. Баранюк, В.М. Каліч</i> Розробка цифрового інтерфейсу для керування імпульсним блоком живлення.....	43
--	----

<i>Sergey Osadchy, Larisa Vikhrova, Victor Kalich, Mariia Miroshnichenko</i> Combined system of automatic flow stabilization bread mass at the entry of the thresher of the grain harvester.....	55
--	----

**Будівництво та цивільна інженерія**

<i>В.А. Пащинський, В.А. Настоящий, М.В. Пащинський, Д.В. Богатирьов</i> Вплив підвищення нормативних вимог на рівень теплової надійності та втрати тепла через стіни й покриття житлових і громадських будівель.....	64
---	----

<i>Г. Д. Портнов, А.А. Тихий, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов, О.В. Кузик, Л.В. Гасенко</i> Створення бази комплементарних гнотозварних профілів решітчастих металоконструкцій.....	74
---	----

**Агроінженерія**

<i>В.В. Онопа, Д.Ю. Артеменко, О.А. Кислун, В.А. Онопа</i> Математична модель верхнього робочого елемента механічно-пневматичного збирача комах-шкідників пасльонових культур.....	83
--	----

<i>Elchyn Aliiev, Oleksandr Kobets, Mykola Linko</i> Physico-mathematical model of the process of compression of compound feed components into expanders.....	94
---	----

<i>Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий, В.В. Кравченко, А.О. Ковальчук</i> Лазерне зміцнення інструментів та деталей обладнання ремонтних майстерень автомобільного транспорту в АПК.....	104
--	-----

<i>Т.В. Руденко, В.В. Амосов, Ю.В. Кулешков, І.Т. Руденко</i> Електросапа – культиватор «Мрія».....	110
--	-----

### **Автомобільний транспорт**

<i>Л.А. Тарандушка, В.В. Халявка, Я.С. Коломієць</i> Оптимізація процесу виконання експертного дослідження транспортних засобів на основі моніторингу основних показників.....	118
---	-----

<i>О.В. Іванкова, О.А. Бурлака</i> Дослідження відновлення корпусних деталей автомобільних двигунів методом електродугової металізації.....	127
--	-----

<i>Л.А. Тарандушка, І.П. Тарандушка</i> Розробка методики забезпечення якісного лакофарбового покриття під час виконання малярно-кузовних робіт в системах автосервісу.....	135
--	-----

<i>М.В. Красота, Ю.В. Кулешков, І.В. Шепеленко, Р.А. Осін, Т.В. Руденко</i> Дослідження шляхів підвищення оперативності виконання діагностичних операцій електронних систем автотракторної техніки.....	144
--	-----

<i>В.В. Аулін, О.В. Кузик, С.В. Лисенко, А.Б. Гупка, А.В. Гриньків, І.В. Жилова</i> Методика розрахунку основних характеристик підшипників ковзання систем і агрегатів автомобілів та аналізу їх трибологічної ефективності.....	151
---	-----

### **Транспортні технології (за видами)**

<i>В. А. Войтов, Н.Г. Бережна, І.І. Сисенко, А.В. Войтов, Л.Ф. Кривенко, А.С. Козенок</i> Прогнозування завантаженості вулиць великих міст з урахуванням коливань щільності та швидкості руху транспортних потоків.....	165
--	-----

<i>В.М. Никончук, І.О. Хітров, С.М. Пашкевич</i> Впровадження концепції перехоплюючих паркінгів в міське середовище.....	178
---	-----

<i>О.С. Хачатурян, О.В. Щербак</i> Методологія досліджень логістичних процесів у регіоні.....	187
--	-----

<i>М. М. Мороз, Т. В. Гайкова, І. О. Солошич</i> Оптимізація режимів взаємодії магістрального та міського пасажирського транспорту м. Кременчук.....	197
---	-----

### **Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

<i>О.М. Сінчук, О.Ю. Михайленко, В.В. Горшков</i> Нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення населених пунктів.....	205
--	-----

## CONTENT

### Computer Science

- Yuriy Parhomenko, Olga Medvedeva, Viktor Bosko, Dmitriy Bogatyryov, Oleh Kyslun*  
Using of information technologies in ecology and processes  
of environmental protection.....3

### Cybersecurity

- Oleksandr Ulichev, Kostyantyn Zadorozhny*  
Standardization of elliptic curves: analysis and implementation  
in cryptographic protocols.....14

### Material science

- Volodymyr Kropivnyi, Mykola Bosyi, Olexandr Kuzyk, Alena Kropivna,  
Ludmyla Molokost*  
Thermodynamic patterns of structure formation of high-strength cast iron during  
modification and under different conditions of melt crystallization ..... 27

### Industry Engineering

- Yurii Nevdakha, Viktor Pukalov, Volodymyr Pirogov, Natalia Nevdakha,  
Mykhailo Vasylykovskyi*  
Determination of the safety margin of parts with non-standard stress changes.....37

### Automation and computer-integrated technologies

- Oleksandr Baraniuk, Viktor Kalich*  
Development of a Digital Control Interface for a Switching Power Supply ..... 43
- Sergey Osadchy, Larisa Vikhrova, Victor Kalich, Mariia Miroshnichenko*  
Combined system of automatic flow stabilization bread mass at the entry of the  
thresher of the grain harvester.....55

### Construction and Civil Engineering

- Victor Pashynskyi, Vladyslav Nastoyaschiy, Mykola Pashynskyi, Dmytro Bohatyrov*  
Impact of increasing regulatory requirements on the level of thermal reliability  
and heat loss through walls and roofs of residential and public building.....64
- Gennadiy Portnov, Andrii Tykhyi, Viktor Dariienko, Viktor Pukalov,  
Oleksandr Kuzyk, Lina Hasenko*  
Creating a database of complementary bent-welded profiles of lattice metal structures..... 74

### Agroengineering

- Volodymyr Onopa, Dmytro Artemenko, Oleh Kyslun, Volodymyr Onopa*  
Mathematical model of the upper working element of the mechanical-pneumatic  
collector of insect pests of nightshade crops..... 83
- Elchyn Aliiev, Oleksandr Kobets, Mykola Linko*  
Physico-mathematical model of the process of compression of compound  
feed components into expanders.....94

*Yuriy Kovalchuk, Ivan Lisoviy, Vasyly Kravchenko, Andriy Kovalchuk*  
Laser Strengthening of Tools and Parts of Automobile Transport Repair Workshops  
Equipment in the Agricultural Sector ..... 104

*Tumofii Rudenko, Volodymyr Amosov, Yuriy Kulyeshkov, Ivan Rudenko*  
Electric hoe - cultivator "Mriya" ..... 110

### **Road Transport**

*Liudmyla Tarandushka, Viktor Khaliavka, Yaroslav Kolomiets*  
Optimization of process performing an expert study of vehicles on the basis  
of monitoring the main indicators ..... 118

*Olena Ivankova, Alexei Burlaka*  
Study of restoration of body parts of automobile engines by the method of electric  
arc metalization ..... 127

*Ludmyla Tarandushka, Ivan Tarandushka*  
Development of the method for ensuring quality paint coating during painting  
and body work in car service systems ..... 135

*Mykhailo Krasota, Yuriy Kuleshkov, Igor Shepelenko, Ruslan Osin, Timofey Rudenko*  
The research of ways of efficiency increasing of electronic car system  
diagnostic operations ..... 144

*Viktor Aulin, Oleksandr Kuzyk, Serhii Lysenko, Andrii Hupka, Andrey Hrinkiv,  
Inna Zhilova*  
Methodology for calculating the main characteristics of sliding bearings  
of car systems and units and analyzing their tribological efficiency ..... 151

### **Transport Technologies (by Types)**

*Viktor Vojtov, Natalija Berezna, Igor Sysenko, Anton Voitov, Leonid Kryvenko,  
Anna Kozenok*  
Forecasting the congestion of the streets of large cities, taking into account  
fluctuations in the density and speed of traffic flows ..... 165

*Viktoriiia Nykonchuk, Ihor Khitrov, Svetlana Pachkevych*  
Implementation of Intercept Parking Concept in Urban Environment ..... 178

*Olena Khachaturian, Oleh Shcherbak*  
Research methodology of logistics processes in the region ..... 187

*Mykola Moroz, Tetiana Haikova, Iryna Soloshych*  
Optimizing modes of interaction between highway and urban passenger transport  
in Kremenchuk ..... 197

### **Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics**

*Oleh Sinchuk, Oleksii Mykhailenko, Viktor Horshkov*  
Fuzzy control system for the electrical complex of street lighting in settlements ..... 205

**Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії.** Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

**Анотація** українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

**Анотація** англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

**Структура анотацій:**

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

**Структура основного тексту статті:**

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

**Схема організації матеріалу статті:**

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. \*
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

**Адреса для надсилання:** stat\_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

**ДОВІДКА ПРО АВТОРА**  
**українською та англійською мовами**

	Українською	Англійською
<b>Прізвище, ім'я, по-батькові:</b>		
<b>Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:</b>		
<b>Посада (повна назва, без аббревіатур):</b>		
<b>Наукова ступінь:</b>		
<b>Вчене звання:</b>		
<b>Назва статті:</b>		
<b>*Спеціальність:</b>		
<b>Адреса для надсилання збірнику:</b>		
<b>Контактні телефони (бажано мобільний):</b>		
<b>E-mail:</b>		
<b>ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)</b>		

\* – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 208 Агроінженерія, 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами)

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.  
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

**В и п у с к 9(40)**  
**Частина I**

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка О.А. Боса

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»  
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.  
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25  
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 30.10.2023р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 28  
Тираж 300 прим. Зам. № 0832