

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 10 (296)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 10 (296) 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 10 (296) 2025

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могіла В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 4 від 28 листопада 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2025

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2025

З М І С Т

Спеціальність 122

Множинський Б.Г.АДАПТИВНА СИМЕТРИЧНА КРИПТОСИСТЕМА З ДИНАМІЧНИМ УЗГОДЖЕННЯМ
КЛЮЧІВ НА ОСНОВІ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 5

Спеціальність 133

Логунів О.М.ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ З САЕ-СИСТЕМАМИ
ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДИСКОВИХ ЗУБОРІЗНИХ ФРЕЗ У СЕРЕДОВИЩІ PTC CREO PARAMETRIC 13**Фафлей О.Я., Михайлюк В.В., Витриховський Є.А., Дейнега Р.О., Витвицький В.С., Волошин Ю.Д.**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОСІПЛОВОГО ПРИСТРОЮ
ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ 19**Shevchenko O.V., Zinchenko D.M.**RESEARCH INTO THE PATTERNS OF FORMATION OF THE STRUCTURE
OF TOOL HIGH-SPEED STEELS DURING SURFACE ELECTRON BEAM TREATMENT 24**Shevchenko O.V., Zinchenko D.M.**RESEARCH INTO THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE AND COERCIVE FORCE
OF SPRING STEELS FOR THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE
TESTING OF ELASTIC SUSPENSION ELEMENTS IN ELECTRIC LOCOMOTIVES 29

Спеціальність 151

Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Азарян А.А., Грищенко А.М.МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ПРНИЧОГО
ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ХВИЛЬОВОГО ПІДХОДУ 33**Моркун Н.В., Лорія М.Г., Грищенко С.М., Олійник Т.А.**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ОЗНАК
МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН 43

Спеціальність 141

Рябов Є.С., Качан А.В.ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОЇ СИТЕМИ ПРОМИСЛОВОГО
АКУМУЛЯТОРНОГО МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ 52

Спеціальність 151

Дуришев О.А.СТАБІЛІЗАЦІЯ ЦИКЛУ СИНТЕЗУ МЕТАНОЛУ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІЧНОГО
КЕРУВАННЯ ВУЗЛОМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ 61

Спеціальність 161

Червінський Т.І., Казимирів П.І.

КОАГУЛЯЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МОТОРНИХ ОЛИВ 67

Спеціальність 273

Воробйов О.В.ОЦІНКА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПОДОВЖЕННЯ МІЖРЕМОНТНИХ ПРОБІГІВ КОЛІСНИХ ПАР
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ 78**Фомін О.В., Мірошникова М.В., Іванченко Д.А., Лісничий В.С., Іларіонов В.М., Черкашин О.П.**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВІВ
ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ АВАРІЙНОСТІ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ 84**Фомін О.В., Мірошникова М.В., Безлуцький В.О., Кульбовський І.І., Лушай Ю.В., Старук О.С.**РОЗРОБКА НОВИХ СИСТЕМ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ 94**Фомін О.В., Мірошникова М.В., Леонов С.М., Безлуцький, Гунько Є.В., Родіонов І.В.**РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ГАЛЬМІВНОГО ТА АВТОЗЧЕПНОГО УСТАТКУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ 104

CONTENTS
Speciality 122**Mnozhynskiy B.H.**

- ADAPTIVE SYMMETRIC CRYPTOSYSTEM WITH DYNAMIC KEY AGREEMENT BASED
ON DEEP NEURAL NETWORKS 5

Speciality 133**Lohunov O.M.**

- PARAMETRIC MODELING AND INTEGRATION WITH CAE SYSTEMS
IN THE DESIGN OF DISK GEAR CUTTERS IN PTC CREO PARAMETRIC ENVIRONMENT..... 13

Faflei O. Y., Mykhailiuk V. V., Vytrykhovskiy Y. A., Deineha R. O., Vytvytskyi V. S., Voloshyn Y. D.

- IMPROVING THE EFFICIENCY OF A MULTI-STAGE DEVICE
FOR COOLING INDUSTRIAL FACTORY FLUE GASES 19

Shevchenko O.V., Zinchenko D.M.

- RESEARCH INTO THE PATTERNS OF FORMATION OF THE STRUCTURE
OF TOOL HIGH-SPEED STEELS DURING SURFACE ELECTRON BEAM TREATMENT 24

Shevchenko O.V., Zinchenko D.M.

- RESEARCH INTO THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE AND COERCIVE
FORCE OF SPRING STEELS FOR THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR NON-
DESTRUCTIVE TESTING OF ELASTIC SUSPENSION ELEMENTS IN ELECTRIC LOCOMOTIVES 29

Speciality 151**Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Azaryan A.A., Gritsenko A.M.**

- MODELING OF AUTOMATED CONTROL OF MINING PRODUCTION
FACILITIES BASED ON THE WAVE APPROACH..... 33

Morkun N.V., Loriya M.G., Hryshchenko S.M., Oliinyk T.A.

- MODELLING THE PROCEDURE FOR DETERMINING THE CHARACTERISTIC FEATURES
OF MINERALOGICAL VARIETIES OF IRON ORE IN THE PROCESS OF DRILLING WELLS 43

Speciality 141**Riabov Ye.S., Kachan A.V.**

- REASONING FOR THE PARAMETERS OF THE TRACTION SYSTEM
OF AN INDUSTRIAL SHUNTING BATTERY LOCOMOTIVE 52

Speciality 151**Duryshch O.A.**

- STABILISATION OF THE METHANOL SYNTHESIS CYCLE BASED ON ALGORITHMIC CONTROL OF THE
COOLING AND CONDENSATION UNIT 61

Speciality 161**Chervinskyi T.I., Kazymyryv P.I.**

- COAGULATION PURIFICATION OF USED MOTOR OILS 67

Speciality 273**Vorobiov O.V.**

- EVALUATION OF CURRENT METHODS FOR EXTENDING THE INTERVALS BETWEEN
REPAIRS OF RAILWAY WHEEL SETS..... 78

Fomin O.V., Mirosnykova M.V., Ivanchenko D.A., Lisnychiy V.S., Illarionov V.M., Cherkashin O.P.

- INTELLIGENT LOCOMOTIVE DIAGNOSTICS SYSTEMS AS A TOOL
FOR REDUCING ACCIDENTS IN RAILWAY TRANSPORT..... 84

Fomin O.V., Mirosnykova M.V., Bezlutsky V.O., Kulbovskiy I.I., Lushchai Yu.V., Staruk O.S.

- DEVELOPMENT OF NEW SYSTEMS FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION
OF VEHICLES BASED ON INTELLIGENT DIAGNOSTICS 94

Fomin O.V., Mirosnykova M.V., Leonov S.M., Bezlutsky V.O., Gunko Ie. V., Rodionov I.B.

- DEVELOPMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION
OF BRAKING AND AUTOMATIC COUPLING EQUIPMENT OF RAILWAY ROLLING STOCK..... 104

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-5-12>

УДК 004.94:655.1

АДАПТИВНА СИМЕТРИЧНА КРИПТОСИСТЕМА З ДИНАМІЧНИМ УЗГОДЖЕННЯМ КЛЮЧІВ НА ОСНОВІ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Множинський Б.Г.

ADAPTIVE SYMMETRIC CRYPTOSYSTEM WITH DYNAMIC KEY AGREEMENT BASED ON DEEP NEURAL NETWORKS

Mnozhynskiy B.H.

Стаття присвячена розробці адаптивної симетричної криптосистеми. Формування ключів відбувається без традиційних протоколів обміну. Метод базується на синхронізації глибоких нейронних мереж. Процес реалізується через відкритий канал зв'язку. Мета роботи полягає в обґрунтуванні нової архітектури забезпечення динамічного управління в просторі нейронних мереж. Механізм ґрунтується на нейронній синхронізації. Оцінюється криптографічна стійкість та обчислювальна ефективність моделі. Методологія інтегрує криптографічний аналіз та теорію нейронних мереж. Застосовано формалізований опис алгоритмічних конструкцій. Виконано аналітичне оцінювання обчислювальної складності. Проведено порівняння з класичними схемами симетричного шифрування. Результатом є архітектура з децентралізованою логікою узгодження ключів. Ключ формується як функція внутрішнього стану мережі. Алгоритм охоплює ініціалізацію, синхронізацію та генерацію ключів. Система забезпечує циклічне оновлення ключового матеріалу. Реалізовано процедури шифрування та дешифрування. Проведено аналіз стійкості до пасивних атак. Досліджено резистентність до активних форм втручання. Система протидіє атакам перехоплення та інжекції. Механізм захищає від атак посередницького типу. Адаптивність моделі знижує кореляцію між послідовними ключами. Реконструкція внутрішніх станів суттєво ускладнюється. Обчислювальна складність залишається прийнятною для практичного застосування. Нейронна компонента не знижує продуктивність системи за тривалих комунікаційних сеансів. Практична цінність полягає у застосуванні в розподілених мережах. Система функціонує без централізованої інфраструктури довіри. Результати придатні для вбудованих

обчислювальних систем. Підхід застосовний у мобільних та сенсорних мережах. Модель зменшує залежність від асиметричної криптографії. Елімінуються пікові обчислювальні навантаження. Перспективи пов'язані з експериментальною верифікацією на апаратних платформах. Планується поглиблений аналіз стійкості до комбінованих векторів атак. Окремий науковий інтерес становить оптимізація архітектурних рішень.

Ключові слова: адаптивна криптосистема, симетричне шифрування, динамічне узгодження ключів, глибокі нейронні мережі, нейронна синхронізація, криптографічна стійкість.

Вступ. Розвиток мережевих систем передавання даних супроводжується зростанням вимог до криптографічного захисту за умов відкритих каналів, обмежених ресурсів і мінливої структури загроз. Симетричні криптосистеми зберігають високу обчислювальну ефективність, проте їхня практична безпека істотно залежить від способу формування, узгодження та оновлення ключів. Традиційні підходи до керування ключами спираються на попередній розподіл секретів або на асиметричні протоколи, які створюють додаткові часові, енергетичні та організаційні витрати, а також формують уразливі точки при компрометації початкових параметрів. Окремою проблемою є статичний характер ключового матеріалу у більшості симетричних схем. Фіксований або рідко оновлюваний ключ підвищує ефективність пасивного аналізу, спрощує кореляційні атаки та зменшує стійкість

системи в тривалих сеансах обміну [18]. Навіть за достатньої довжини ключа зберігається ризик поступового накопичення інформації про його структуру.

За цих умов і актуалізується потреба в криптографічних механізмах, які поєднують ефективність симетричного шифрування з динамічними процесами формування секретів. Особливий інтерес становлять підходи, що не використовують класичні протоколи обміну ключами, а формують спільний секрет у процесі адаптивної взаємодії сторін. Постановка проблеми дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні симетричної криптосистеми, в якій узгодження та оновлення ключів реалізуються як керований динамічний процес на основі глибоких нейронних мереж, з забезпеченням криптографічної стійкості, прийнятної обчислювальної складності та практичної придатності для розподілених інформаційних середовищ.

Метою статті є наукове обґрунтування використання адаптивної симетричної криптосистеми, у якій узгодження і регулярне оновлення криптографічних ключів реалізуються як динамічний процес синхронізації глибоких нейронних мереж.

Виклад основного матеріалу дослідження. Адаптивна симетрична криптосистема ґрунтується на принципі безперервної зміни криптографічних параметрів у процесі сеансу зв'язку. Система орієнтована на мінімізацію статичних елементів, які формують передбачуваність для зловмисника. Центральним елементом виступає динамічний механізм узгодження ключів, інтегрований безпосередньо у логіку симетричного шифрування. Архітектура системи має децентралізований характер. Кожна сторона обміну діє автономно, без залучення довіреного центру або сервера керування ключами для усунення точки єдиного компрометаційного ризику. Архітектурна модель включає модуль шифрування, модуль нейронної синхронізації, модуль адаптації параметрів та модуль контролю цілісності станів. Сторони обміну виконують симетричні функції [2]. Кожен учасник підтримує ідентичну нейронну структуру, однакові правила оновлення ваг і спільно визначені початкові обмеження параметрів. Відсутність функціональної асиметрії знижує ризик витоку службової інформації через поведінкові відмінності протоколу.

Комунікація між сторонами здійснюється через відкритий канал. Передаються лише допоміжні сигнали синхронізації, які не містять безпосередньої інформації про значення ключа. Захищений канал на початковому етапі не потрібен. Це розширює можливості застосування системи в умовах обмеженої інфраструктури або в динамічних мережах. Криптографічний ключ не зберігається у статичному вигляді. Він існує як поточний стан узгодженої нейронної моделі. Будь-яка спроба перехоплення фіксує лише часткові сигнали, непридатні для відновлення внутрішнього стану системи [16]. Таким чином, криптосистема реалізує принцип еволюційної секретності. Адаптивність архітектури проявляється у здатності змінювати параметри нейронної моделі залежно від характеристик каналу, інтенсивності трафіку та часових обмежень. Система реагує на зовнішні впливи не шляхом аварійного завершення сеансу, а шляхом перебудови внутрішніх станів.

Модель динамічного узгодження ключів базується на синхронізації глибоких нейронних мереж між сторонами обміну. Узгодження відбувається без передачі самих ваг або ключових значень. Процес реалізує спільну еволюцію станів на основі однакових вхідних стимулів та узгоджених правил навчання. Нейронна мережа має багаторівневу структуру. Вхідний шар формує випадкові або псевдовипадкові вектори стимулів. Приховані шари забезпечують нелінійне перетворення сигналів та підвищують ентропію внутрішнього представлення. Вихідний шар генерує бінарні або дискретні сигнали синхронізації. Глибина мережі визначає рівень криптографічної стійкості. Зі збільшенням кількості шарів зростає складність реконструкції внутрішнього стану навіть за наявності повного журналу переданих сигналів [19]. При цьому зберігається можливість синхронізації між легітимними сторонами. Процес синхронізації має ітеративний характер. На кожному кроці сторони обробляють однаковий вхідний вектор, обмінюються вихідними сигналами та коригують ваги згідно з локальним правилом навчання.

Синхронізація досягається після збігу внутрішніх станів з наперед заданою точністю. Адаптація параметрів реалізується через зміну швидкості навчання, діапазонів ваг та частоти оновлення. Механізм адаптації активується при виявленні аномалій у каналі або зміні режиму навантаження. Це забезпечує стабільність

синхронізації без зниження рівня секретності. Ключ формується як детермінована функція поточного стану нейронної мережі. Він не передається каналом і не зберігається після завершення сеансу. Зміна хоча б одного параметра мережі призводить до повної декореляції ключового простору [6]. Для оцінювання практичних характеристик моделі доцільно розглядати систему параметрів, що впливають на безпеку, продуктивність та стійкість синхронізації (табл. 1).

Представлена модель не потребує класичних протоколів обміну ключами. Вона замінює їх процесом спільної адаптивної еволюції, що знижує залежність від математичних припущень, характерних для традиційної криптографії [4]. Стійкість моделі визначається не лише розміром ключового простору, а й складністю відтворення динаміки навчання. Зловмисник стикається з необхідністю одночасного відновлення структури мережі, параметрів адаптації та початкових умов. Алгоритм роботи адаптивної симетричної криптосистеми формує замкнений цикл, у межах якого ініціалізація, узгодження, шифрування та оновлення ключів відбуваються без фіксованих статичних станів. Криптографічна логіка інтегрується з механізмами нейронної адаптації, тому кожен етап алгоритму впливає на наступний. Процес ініціалізації визначає початкову допустиму область параметрів. Сторони обміну погоджують структуру нейронної мережі, кількість шарів, розмірність вхідних векторів та правила корекції ваг [8]. Початкові значення ваг не збігаються, але обмежуються однаковими інтервалами. Формально початковий стан мережі кожної сторони задається як:

$$W^{(0)} = \{w_{ij} \mid w_{ij} \in [-\alpha, \alpha]\}, \quad (1)$$

де: α – граничний діапазон допустимих значень. Вибір α впливає на швидкість синхронізації та рівень ентропії внутрішніх станів.

Генерація вхідних стимулів відбувається на кожній ітерації синхронізації. Вхідний вектор X^t формується як псевдовипадкова послідовність:

$$X^t = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t\}, x_i^t \in \{-1, +1\}, \quad (2)$$

Надані вектори можуть генеруватися детерміновано на основі лічильника або спільного початкового зерна. Передача X^t відкритим каналом не знижує рівень секретності, оскільки без знання внутрішніх ваг нейронної мережі відновлення стану неможливе. Вихід нейронної мережі визначається як функція активації [7]:

$$y^t = \text{sign}(\sum w_j^t x_j^t). \quad (3)$$

Сторони обмінюються лише значенням y^t . За умови збігу вихідних сигналів активується правило навчання. Оновлення ваг здійснюється за локальним детермінованим алгоритмом:

$$w_j^{t+1} = w_j^t + \eta \cdot x_j^t \cdot y^t. \quad (4)$$

де η є коефіцієнтом адаптації. Зміна η у часі дозволяє керувати компромісом між швидкістю синхронізації та стійкістю до атак спостереження. Ключ симетричного шифрування формується як функція поточного стану мережі:

Таблиця 1

Практичні параметри моделі динамічного узгодження ключів на основі глибокої нейронної мережі [5; 13]

Параметр моделі	Функціональне призначення	Вплив на стійкість	Вплив на швидкодію	Практичні обмеження
Кількість прихованих шарів	Формування глибокого внутрішнього представлення	Зростання простору атак	Збільшення часу синхронізації	Обчислювальні ресурси
Розмір вектору стимулів	Визначення ентропії вхідних даних	Зниження кореляцій	Помірний вплив	Пропускна здатність каналу
Діапазон ваг	Контроль варіативності станів	Ускладнення відновлення	Незначний вплив	Чутливість до шуму
Швидкість навчання	Регулювання темпу синхронізації	Баланс стійкості і стабільності	Прямий вплив	Ризик розсинхронізації
Частота оновлення ключа	Обмеження часу дії ключа	Зменшення вікна атаки	Додаткові обчислення	Затримки в реальному часі

$$K^t = H(W^t). \quad (5)$$

де H є криптографічною хеш-функцією або бієктивним перетворенням, що забезпечує рівномірний розподіл ключового простору.

Таким чином, ключ існує лише у похідному вигляді і не збігається безпосередньо з вагами мережі. Оновлення ключів відбувається або після фіксованої кількості блоків, або після досягнення заданого порогу дивергенції каналу [10]. Частота оновлення описується як:

$$f_k = \frac{B}{T}. \quad (6)$$

де B кількість зашифрованих блоків;

T це час сеансу.

Збільшення f_k зменшує часовий інтервал ефективної атаки.

Процедура шифрування використовує стандартний симетричний примітив, наприклад, блоковий шифр у режимі потокової модифікації. Шифротекст C_i формується як:

$$C_i = E(P_i, K_i), \quad (7)$$

де P_i є відкритим блоком даних. Дешифрування виконується симетрично:

$$P_i = D(C_i, K^t). \quad (8)$$

У разі втрати синхронізації система не припиняє роботу. Активується повторна фаза узгодження, що дозволяє відновити коректний стан без втрати конфіденційності попередніх блоків (табл. 2).

Криптографічна стійкість адаптивної симетричної криптосистеми визначається сукупністю динамічних та структурних факторів. На відміну від класичних схем,

оцінювання безпеки не зводиться до розміру ключа або складності окремої математичної задачі. Пасивна атака передбачає спостереження за відкритим каналом без втручання у протокол. Зловмисник отримує доступ до послідовностей X^t та y^t . Для відновлення ключа необхідно реконструювати внутрішній стан нейронної мережі, що формально зводиться до задачі з експоненційною складністю [1]:

$$P(\text{recover } W | X, y) \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty. \quad (9)$$

де n є розмірністю вхідного простору. Зі зростанням глибини мережі простір можливих конфігурацій ваг зростає надлінійно.

Активні атаки передбачають модифікацію переданих сигналів або інжекцію власних значень y^t . У таких умовах алгоритм адаптації призводить до розсинхронізації атакуючої сторони з легітимними учасниками. Будь-яке неконсистентне втручання порушує правило навчання та призводить до випадкової еволюції станів [11].

Стійкість до атаки типу «людина посередині» зумовлена відсутністю фіксованих секретів. Атакуючий агент не здатний підтримувати одночасну синхронізацію з обома сторонами, оскільки адаптація параметрів залежить від локального стану кожного вузла. Адаптивність системи підвищує рівень безпеки шляхом зміни статистичних властивостей ключового потоку. Навіть у разі часткового витоку інформації кореляція між послідовними ключами мінімізується:

$$\text{corr}(K^t, K^{t+1}) \approx 0. \quad (10)$$

Цей крок виключає можливість екстраполяції ключів на основі попередніх значень (табл. 3).

Таблиця 2

Алгоритмічні етапи роботи адаптивної симетричної криптосистеми (сформовано автором)

Етап алгоритму	Вхідні дані	Основні операції	Вихідні дані	Криптографічний ефект
Ініціалізація	Структура мережі, α	Генерація початкових ваг	$W^{(0)}$	Формування початкової ентропії
Синхронізація	X^t, y^t	Оновлення ваг	W^t	Узгодження станів
Генерація ключа	W^t	Хешування	K^t	Отримання симетричного ключа
Шифрування	P, K^t	Блокове перетворення	C_i	Конфіденційність
Оновлення ключа	Лічильник, канал	Адаптація параметрів	K^{t+1}	Обмеження часу дії ключа

Таблиця 3

Стійкість адаптивної симетричної криптосистеми до типових класів атак (сформовано автором)

Тип атаки	Доступ атакуючого	Механізм протидії	Результат атаки
Пасивне спостереження	X^t, y^t	Висока ентропія станів	Відновлення ключа неможливе
Активна інжекція	Модифікація y^t	Розсинхронізація	Втрата контролю атакуючим
Повтор сигналів	Архів трафіку	Адаптивне оновлення	Некоректні ключі
Людина посередині	Повний контроль каналу	Локальна адаптація	Неможливість синхронізації

Вплив адаптивності на безпеку проявляється у зменшенні предиктивності системи. Криптосистема перестає бути стаціонарною. Це ускладнює формування універсальних атакуючих стратегій. Безпека системи визначається не одноразовою складністю, а стійкістю процесу еволюції у часі. Обчислювальна ефективність адаптивної симетричної криптосистеми визначається сукупною вартістю нейронної синхронізації, генерації ключів та симетричних криптографічних перетворень [12]. На відміну від класичних схем, часові витрати тут розподіляються динамічно протягом усього сеансу, а не концентруються на одноразовій процедурі обміну ключами (рис. 1).

де N^2 відображає операції зваженого підсумовування між нейронами суміжних шарів. Зростання L підвищує криптографічну стійкість, але лінійно збільшує часові витрати.

Час синхронізації є стохастичною величиною. Його математичне сподівання залежить від діапазону початкових ваг α та коефіцієнта адаптації η [9]. Очікувана кількість ітерацій досягнення синхронного стану може бути описана як:

$$E[T_s] \approx \frac{k\alpha^2}{\eta}, \tag{12}$$

де k є емпіричним коефіцієнтом, що залежить від архітектури мережі.

Зменшення показника η знижує швидкість навчання, але стабілізує процес синхронізації. Генерація ключа є похідною операцією. Якщо ключ формується через хешування стану ваг, то його обчислювальна складність визначається складністю хеш-функції:

$$C_k = O(|W|). \tag{13}$$

де $|W|$ є кількістю параметрів нейронної мережі. За умови фіксованої архітектури ця величина залишається сталою для кожного оновлення ключа.

Процедури шифрування та дешифрування базуються на стандартних симетричних перетвореннях [15]. Для блокового шифру з розміром блоку b та довжиною повідомлення M часові витрати описуються як:

$$C_e = O\left(\frac{M}{b}\right), \tag{14}$$

Описана складова не залежить від нейронної частини системи і збігається за порядком з класичними симетричними схемами [3]. Сумарні часові витрати за один сеанс зв'язку визначаються як:

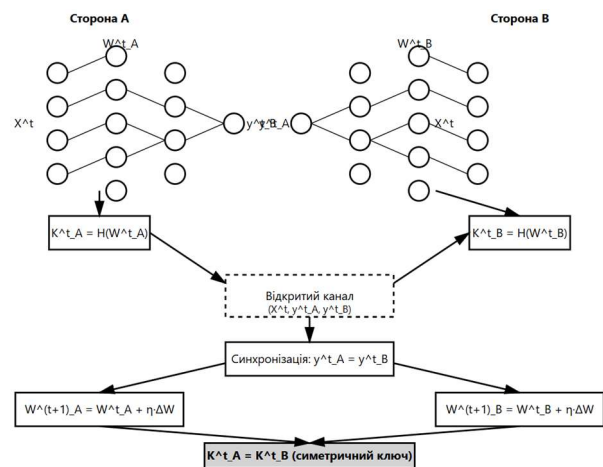


Рис. 1. Схема адаптивної криптосистеми на основі нейронної мережі (побудовано автором)

Основним джерелом додаткових обчислювальних витрат виступає процес синхронізації глибоких нейронних мереж. Нехай L є кількістю шарів мережі, N є кількістю нейронів у шарі, T_s є кількістю ітерацій синхронізації. Тоді асимптотична обчислювальна складність одного повного циклу узгодження оцінюється як:

$$C_s = O(T_s \cdot L \cdot N^2). \tag{11}$$

$$C_{total} = C_s + n \cdot C_k + C_e. \quad (15)$$

де n_k є кількістю оновлень ключа за сеанс. За великих обсягів переданих даних частка C_e домінує, а відносний внесок нейронної синхронізації зменшується.

Продуктивність системи, краще за все, оцінювати через пропускну здатність. Нехай τ_e є середнім часом шифрування одного блоку, τ_s є середнім часом ітерації синхронізації. Тоді ефективна пропускну здатність визначається як:

$$P_{eff} = \frac{M}{(T_s \cdot \tau_s + M \cdot \tau_e)}. \quad (16)$$

За умови рідкісного оновлення ключів та великих повідомлень P_{eff} наближається до пропускну здатності класичного симетричного шифру. Порівняння з класичними схемами доцільно проводити з урахуванням фазової структури криптографічних протоколів. У традиційних симетричних системах обмін ключами реалізується або через попередньо розподілений секрет, або через асиметричні алгоритми [14]. Часова складність асиметричного узгодження ключів може бути оцінена як:

$$C_{RSA} = O(n^3) \quad (17)$$

де n є розміром модуля.

Сформована операція виконується одноразово, але створює значні затримки при коротких сесіях. Для схем на основі еліптичних кривих складність однієї операції множення точки оцінюється як:

$$C_{ECC} = O(n^2) \quad (18)$$

що є меншим, але все одно перевищує складність однієї ітерації нейронної синхронізації за помірних значень N . Головна відмінність полягає у часовому розподілі навантаження. Класичні схеми концентрують складні операції на початку сеансу. Адаптивна симетрична криптосистема розподіляє витрати рівномірно у часі. Це знижує пікові затримки та підвищує стабільність продуктивності. Цінним показником стає енергетична вартість обчислень [17]. Нехай E_{op} є середнім енергоспоживанням однієї арифметичної

операції. Тоді енергетичні витрати синхронізації описуються як:

$$E_s = E_{op} \cdot T_s \cdot L \cdot N^2. \quad (19)$$

Для вбудованих пристроїв виданий показник критичний. Проте відсутність асиметричних операцій з великими числами компенсує додаткові витрати на нейронну частину. Масштабованість системи визначається залежністю C_s від параметрів мережі. Збільшення N покращує криптографічні властивості, але квадратично впливає на складність. Тому практичні реалізації орієнтуються на компромісні значення N , за яких досягається баланс між безпекою та продуктивністю. Чутливість продуктивності до частоти оновлення ключів описується як:

$$C_k = \frac{\partial C_{total}}{\partial n_k}, \quad (20)$$

Це означає, що надмірно часте оновлення ключів лінійно збільшує сумарні витрати, але не впливає на складність шифрування. Для потокових сценаріїв передавання даних доцільно обмежувати n_k таким чином, щоб виконувалась нерівність:

$$C_s + n_k \cdot C_k \ll C_e. \quad (21)$$

Наведена умова гарантує нам, що нейронна складова не знижує загальну пропускну здатність системи. Таким чином, обчислювальна складність адаптивної симетричної криптосистеми має керований характер. Вона визначається параметрами архітектури та режимом роботи, а не жорстко зафіксованими криптографічними операціями. У порівнянні з класичними схемами система демонструє нижчі пікові затримки, відсутність дорогих асиметричних операцій та прогнозовану продуктивність у тривалих сесіях зв'язку.

Висновки. Дослідження доводить доцільність відмови від класичних протоколів обміну ключами у симетричних криптосистемах шляхом переходу до динамічного формування ключового матеріалу. Узгодження ключів через нейронну синхронізацію переводить процес захисту з площини статичних секретів у площину керованої еволюції станів. Такий підхід змінює саму логіку криптографічної

безпеки, оскільки компрометація окремих повідомлень або службових сигналів не надає атакуючому достатньої інформації для відновлення секрету, а часовий фактор стає додатковим елементом захисту.

Запропонована архітектура показала здатність протидіяти як пасивним, так і активним загрозам без залучення централізованої інфраструктури довіри. Відсутність фіксованого ключа та постійна перебудова внутрішніх параметрів унеможливають ефективні атаки спостереження, інжекції та посередництва. Криптографічна стійкість формується не лише розміром ключового простору, а й складністю відтворення динаміки нейронного навчання, що суттєво ускладнює побудову універсальних атакуючих стратегій. Аналіз обчислювальної складності підтвердив практичну придатність адаптивної симетричної криптосистеми для тривалих сеансів зв'язку. Розподілений у часі характер нейронних обчислень знижує пікові навантаження та усуває дорогі асиметричні операції. За великих обсягів передавання даних продуктивність системи наближається до показників класичних симетричних схем, що відкриває можливості використання запропонованого підходу у вбудованих, мобільних і сенсорних мережах.

Література

1. Abrar A., Dasgupta S., Rahman M., Alsharif A. AI-driven post-quantum cryptography for cyber-resilient V2X communication in transportation cyber-physical systems. arXiv. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.08496>
2. Alanazi M. J., Alhoweiti R. A., Alhwaity G. A., Alharbi A. R. An adaptive hybrid cryptographic framework for resource-constrained IoT devices. *Electronics*. 2025. Vol. 14. No. 23. Article 4666. <https://doi.org/10.3390/electronics14234666>
3. Alzaidy S., Binsalleeh H. Adversarial attacks with defense mechanisms on convolutional neural networks and recurrent neural networks for malware classification. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 4. Article 1673. <https://doi.org/10.3390/app14041673>
4. Bhat R., Nanjundegowda R. Exploring generative adversarial networks for secure data encryption and future directions in communication systems. *Proceedings of the International Conference on Futuristic Technology*. 2025. <https://doi.org/10.5220/0013591300004664>
5. Geng Y. Identification of cryptosystem based on deep neural network. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2025. Vol. 142. p. 391–399. <https://doi.org/10.54097/zfm1nx90>
6. Hanafi B., Bokhari M. U., Wani M. A., Shakil K. A., Ali G. Dynamic adversarial neural cryptography for ensuring privacy in smart contracts. *PeerJ Computer Science*. 2025. Vol. 11. Article e3286. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3286>
7. Hao J., Jin M., Li Y., Yang Y. Neural network-based symmetric encryption algorithm with encrypted traffic protocol identification. *PeerJ Computer Science*. 2025. Vol. 11. Article e2750. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2750>
8. He Z., Sayadi H. AI in chaos: Adaptive and secure communication via deep reinforcement learning and moving target defense. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. p. 199971–200000. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3635665>
9. Jain K. Exploring cryptographic key management schemes for enhanced security in WSNs. *Journal of Information and Applied Science*. 2025. Vol. 20. No. 1. p. 18–37. <https://doi.org/10.2478/ias-2025-0002>
10. Jung I. S., Song Y. R., Jilcha L. A., Kim D. H., Im S. Y., Shim S. W., Kim Y. H., Kwak J. Enhanced encrypted traffic analysis leveraging graph neural networks and optimized feature dimensionality reduction. *Symmetry*. 2024. Vol. 16. No. 6. Article 733. <https://doi.org/10.3390/sym16060733>
11. Koshiba T., Zolfaghari B., Bibak K. A tradeoff paradigm shift in cryptographically-secure pseudorandom number generation based on discrete logarithm. *Journal of Information Security and Applications*. 2023. Vol. 73. Article 103430. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2023.103430>
12. Kumar P. R., Goel S. A secure and efficient encryption system based on adaptive and machine learning for securing data in fog computing. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 11654. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92245-9>
13. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. The model for assessing the competitiveness of high tech enterprises on the basis of the formation of key competences. *Academic Review*. 2023. Vol. 59. No. 2. p. 75–89. <https://doi.org/10.32342/20745354-2023-2-59-5>
14. Makedon V., Myachin V., Aloshyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*. 2025. Vol. 34. No. 5. p. 165–179. URL: https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf
15. Mohsin Z. R. AI-powered encryption revolutionizing cybersecurity with adaptive cryptographic algorithms. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*. 2025. Vol. 16. No. 1. p. 44–62. <https://doi.org/10.61841/turcomat.v16i1.14976>
16. Reddy P. S., Reddy T. S., Khaled M. K. Enhanced steganography using dynamic compression and

- encryption algorithms. *International Journal of Engineering Innovations and Management Strategies*. 2025. Vol. 1. No. 3. p. 1–13.
17. Saha A., Pathak C., Saha S. A study of machine learning techniques in cryptography for cybersecurity. *American Journal of Electronics & Communication*. 2021. Vol. 1. No. 4. p. 22–26.
 18. Singh M., Baranwal N., Singh K. N., Singh A. K. Using GAN-based encryption to secure digital images with reconstruction through customized super resolution network. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2023. Vol. 70. No. 1. p. 3977–3984. <https://doi.org/10.1109/TCE.2023.3276732>
 19. Zarei M., Dindarlou M. H. F., Taghizadeh M., et al. Lightweight image encryption for wireless sensor networks using optimized elliptic curve and fuzzy logic. *Scientific Reports*. 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32877-z>

Mnozhytskyi B.H. Adaptive symmetric cryptosystem with dynamic key agreement based on deep neural networks

The article is devoted to the development of an adaptive symmetric cryptosystem. Key formation is performed without traditional key exchange protocols. The method is based on the synchronization of deep neural networks. The process is implemented over an open communication channel. The purpose of the study is to substantiate a new architecture for dynamic key management in the space of neural networks. The mechanism relies on neural synchronization. Cryptographic robustness and computational efficiency of the model are evaluated. The methodology integrates cryptographic analysis and neural network theory. A formalized description of algorithmic constructions is applied. An analytical assessment of computational complexity is carried out. A comparison with classical

symmetric encryption schemes is performed. The result is an architecture with decentralized key agreement logic. The key is generated as a function of the internal state of the network. The algorithm covers initialization, synchronization, and key generation. The system provides cyclic updating of key material. Encryption and decryption procedures are implemented. Resistance to passive attacks is analyzed. Robustness against active forms of interference is investigated. The system counteracts interception and injection attacks. The mechanism protects against man-in-the-middle attacks. Model adaptivity reduces correlation between successive keys. Reconstruction of internal states is significantly complicated. Computational complexity remains acceptable for practical application. The neural component does not reduce system performance during long communication sessions. Practical value lies in application within distributed networks. The system operates without centralized trust infrastructure. The results are suitable for embedded computing systems. The approach is applicable to mobile and sensor networks. The model reduces dependence on asymmetric cryptography. Peak computational loads are eliminated. Future work is associated with experimental verification on hardware platforms. An in-depth analysis of resistance to combined attack vectors is planned. A separate scientific interest concerns optimization of architectural solutions.

Keywords: *adaptive cryptosystem, symmetric encryption, dynamic key agreement, deep neural networks, neural synchronization, cryptographic robustness.*

Множинський Богдан Георгійович – аспірант, Київський Національний Університет Технологій Та Дизайну (Київ), mnbogdan98@gmail.com

Стаття подана 12.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-13-18>

УДК 621.91.02

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ З CAE-СИСТЕМАМИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДИСКОВИХ ЗУБОРІЗНИХ ФРЕЗ У СЕРЕДОВИЩІ PTC CREO PARAMETRIC

Логунів О.М.

PARAMETRIC MODELING AND INTEGRATION WITH CAE SYSTEMS IN THE DESIGN OF DISK GEAR CUTTERS IN PTC CREO PARAMETRIC ENVIRONMENT

Lohunov O.M.

У статті розглядається актуальна проблема підвищення ефективності проектування складного металорізального інструменту в умовах сучасного машинобудування. Об'єктом дослідження є дискові зуборізні фрези, призначені для нарізування циліндричних зубчастих коліс методом копіювання. Оскільки ці інструменти є стандартизованими та виготовляються комплектами (зазвичай з 8, 15 або 26 фрез на кожен модуль залежно від необхідної точності), вони виступають ідеальним об'єктом для застосування методів автоматизації параметричного проектування. В роботі обґрунтовано перехід від застарілих методів моделювання, що використовували наближені побудови сплайнами по характерних точках (характерні для систем типу APM WinMachine), до точного математичного моделювання у CAD-системах високого рівня, таких як PTC Creo Parametric. Авторами представлено комплексну методіку створення повністю адаптивної 3D-моделі зуборізної фрези. Основою запропонованого підходу є використання інструменту «Parameters» як центрального вузла керування змінними (модуль, число зубів, кут профілю) та інструменту «Relations» для встановлення математичних залежностей розрахунку похідних геометричних характеристик (ділільний діаметр, діаметри кіл вершин та западин). Важливою частиною роботи є розрахунок та побудова точної геометрії різального зуба. У статті детально описано процес генерації евольвентного профілю за допомогою теоретичних рівнянь у декартових координатах через функцію «Equation Driven Curve» з подальшим відзеркаленням профілю відносно площини симетрії зуба. Крім того, за допомогою рівняння спіралі Архімеда в циліндричних координатах змодельовано

специфічну геометрію затилованої поверхні, що необхідно для забезпечення задніх кутів під час різання. Особливу увагу приділено автоматизації проектування за допомогою інструменту «Family Table», який дозволяє генерувати весь номенклатурний ряд комплекту фрез з однієї базової моделі без ручної перебудови. Також у статті висвітлено питання інтеграції CAD-моделі з CAE-системою ANSYS для проведення інженерного аналізу. Описано послідовність виконання статичного, динамічного (модального) та зв'язаного термоструктурного аналізів, необхідних для оцінки міцності, вібростійкості та термостабільності інструменту під дією робочих навантажень. Результатом роботи є верифікована методика, що значно скорочує час проектування, мінімізує помилки та готує модель до складних розрахунків на міцність.

Ключові слова: параметричне моделювання, дискова зуборізна фреза, PTC Creo Parametric, евольвента, спіраль Архімеда, CAE-аналіз, Family Table.

Вступ. В сучасних умовах машинобудування вимоги до точності, швидкості проектування та гнучкості виробництва зросли експоненціально. Параметричне моделювання стає критично важливим інструментом для оптимізації виробничих процесів, дозволяючи інженерам швидко адаптувати конструкції під специфічні потреби замовника, що є ключовим фактором конкурентоспроможності в аерокосмічній, автомобільній та медичній галузях [1-5]. Особливої актуальності це набуває при

проектуванні складного різального інструменту, такого як дискові зуборізні фрези. Ці інструменти призначені для нарізування зубчастих коліс методом копіювання, що вимагає високої відповідності профілю інструменту профілю западини деталі. Фрези традиційно виготовляються комплектами (з 8, 15 або 26 номерів) для кожного модуля.

Попередній стан речей у проектуванні таких фрез характеризувався використанням наближених методів. Традиційно, для побудови профілю конструктори використовували нормалізовані таблиці координат точок евольвентної частини (x , y), наведені у довідковій літературі та стандартах (наприклад, для модуля $m=100$ мм з подальшим перерахунком). При використанні попередніх поколінь CAD-систем (зокрема, APM WinMachine), побудова контуру здійснювалася шляхом нанесення цих точок на ескіз та їх з'єднання за допомогою сплайнів або дуг кіл (для профілів типу I та II)[6]. Такий підхід мав суттєві недоліки: трудомісткість ручного введення координат, залежність точності від кількості точок та немінуча похибка інтерполяції сплайну між вузловими точками. Перехід на сучасні системи високого рівня, такі як PTC Creo Parametric, відкриває нові можливості. Ця система дозволяє замінити дискретну апроксимацію неперервним математичним описом, мінімізувати людські помилки та забезпечити повну асоціативність моделі, креслення та розрахункових даних [7-9]

Мета статті. Розробка методики параметричного 3D-моделювання дискових зуборізних фрез у середовищі PTC Creo Parametric із застосуванням точних аналітичних рівнянь та підготовка моделі до інтегрованого інженерного аналізу в системі ANSYS.

Результати дослідження. Методика параметричного моделювання: Керування параметрами

Основою запропонованої методики є відмова від «жорсткої» геометрії на користь повністю керованої моделі. Ключовим інструментом для організації та автоматизації створення моделі є Таблиця параметрів (Parameters). Вона слугує єдиним центром управління всіма змінними, що визначають геометрію та характеристики фрези. Замість того, щоб вручну вводити розміри для кожного елемента, конструктор задає базові змінні: модуль (MODULE), кількість зубів

(NO_OF_TEETH), кут профілю (PRESSURE_ANGLE), діаметр посадкового отвору та зовнішній діаметр.

Математичні та логічні залежності між параметрами встановлюються через інструмент Relations (Рівняння). Це дозволяє автоматично обчислювати похідні величини (ділительний діаметр, діаметри кіл вершин та западин) при зміні вхідних даних. Наприклад, зміна модуля автоматично перераховує всі залежні розміри, що виключає арифметичні помилки та гарантує геометричну цілісність моделі [4, 5]. Такий підхід також дозволяє стандартизувати моделі в різних проектах, хоча слід бути обережним, щоб уникнути «надмірного обмеження» (over-constraining) моделі, яке може ускладнити подальше редагування [6].

Критичним аспектом якості зуборізної фрези є точність її профілю, оскільки він безпосередньо копіюється на деталь. У класичному підході евольвентна ділянка будувалася наближено по характерних точках (зазвичай 8–15 точок на висоту зуба). Сплайн, що проходить через ці точки, має відхилення від теоретичної евольвенти, особливо на ділянках зі змінною кривизною.

У середовищі Creo Parametric реалізовано побудову через інструмент Equation Driven Curve (Крива за рівнянням)[10]. Профіль задається системою точних рівнянь у декартових координатах:

$$\begin{aligned} x &= r_{base} \cdot \cos(t \cdot \theta_{max}) \\ &+ r_{base} \cdot t \cdot \theta_{max} \cdot \sin(t \cdot \theta_{max}) \\ y &= r_{base} \cdot \sin(t \cdot \theta_{max}) - \\ &r_{base} \cdot t \cdot \theta_{max} \cdot \cos(t \cdot \theta_{max}) \end{aligned} \quad (1)$$

де r_{base} — радіус основного кола, а параметр t змінюється від 0 до 1

Кількісне порівняння показує, що використання параметричних рівнянь дозволяє усунути похибку апроксимації, яка при сплайновому методі може досягати 0.01–0.05 мм. Більше того, параметризація дозволяє миттєво генерувати унікальний інструмент під конкретне число зубів (наприклад, $z=30$), усуваючи методичну похибку універсальних комплектів фрез, розрахованих на діапазон чисел зубів.

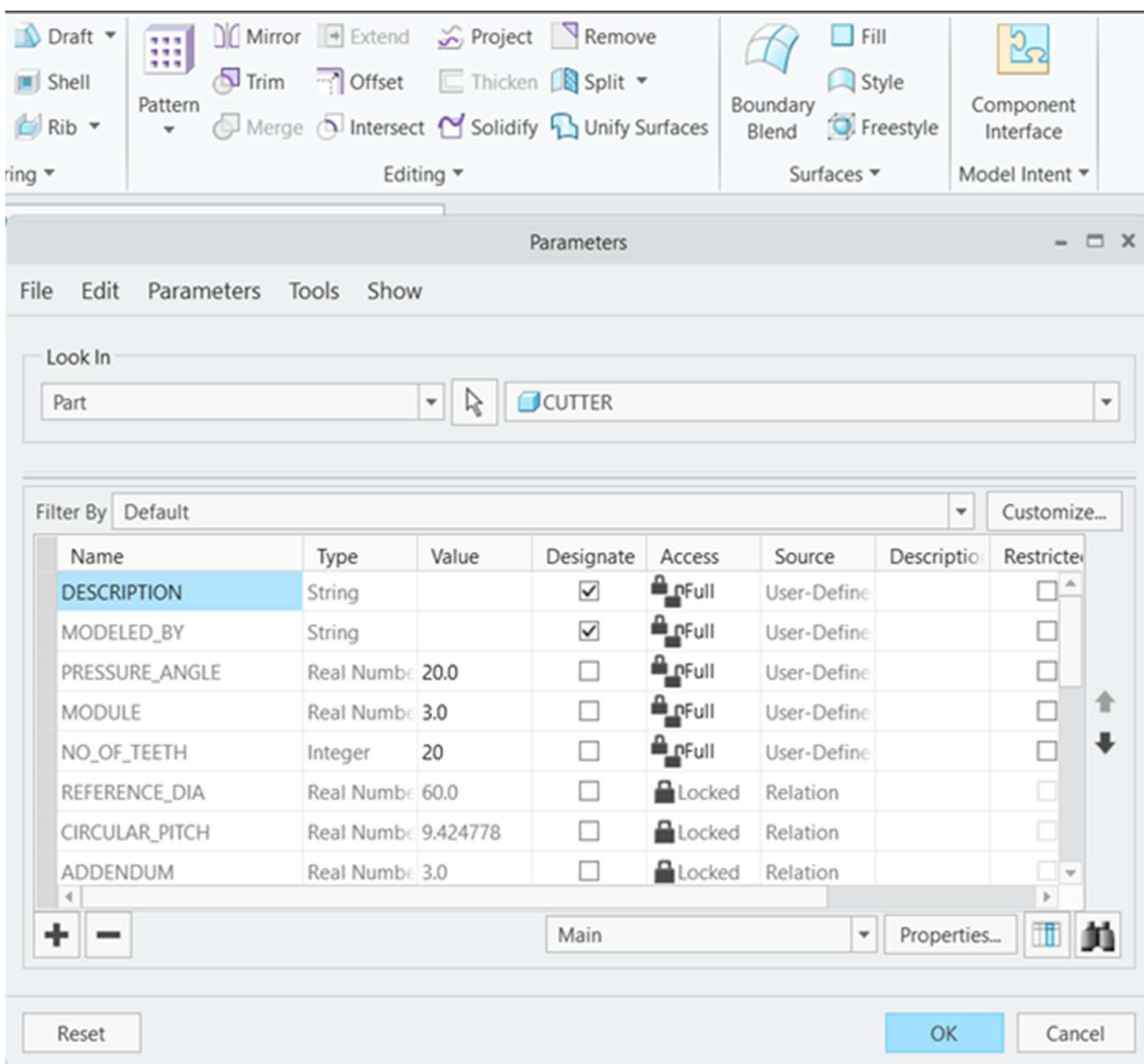


Рис. 1. Таблиця параметрів у середовищі PTC Creo Parametric

Специфікою зуборізних фрез є необхідність затилювання задньої поверхні зуба для забезпечення задніх кутів різання при збереженні профілю після переточувань. У Creo Parametric це реалізується за допомогою операції Sweep (Протягування) вздовж траєкторії. Як траєкторія використовується крива, описана рівнянням спіралі Архімеда в циліндричних координатах:

$$r = IR + (OR - IR) \cdot t \tag{2}$$

де IR та OR — внутрішній та зовнішній радіуси ділянки спіралі.

Оскільки фрези виготовляються комплектами, моделювати кожен фрезу окремо неефективно. Інструмент Family Table (Таблиця

сімейства) дозволяє створити базову модель (generic) і на її основі автоматично згенерувати всі варіанти виконань (instances) — від №1 до №8. Кожен варіант успадковує логіку побудови, але має унікальні значення параметрів. Це скорочує час на розробку комплекту у 8–10 разів порівняно з ручним моделюванням кожної одиниці [2].

Створена параметрична модель містить повний набір геометричних та фізичних даних, що дозволяє безшовно передавати її в системи інженерного аналізу (CAE), такі як ANSYS. Це відкриває можливості для проведення комплексних досліджень:

- Статичний аналіз: перевірка міцності зуба на згин під дією сили різання.
- Модальний аналіз: визначення власних частот для уникнення резонансу.

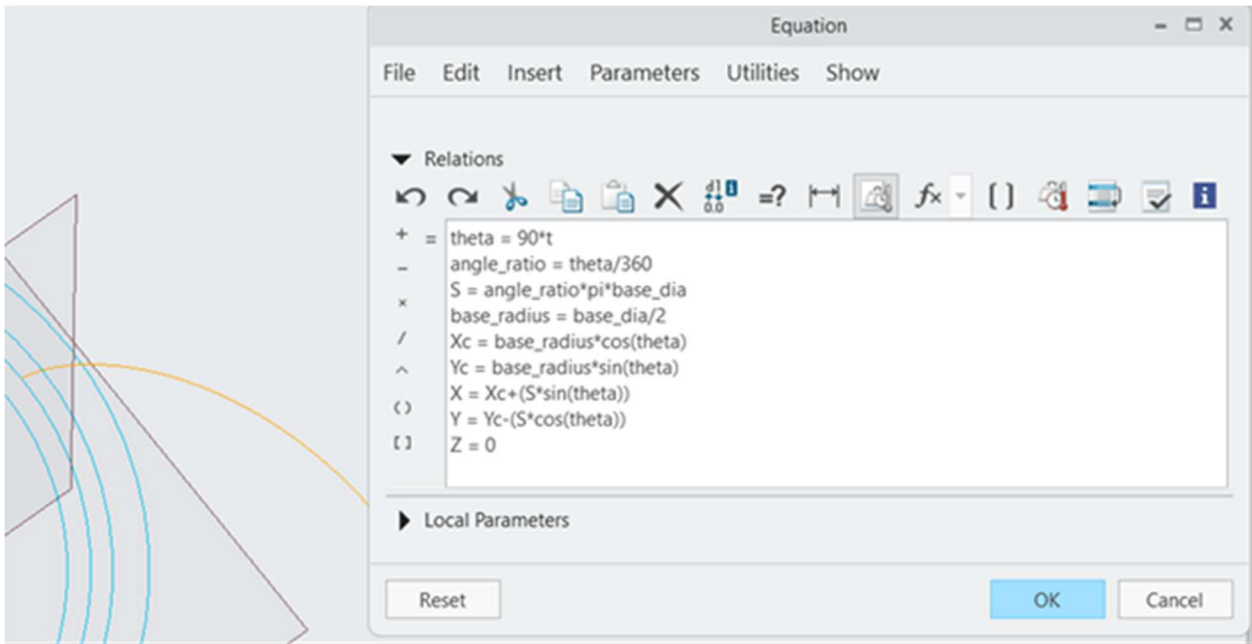


Рис. 2. Побудова евольвенти за допомогою параметричних рівнянь

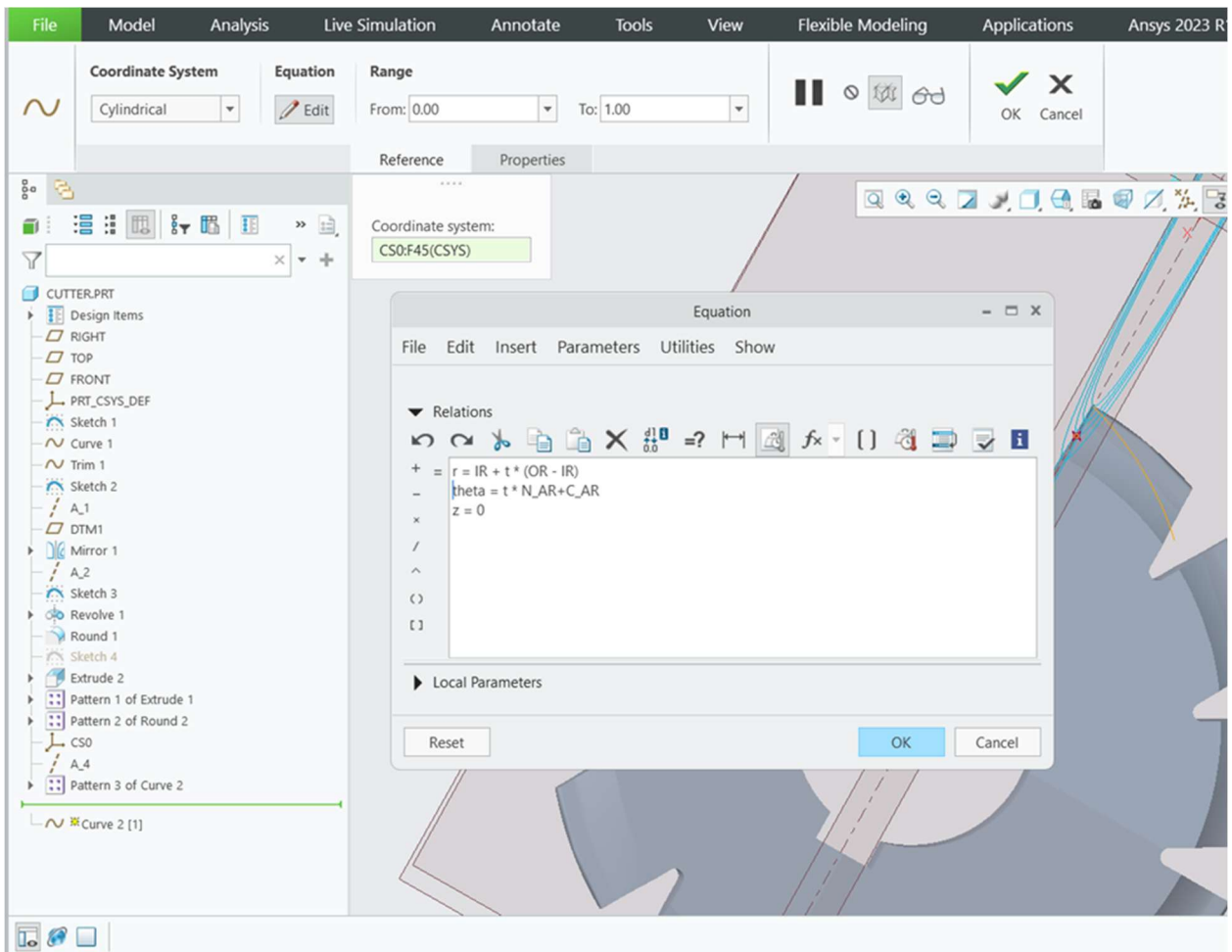


Рис. 3. Використання спірالی Архімеда для формування задньої поверхні зуба



Рис. 4. Тривимірний модель дискової зуборізної фрези

- Термоструктурний аналіз: оцінка впливу температурних деформацій на точність профілю.

Майбутнє параметричного моделювання пов'язане з інтеграцією штучного інтелекту (AI) та хмарних обчислень. AI може автоматизувати оптимізацію параметрів на основі історичних даних про стійкість інструменту, а хмарні платформи забезпечать спільну роботу команд у реальному часі [4]. Впровадження таких технологій дозволить створювати «розумні» цифрові двійники інструменту для моніторингу його стану в процесі експлуатації.

Висновки. Перехід від таблично-сплайнових методів до параметричного моделювання рівняннями в PTC Creo Parametric дозволяє підвищити точність профілю дискових фрез, усуваючи похибки інтерполяції та ручного введення даних.

Параметризація забезпечує виняткову гнучкість дизайну, дозволяючи проектувати як стандартні комплекти фрез, так і спеціальний інструмент під конкретне число зубів колеса за лічені хвилини.

Використання інструментів Family Table та інтеграція з CAE-системами створюють єдиний цифровий простір для проектування, розрахунку та підготовки виробництва, що відповідає концепції Індустрії 4.0.

Використання точних математичних рівнянь для побудови евольвенти та спіралі Архімеда гарантує коректність профілю інструменту.

Параметризація моделі через Parameters та Relations у поєднанні з Family Table дозволяє автоматизувати створення всього номенклатурного ряду фрез. Крім того, створена параметрична модель повністю готова до

передачі в CAE-системи (ANSYS) для проведення термоструктурного аналізу, що підвищує надійність проектування.

Література

1. Comprehensive Guide to Parametric Modeling. Ikarus3D. URL: <https://ikarus3d.com/comprehensive-guide-to-parametric-modeling> (дата звернення: 26.11.2025).
2. How to Master Parametric Design for Manufacturing in 2024. Scan2CAD. URL: <https://www.scan2cad.com> (дата звернення: 26.11.2025).
3. The Pros and Cons of Parametric Modeling. Concurrent Engineering. URL: <https://www.concurrent-engineering.co.uk> (дата звернення: 26.11.2025).
4. Revolutionizing Gear Technology: Innovations and Startups in 2024. StartUs Insights. URL: <https://www.startus-insights.com> (дата звернення: 26.11.2025).
5. In-depth Guide on Parametric Design for All Industries. Marketing Psycho. URL: <https://www.marketing-psycho.com/parametric-design> (дата звернення: 26.11.2025).
6. Кроль О. С., Шумакова Т. О., Соколов В. І. Проектування зуборізних інструментів з використанням системи КОМПАС : навч. посіб. Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2013. 144 с.
7. Романченко О. В., Боровик П. В. та ін. Методичні вказівки до практичного заняття за темою «Проектування дискових зуборізних фрез» з дисципліни «Різальний інструмент». Київ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2025. 35 с.
8. Романченко О. В., Логунов О. М. та ін. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи CAD, CAM, CAE». Частина I. Побудова тривимірної моделі валу в CAD-системі PTC Creo. Київ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2024. 24 с.
9. Романченко О. В., Логунов О. М. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи CAD, CAM, CAE». Частина II. Генерація креслень з тривимірної моделі валу в CAD-системі PTC Creo. Сєвєродонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2020. 20 с.
10. Creo Help Center. PTC. URL: <https://www.ptc.com/en/support/help/creo> (дата звернення: 26.11.2025).

References

1. Comprehensive Guide to Parametric Modeling. Ikarus3D. URL: <https://ikarus3d.com/comprehensive-guide-to-parametric-modeling> (date of access: 26.11.2025).
2. How to Master Parametric Design for Manufacturing in 2024. Scan2CAD. URL: <https://www.scan2cad.com> (date of access: 26.11.2025).
3. The Pros and Cons of Parametric Modeling. Concurrent Engineering. URL:

- <https://www.concurrent-engineering.co.uk> (date of access: 26.11.2025).
4. Revolutionizing Gear Technology: Innovations and Startups in 2024. StartUs Insights. URL: <https://www.startus-insights.com> (date of access: 26.11.2025).
 5. In-depth Guide on Parametric Design for All Industries. Marketing Psycho. URL: <https://www.marketing-psycho.com/parametric-design> (date of access: 26.11.2025).
 6. Krol O. S., Shumakova T. O., Sokolov V. I. Proektuvannia zuboriznykh instrumentiv z vykorystanniam systemy KOMPAS: navch. posib. Luhansk : V. Dahl EUNU Publ., 2013. 144 p.
 7. Romanchenko O. V., Borovik P. V. et al. Metodychni vkazivky do praktychnoho zaniattia za temoiu «Proektuvannia dyskovykh zuboriznykh frez». Kyiv : V. Dahl EUNU Publ., 2025. 35 p.
 8. Romanchenko O. V., Lohunov O. M. et al. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat z dystsyplyny «Osnovy CAD, CAM, CAE». Chastyna I. Kyiv : V. Dahl EUNU Publ., 2024. 24 p.
 9. Romanchenko O. V., Lohunov O. M. Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat z dystsyplyny «Osnovy CAD, CAM, CAE». Chastyna II. Sievierodonetsk : V. Dahl EUNU Publ., 2020. 20 p.
 10. Creo Help Center. PTC. URL: <https://www.ptc.com/en/support/help/creo> (date of access: 26.11.2025).

Lohunov O. Parametric modeling and integration with CAE systems in the design of disk gear cutters in PTC Creo Parametric environment

The article addresses the urgent problem of improving the efficiency of designing complex metal-cutting tools in the context of modern mechanical engineering. The object of the study is disk gear cutters designed for cutting spur gears using the copying method. Since these tools are standardized and manufactured in sets (typically comprising 8, 15, or 26 cutters per module depending on the required accuracy), they represent an ideal object for applying parametric design automation methods. The paper substantiates the transition from obsolete modeling methods, which used approximate spline constructions based on characteristic

points (characteristic of systems like APM WinMachine), to precise mathematical modeling in high-level CAD systems such as PTC Creo Parametric. The authors present a comprehensive methodology for creating a fully adaptive 3D model of a gear cutter. The core of the proposed approach is the use of the Parameters tool as a central control unit for variables (module, number of teeth, pressure angle) and the Relations tool to establish mathematical dependencies for calculating derived geometric characteristics (pitch, base, and root diameters). A significant part of the study is calculating and building the exact geometry of the cutting tooth. The article details the process of generating the involute profile using theoretical equations in Cartesian coordinates via the "Equation Driven Curve" feature, followed by mirroring the profile relative to the tooth symmetry plane. Furthermore, the specific geometry of the relief surface (backing off), which is necessary to ensure proper clearance angles during cutting, is modeled using the Archimedean spiral equation in cylindrical coordinates. Special attention is paid to design automation using the Family Table tool, which allows generating the entire nomenclature range of the cutter set from a single generic model without manual rebuilding. The article also covers the integration of the CAD model with the CAE system ANSYS for engineering analysis. It describes the sequence of static, dynamic (modal), and coupled thermal-structural analyses required to evaluate the tool's strength, vibration resistance, and thermal stability under operating loads. The result of the work is a verified technique that significantly reduces design time, minimizes errors, and prepares the model for complex strength calculations.

Key words: parametric modeling, disk gear cutter, PTC Creo Parametric, involute curve, Archimedean spiral, CAE analysis, Family Table.

Логунов О.М. – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, logunov@snu.edu.ua

Стаття подана 09.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-19-23>

УДК 532.529

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОСОПЛОВОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Фафлей О.Я., Михайлюк В.В., Витриховський Є.А.,
Дейнега Р.О., Витвицький В.С., Волошин Ю.Д.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A MULTI-STAGE DEVICE FOR COOLING INDUSTRIAL FACTORY FLUE GASES

Faflei O. Y., Mykhailiuk V. V., Vytrykhovskiy Y. A.,
Deineha R. O., Vytvytskyi V. S., Voloshyn Y. D.

У статті розглянуто проблему охолодження димових газів промислових підприємств як один із ключових напрямів підвищення енергоефективності та екологічної безпеки. Висока температура відхідних газів ускладнює роботу теплообмінного та газоочисного обладнання, сприяє збільшенню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Традиційні методи охолодження газу за допомогою, наприклад, теплообмінників, мають значні енергетичні витрати, проблеми корозійної стійкості та громіздкі конструкції, велику вартість, складність обслуговування. Одним із перспективних підходів до вирішення цієї проблеми є використання сопел Лавалю, що забезпечують адіабатне розширення потоку з перетворенням потенційної енергії газу в кінетичну, завдяки чому відбувається його інтенсивне охолодження. На основі аналізу публікацій, які стосуються охолодження газів визначено, що застосування сопел Лавалю ефективно не лише для зниження температури димових газів, а й для ініціювання конденсації вологи та відділення твердих і газоподібних домішок, зокрема вуглекислого газу і водяної пари. Для підтвердження працездатності підходу виконано імітаційне моделювання багатосоплового пристрою в середовищі SolidWorks FlowSimulation. Побудована тривимірніа модель багатосоплового пристрою враховує реальні параметри димових газів і показує ефективне зниження температури потоку із 120°C до 72°C при числах Маха 1,1–2,7. Для підвищення ефективності охолодження запропоновано вдосконалення конструкції багатосоплового пристрою шляхом використання зовнішнього охолодження сопел за допомогою води. Результати імітаційного моделювання вдосконаленої конструкції

багатосоплового пристрою засвідчили покращення тепловідведення, зменшення температурного градієнта стінок і зменшення температури газового потоку на виході до величини 18°C. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання багатосоплових систем із соплами Лавалю в технологічних лініях охолодження димових газів та відкривають перспективи подальшої оптимізації їх геометрії й інтеграції у промислові газоочисні системи.

Ключові слова: сопло Лавалю, охолодження димових газів, багатосопловий пристрій, імітаційне моделювання, надзвуковий потік, число Маха.

Вступ. Проблема охолодження та очищення димових газів промислових підприємств є одним із ключових завдань сучасної енергетики та екології. Висока температура відхідних газів знижує ефективність роботи систем утилізації тепла, ускладнює процеси уловлювання пилу, оксидів сірки та азоту, а також сприяє підвищенням викидам парникових газів у навколишнє середовище [1]. Традиційні методи охолодження димових газів – за допомогою теплообмінників чи систем зрошення – часто мають значні енергетичні витрати, вимагають великих габаритів обладнання та супроводжуються проблемами корозії.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності газоочисних технологій є застосування сопла Лавалю, яке дозволяє реалізувати адіабатичне розширення потоку та зниження температури газів без

додаткових витрат енергії [2]. При проходженні димових газів крізь сопло відбувається їх прискорення до надзвукових швидкостей, що супроводжується зменшенням температури внаслідок перетворення внутрішньої енергії на кінетичну. Такий підхід не лише сприяє охолодженню, але й створює умови для конденсації вологи та випадіння домішок, що відкриває можливість інтеграції процесу з системами уловлювання шкідливих компонентів.

Вивчення процесів охолодження димових газів у соплі Лавалю дозволить обґрунтувати доцільність його використання в промислових умовах, визначити оптимальні геометричні параметри сопла та дослідити вплив вхідних характеристик потоку на ефективність зниження температури. Це забезпечить розробку нових енергоефективних технологій для зниження негативного впливу промисловості на довкілля.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Сопло Лавалю застосовується для перетворення енергії газу в кінетичну: при переході через сопло газ розганяється до швидкості звуку, далі у розширювальній його частині – набуває надзвукових швидкостей, при цьому тиск і температура знижується. Цей ефект використовується для адиабатного охолодження газу, індукованої неквазістійкої конденсації і, у разі сумішей – для сепарації важчих компонентів (вода, рідкі вуглеводні, механічні частинки тощо).

У праці [3] виконано аналітичний аналіз стійкої ламінарної в'язкої течії в соплі Лавалю за умови охолодження його стінок. Основна увага приділена дослідженню характеристик потоку при великих значеннях числа Рейнольдса. Наведено відповідні рівняння та подано числові результати для типових параметрів у вигляді графічних залежностей. Встановлено, що інтенсивність охолоджуючого потоку, необхідного для підтримання сталої температури стінки, змінюється вздовж осі сопла.

У роботі [4] представлено результати дослідження технології надзвукової сепарації (3S-сепарації), призначеної для вилучення CO₂ з природного газу. Її зміст полягає у розширенні газового потоку в надзвуковому соплі Лавалю, де відбувається інтенсивне охолодження. Конденсація та поділ компонентів здійснюються безпосередньо в охолодженому потоці всередині сопла. У роботі також розглянуто різні технологічні схеми вилучення CO₂ та наведено

результати випробувань моделі 3S-сепаратора, які підтвердили високу ефективність процесу.

Враховуючи високі технічні характеристики надзвукового сепаратора для осушення природного газу, у роботі [5] запропоновано застосування процесу зрідження природного газу з використанням сопла Лавалю. Виконано теоретичні та чисельні дослідження надзвукової течії та процесу зрідження метаноетанової суміші в такому соплі. Проаналізовано вплив вхідних і вихідних параметрів (температури та тиску), а також складу газу на ефективність його зрідження.

Конструктивні параметри (діаметр, профіль тощо) визначають об'ємний витратний режим, інтенсивність охолодження та структуру течії, що критично для досягнення стабільного надзвукового режиму при змінних умовах димових газів.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання. Мета роботи полягає у дослідженні за допомогою імітаційного моделювання впливу зовнішнього охолодження багатосоплового пристрою на ефективність його роботи.

Для досягнення мети необхідно:

– побудувати тривимірну модель багатосоплового пристрою та провести імітаційне моделювання з врахуванням складу та температури димових газів, встановити газодинамічні характеристики пристрою;

– вдосконалити багатосопловий пристрій, провести імітаційне моделювання з граничними умовами, аналогічними базовому багатосопловому пристрою, встановити газодинамічні характеристики вдосконаленого пристрою та порівняти їх з базовим.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження багатосоплового пристрою побудовано його тривимірну модель (рис. 1) у програмі SolidWorks.

Побудована модель складається із таких основних елементів як сопло 1, перегородка 2, корпус 3.

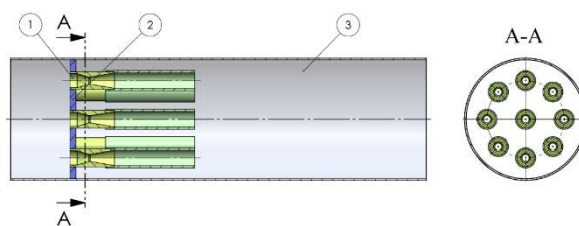


Рис. 1. Модель багатосоплового пристрою:
1 – сопло; 2 – перегородка; 3 – корпус

Геометричні параметри сопла Лавалю, що викривається у багатосопловому пристрої, були досліджені у роботі [6].

Граничними умовами при імітаційному моделюванні прийнято об'ємну витрату газової суміші величиною $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ на вході у багатосопловий пристрій, тиск величиною 121325 Па – на виході. Температура газової суміші на вході у багатосопловий пристрій складає $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Газорідина суміш виходить з багатосоплового пристрою в атмосферу. Задані величини тиску та витрати газової суміші обумовлені технологічною схемою сепарації газу на виробництві. Також під час імітаційного моделювання враховано склад газової суміші, оскільки вона складається з багатьох компонентів (азот – 28 %; вода – 11 %; вуглекислий газ – 22 %; кисень – 9 %; повітря – 30 %) [1].

На рисунку 2, а показано зміну швидкості по осі багатосоплового пристрою, на рисунку 2, б – числа Маха, на рисунку 2, в – температури.

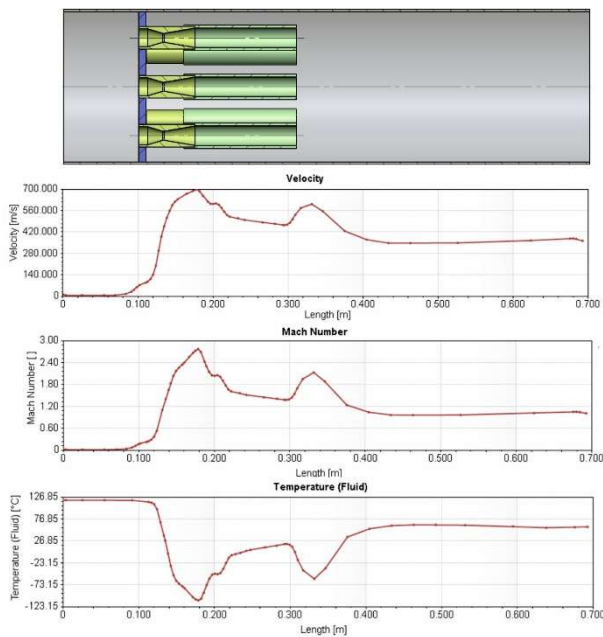


Рис. 2. Розподіли параметрів у поздовжньому перерізі багатосоплового пристрою: а – швидкість; б – число Маха; в – температура

Згідно результатів (рис. 2) впливає, що охолодження газової суміші проходить із 120°C до 72°C . При цьому спостерігається надзвукові швидкості руху газової суміші.

З метою підвищення ефективності багатосоплового пристрою пропонується охолоджувати сопла за допомогою води. Для цього проведено вдосконалення пристрою, а

саме встановлення додаткової перегородки 3 та двох патрубків (вхідного 2 та вихідного 5) (рис. 3).

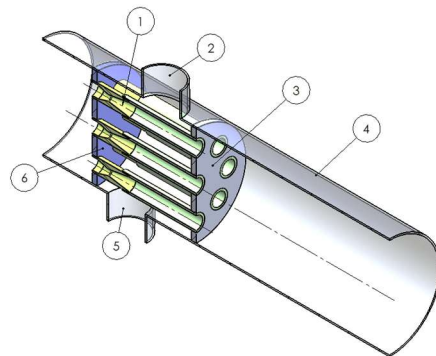


Рис. 3. Модель багатосоплового пристрою з охолодженням:
1 – сопло; 2 – патрубок вхідний (вода);
3, 6 – перегородка; 4 – корпус;
5 – патрубок вихідний (вода)

Імітаційне моделювання вдосконаленої конструкції багатосоплового пристрою проведено за аналогічних граничних умов, як і базової його конструкції.

Під час імітаційного моделювання задано витрату та температуру води для охолодження сопел Лавалю (витрата – $0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$, температура складає 20°C).

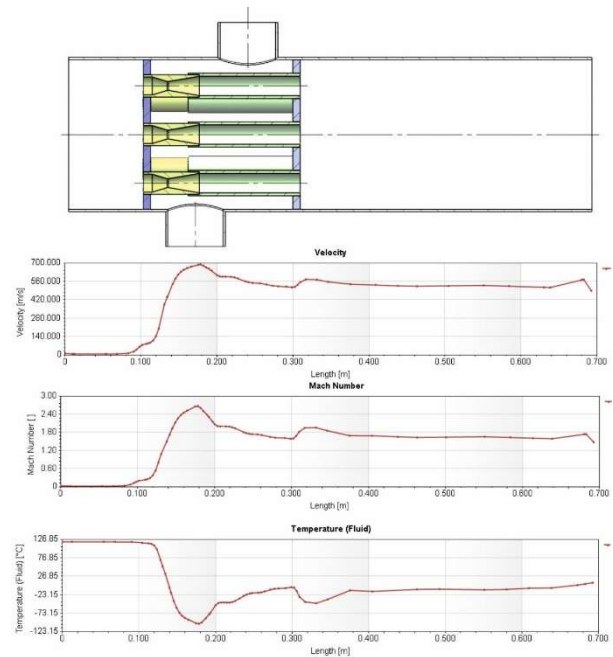


Рис. 4. Розподіли параметрів у поздовжньому перерізі вдосконаленого багатосоплового пристрою: а – швидкість; б – число Маха; в – температура

За результатами дослідження (рис. 4) вдосконаленої конструкції багатосоплового пристрою впливає, що охолодження газової суміші із застосуванням охолодження сопел водою відбувається з 120°C до 18°C. При цьому також спостерігаються надзвукові швидкості руху газової суміші.

В подальших дослідженнях доцільно оптимізувати параметри руху охолоджуючої рідини для охолодження багатосоплового пристрою, підвищити ефективність охолодження, наприклад, конструктивними способами.

Висновки. Побудовано тривимірну модель багатосоплового пристрою в програмному середовищі SolidWorks та виконано імітаційне моделювання процесу руху димових газів з урахуванням їх складу та температури. За результатами моделювання встановлено основні газодинамічні характеристики пристрою, зокрема розподіл швидкості, числа Маха та температури. При цьому підтверджено формування надзвукових режимів течії та зниження температури газової суміші з 120 °C до 72 °C.

Вдосконалено конструкцію багатосоплового пристрою із зовнішнім водяним охолодженням сопел. Для модернізованої конструкції проведено імітаційне моделювання за граничних умов, аналогічних базовому варіанту, що забезпечило коректність порівняння отриманих результатів. За результатами моделювання вдосконаленого пристрою встановлено його газодинамічні характеристики, а також доведено суттєве підвищення ефективності охолодження: температура газової суміші знижується з 120 °C до 18 °C при збереженні надзвукових швидкостей течії. Отримані результати підтверджують доцільність застосування зовнішнього охолодження сопел та перспективність подальшої оптимізації параметрів руху охолоджуючої рідини й конструктивних елементів пристрою.

Література

1. Плашихін С. В. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Цементна промисловість. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.
2. Михайлюк В. В., Крижанівський Є. І., Фафлей О. Я., Витвицький В. С., Дейнега Р. О. Удосконалення способу очищення димових газів підприємств переробки мінеральної сировини.

Мінеральні ресурси України. 2025. № 4. С. 54–58. DOI: 10.31996/mru.2025.4.54-58.

3. Gesellschaft fuer angewandte Mathematik und Mechanik. Wissenschaftliche Jahrestagung, Universitaet Karlsruhe, Федеративна Республіка Німеччина, 28–31 березня 1989 р. Zeitschrift fuer angewandte Mathematik und Mechanik. 1990. Bd. 70, Nr. 5. S. T413–T415. Нім.
4. Imaev S. Z., Bagirov L. A., Borisov V. E., Voytenkov E. V. New low temperature process of CO₂ recovery from natural gases. Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Adelaide, Australia, 2014. DOI: 10.2118/171427-MS.
5. Bian J., Cao X., Yang W., Ayivi M. E., Yin P., Jiang W. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle. Energy. 2018. Vol. 159. P. 706–715.
6. Лях М. М., Михайлюк В. В., Яцишин Т. М., Витриховський Є. А. Дослідження впливу геометричних параметрів сопла Лавалля на зміну температури потоку газу. Прикарпатський вісник наукового товариства імені Шевченка. Число. 2022. № 17(64). С. 108–117. DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117.

References

1. Plashykhin S. V. Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. Tsementna promyslovist. Kyiv: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva, 2020. 96 p.
2. Mykhailiuk V. V., Kryzhanivskiy Ye. I., Faflei O. Ya., Vytvytskyi V. S., Deineha R. O. Udoskonalennia sposobu ochyshchennia dymovykh haziv pidprijemstv pererobky mineralnoi syrovyny. Mineralni resursy Ukrainy. 2025. № 4. P. 54–58. DOI: 10.31996/mru.2025.4.54-58.
3. Gesellschaft fuer angewandte Mathematik und Mechanik. Wissenschaftliche Jahrestagung, Universitaet Karlsruhe, Федеративна Республіка Німеччина, 28–31 березня 1989 р. Zeitschrift fuer angewandte Mathematik und Mechanik. 1990. Bd. 70, Nr. 5. S. T413–T415. Нім.
4. Imaev S. Z., Bagirov L. A., Borisov V. E., Voytenkov E. V. New low temperature process of CO₂ recovery from natural gases. Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Adelaide, Australia, 2014. DOI: 10.2118/171427-MS.
5. Bian J., Cao X., Yang W., Ayivi M. E., Yin P., Jiang W. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle. Energy. 2018. Vol. 159. P. 706–715.
6. Liakh M. M., Mykhailiuk V. V., Yatsyshyn T. M., Vytrykhovskiy Ye. A. Doslidzhennia vplyvu heometrychnykh parametriv sopla Lavalia na zminu temperatury potoku hazu. Prykarpatskyi visnyk naukovohto tovarystva imeni Shevchenka. Chyslo. 2022. № 17(64). P. 108–117. DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-108-117.

Faflei O.Y., Mykhailiuk V.V., Vytrykhovskiy Y.A., Deineha R.O., Vytvytskyi V.S., Voloshyn Y.D. Improving the efficiency of a multi-stage device for cooling industrial factory flue gases

The article discusses the problem of cooling flue gases from industrial enterprises as one of the key areas for improving energy efficiency and environmental safety. The high temperature of waste gases complicates the operation of heat exchange and gas cleaning equipment and contributes to an increase in harmful emissions into the environment. Traditional methods of gas cooling, such as heat exchangers, have significant energy costs, corrosion resistance problems, bulky designs, high costs, and maintenance complexity. One promising approach to solving this problem is the use of Laval nozzles, which provide adiabatic expansion of the flow with the conversion of the potential energy of the gas into kinetic energy, resulting in its intensive cooling. Based on an analysis of publications related to gas cooling, it has been determined that the use of Laval nozzles is effective not only for reducing the temperature of flue gases, but also for initiating moisture condensation and separating solid and gaseous impurities, in particular carbon dioxide and water vapor. To confirm the feasibility of this approach, a simulation of a multi-nozzle device was performed in SolidWorks FlowSimulation. The constructed three-dimensional model of a multi-nozzle device takes into account the actual parameters of flue gases and shows an effective reduction in flow temperature from 120°C to 72°C at Mach numbers of 1.1–2.7. To improve cooling efficiency, it is proposed to improve the design of the multi-nozzle device by using external cooling of the nozzles with water. The results of simulation modeling of the improved design of the multi-nozzle device showed improved heat dissipation, a reduction in the temperature

gradient of the walls, and a reduction in the temperature of the gas flow at the outlet to 18°C. The studies confirm the feasibility of using multi-nozzle systems with Laval nozzles in flue gas cooling lines and open up prospects for further optimization of their geometry and integration into industrial gas cleaning systems.

Key words: *Laval nozzle, flue gas cooling, multi-nozzle device, simulation modeling, supersonic flow, Mach number.*

Фафлей Олег Ярославович – к. т. н, доцент кафедри будівництва, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Михайлюк Василь Володимирович – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Витриховський Євстахій Андрійович – аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Дейнега Руслан Олександрович – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Витвицький Василь Степанович – к. т. н, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Волошин Юрій Дмитрович – к. т. н, доцент кафедри буріння свердловин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Стаття подана 15.11.2025.

Стаття подана 23.12.2025

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-24-28>

УДК 621.745.55:629.1.01

RESEARCH INTO THE PATTERNS OF FORMATION OF THE STRUCTURE OF TOOL HIGH-SPEED STEELS DURING SURFACE ELECTRON BEAM TREATMENT

Shevchenko O.V., Zinchenko D.M.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ПОВЕРХНЕВІЙ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ

Шевченко О.В., Зінченко Д.М.

The objective of the research was to study the modes of electron beam hardening on the structure and properties of surface layers of tool high-speed steels. The limiting modes of electron beam hardening were determined experimentally, which allow obtaining the maximum microhardness of the hardened layer without melting the surface being treated. Based on the results of experimental studies, a comprehensive parameter of the treatment mode was proposed, according to which the intensity of heating and cooling of the surface layer of the tool can be determined - the power density of the beam. This parameter includes all other parameters of the hardening treatment mode: diameter, power, and speed of beam movement relative to the tool surface. It has been established that the maximum hardness of the hardened layer during electron beam treatment can be achieved by high-temperature hardening without melting the treated surface. Hardening without melting also ensures the formation of a highly dispersed structure throughout the entire depth of the hardened layer. Melting of the surface of a tool undergoing electron beam hardening should be considered an extremely undesirable processing option. In the case of melting of the surface layer in a tool made of high-speed steels, a significant decrease in microhardness is observed. At the same time, the surface layer contains a significant amount of residual austenite. Hardening with melting, in which a significant amount of residual austenite is formed, is the main reason for the sharp decrease in the content of carbide phases in the surface layer. Together, all this leads to a decrease in the wear resistance of tool high-speed steels. In the case of hardening with melting, there is also a deterioration in the tool's resistance to large plastic deformations at elevated temperatures in the cutting zone. It has been established that the depth of the hardened layer significantly depends on the initial structure of the steels.

The maximum depth of the hardened layer in tool high-speed steels can be obtained by their preliminary heat treatment in the form of volumetric hardening and tempering. Within the framework of the experimental studies, a range of optimal values of the overlap coefficient was established, which corresponds to the minimum values of the tempering zone width.

Key words: high-speed steels, heat treatment, martensite, carbides, austenite, microhardness.

Introduction. Over the last ten to fifteen years, electron beam strengthening of tool steels has become quite widely used in industry [1]. On the one hand, this is due to the fact that the intensity of electron beam heating, unlike laser beam heating, does not depend on the condition of the surface being treated, and on the other hand, significant achievements in the development and manufacture of equipment for electron beam treatment. In particular, as of today, installations for strengthening electron beam treatment without the use of high vacuum are being mass-produced. This allows such installations to be used for strengthening cutting tools even in mass production conditions. On the other hand, numerous problems related to the development of technological processes for surface strengthening remain unresolved. Modern software allows for fairly accurate calculation of temperature fields in products subjected to electron beam treatment, taking into account their configuration and heat exchange with the environment. However, when

modelling structural and phase transformations, significant problems arise due to the fact that these transformations occur at extremely high heating and cooling rates [2]. Therefore, as of today, the main method of studying the effect of electron beam treatment modes on the structure and properties of the materials being treated remains the experimental method.

One of the most important criteria for optimising the parameters of electron beam hardening treatment of cutting tools is the microhardness of the hardened layer. Reduced microhardness of the surface layer of the tool indicates either underheating or overheating of this layer during processing, which is clarified by microstructure analysis. The electron beam treatment mode is characterised by a fairly large number of parameters. However, analysis of works [3–5] shows that the main optimisation task in the development of electron beam treatment technology for cutting tools is to determine the electron beam power density at which maximum microhardness and maximum depth of the hardened layer are achieved.

According to [6, 7], high-alloy tool steels, in particular high-speed and stamping steels, are characterised by low diffusion mobility of carbon atoms. Therefore, with insufficient specific energy of the electron beam, the homogenisation of austenite may be incomplete. Under such conditions, the hardened layer will contain low-alloy martensite, which is characterised by relatively low microhardness and wear resistance. If the specific power of the electron beam is too high, especially if the surface layer melts, a large amount of (up to 80 vol. %) of residual austenite, which has low microhardness and poorly resists plastic deformations that occur during tool operation [7].

Thus, strengthening electron beam treatment of high-speed and high-alloy stamping steels should ensure the formation of a hardened layer containing high-alloy martensite and highly dispersed carbide phases. At the same time, it is extremely important to prevent excessive dissolution of carbide phases and, as a result, the formation of an excessive amount of residual austenite in the hardened layer.

The objective. The objective of the article is to determine the optimal modes of strengthening electron beam treatment of high-speed and stamping steels; the optimisation criteria are maximum microhardness and maximum depth of the layer hardened from the solid state.

Research problem. 1. To determine the optimal power density of the electron beam that

allows obtaining a hardened layer with maximum depth and microhardness.

2. To evaluate the influence of the initial structure of tool high-speed steels on the depth and microhardness of the hardened layer obtained by electron beam treatment.

Research methodology. The following tool steels were used in the research: P18, P6M5, P6M5K5, X12M. Before electron beam treatment, the steels were subjected to the following types of preliminary heat treatment: isothermal annealing [7]; quenching and high tempering [7].

Electron beam treatment was carried out on the “ELA-15” installation. Electron beam power: 1.2 kW, beam diameter: 2.5 mm, electron beam velocity (V): 4 - 12 mm/s. Thus, the change in the power density of the electron beam was varied by changing the velocity of the electron beam. Experimental studies were carried out on plate samples measuring 50 x 50 x 10 mm.

The microstructure of the hardened layer was determined using a MIM-8M optical microscope, and the microhardness of the hardened layer was measured on a PMT-3 microhardness tester.

Results of experimental studies and their analysis. The power density of the electron beam varied from $0.45 \cdot 10^4$ to $1.35 \cdot 10^4$ W/cm² due to changes in its relative velocity. Figure 1 shows the dependence of the maximum microhardness of the hardened layer on the power density of the electron beam. Microhardness was measured at a distance of 0.1 mm from the surface of the samples that was in direct contact with the electron beam. At the first stage of experimental research, the optimal power density of the electron beam was determined, which ensures the formation of a hardened layer with maximum microhardness.

In the case of electron beam processing of high-speed steel P6M5, the maximum microhardness (9200 MPa) corresponds to the electron beam power density (q) of $1.0 \cdot 10^4$ W/cm². At an electron beam power density of $0.45 \cdot 10^4$ W/cm², the maximum microhardness is 7800 MPa, and at $q = 0.75 \cdot 10^4$ W/cm², it is 8500 MPa. When the power density of the electron beam is increased to $1.35 \cdot 10^4$ W/cm², the maximum microhardness decreases to 8000 MPa (fig. 1). With a further increase in q, the surface of the samples melts, and the maximum microhardness of the surface layer decreases to 6900 MPa.

During laser treatment of P6M5K5 and P18 steels, the maximum microhardness values (9650 - 9820 MPa) are achieved at a laser radiation power density of $1.3 \cdot 10^4$ W/cm². At a radiation power

density of $0.4 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$, the microhardness is 8050 MPa, at a radiation power density of $0.9 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ – 8500 MPa, at a radiation power density of $1.1 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ – 8850 MPa (fig. 1). An increase in radiation power density above $1.4 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ is undesirable, since this results in the formation of a melted layer with a significant content of residual austenite and relatively low microhardness (up to 7200 MPa).

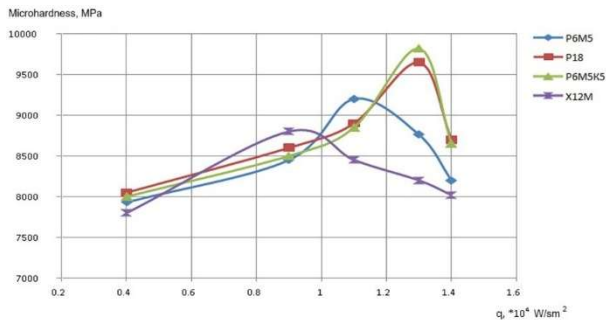


Fig. 1. The influence of electron beam power density on the maximum microhardness of the hardened layer: initial state of samples – hardening and high tempering according to typical modes [7]

The maximum microhardness of the hardened layer of X12M stamped steel (8900 MPa) corresponds to an electron beam power density of $0.8 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$. When the electron beam power density is increased to $1.0 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$, the maximum microhardness decreases to 8000 - 8150 MPa (fig. 1). If q is further increased, there is a sharp decrease in the maximum microhardness of the hardened layer to 6600 MPa due to surface melting.

The melting zone in all samples is characterised by a typical dendritic structure. Despite the high dispersion of this structure, its microhardness is 6700 - 7200 MPa, depending on the grade of tool steel. The melted layer is separated from the base metal by a narrow transition zone (figs. 2, 3).

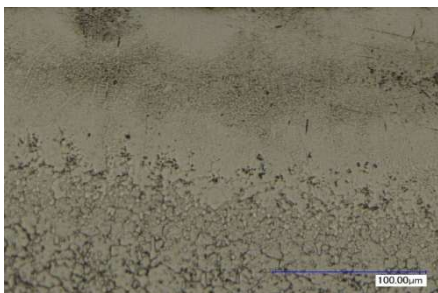


Fig. 2. Microstructure of the surface layer of P6M5K5 steel after electron beam treatment with melting: $q = 1.35 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ ($V = 11 \text{ mm/s}$); x600



Fig. 3. Microstructure of the surface layer of P18 steel after electron beam treatment with melting: $q = 1.35 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ ($V = 11 \text{ mm/s}$); x600

If electron beam treatment is performed without surface melting, the main structural components of the hardened layer are martensite and excess carbides; the residual austenite content is minimal (fig. 4).



Fig. 4. Microstructure of the surface layer of P6M5K5 steel after electron beam treatment: $q = 1.2 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ ($V = 11 \text{ mm/s}$); x600

The objective of the second stage of research was to determine the effect of preliminary heat treatment of steels on the depth of the hardened layer. Electron beam treatment was carried out at settings that ensure the formation of high-alloy martensite in the hardened layer and prevent surface melting. The graphs showing the distribution of microhardness across the depth of the hardened layer are presented in figs. 5 - 8. The maximum thickness of the hardened layer (0.55 - 0.65 mm) is achieved when the steel undergoes volume hardening and tempering prior to electron beam treatment [7]. The relatively large thickness of the hardened layer formed during electron beam treatment of steels that have been previously subjected to volume hardening and tempering is due to their low thermal conductivity after such preliminary treatment. The depth of the hardened layer on steel samples that underwent isothermal annealing prior to electron beam treatment is almost half that of samples that underwent volumetric hardening and tempering (figs. 5 - 8).

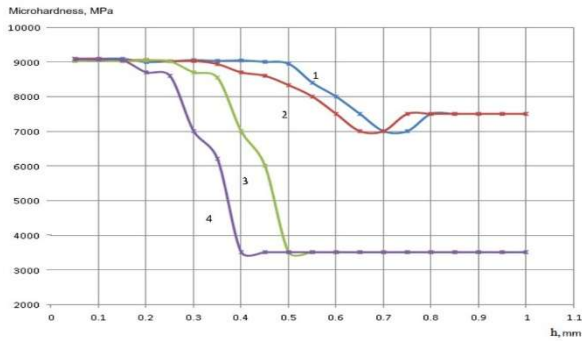


Fig. 5. The effect of preliminary heat treatment on the microhardness of the hardened layer of P6M5 steel: $q = 1.0 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$: 1 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 9 \text{ mm/s}$; 2 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 11 \text{ mm/s}$; 3 – isothermal annealing, $V = 9 \text{ mm/s}$; 4 - isothermal annealing, $V = 11 \text{ mm/s}$

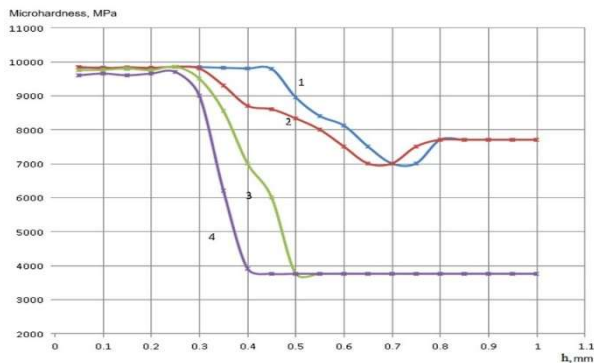


Fig. 6. The effect of preliminary heat treatment on the microhardness of the hardened layer of P6M5K5 steel: $q = 1.2 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$: 1 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 9 \text{ mm/s}$; 2 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 11 \text{ mm/s}$; 3 - isothermal annealing, $V = 9 \text{ mm/s}$; 4 - isothermal annealing, $V = 11 \text{ mm/s}$

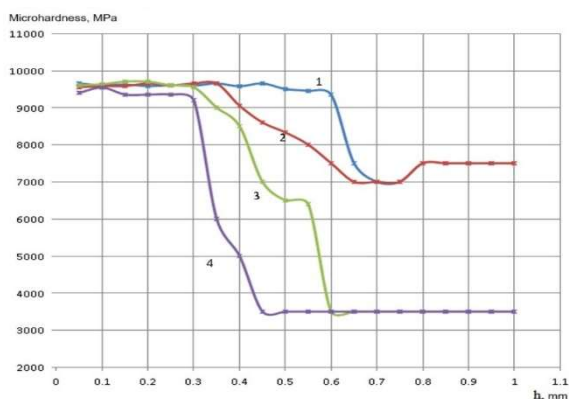


Fig. 7. The effect of preliminary heat treatment on the microhardness of the hardened layer of P18 steel: $q = 1.2 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$: 1 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 9 \text{ mm/s}$; 2 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 11 \text{ mm/s}$; 3 - isothermal annealing, $V = 9 \text{ mm/s}$; 4 - isothermal annealing, $V = 11 \text{ mm/s}$

Thus, in order to achieve the maximum depth of the hardened layer on high-speed and high-alloy stamping steels, these steels should be subjected to volumetric hardening and tempering under typical conditions before electron beam treatment.

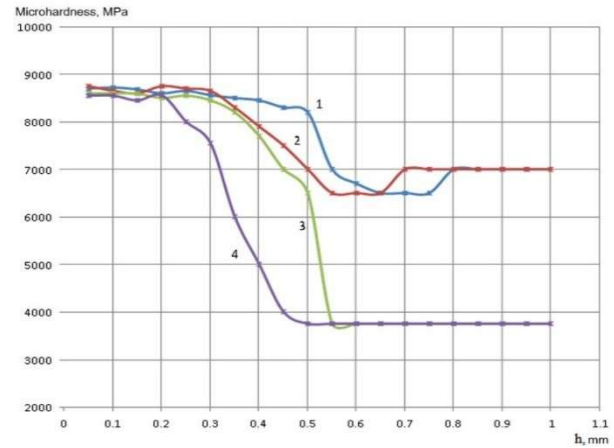


Fig. 8. The effect of preliminary heat treatment on the microhardness of the hardened layer of X12M steel: $q = 0.8 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$: 1 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 9 \text{ mm/s}$; 2 - hardening and tempering according to standard modes, $V = 11 \text{ mm/s}$; 3 - isothermal annealing, $V = 9 \text{ mm/s}$; 4 - isothermal annealing, $V = 11 \text{ mm/s}$

Conclusions. 1. Strengthening electron beam treatment of tools made of high-speed and high-alloy stamping steels must be carried out in a solid state in such a way as to obtain a structure in the strengthened layer consisting of high-alloy martensite and excess carbides; Melting of the tool surface is unacceptable, since in this case the hardened layer contains an excessive amount of residual austenite.

2. In order to achieve the maximum depth of the hardened layer on high-speed and high-alloy stamping steels, these steels should be subjected to volumetric hardening and tempering under typical conditions before electron beam treatment.

References

1. J-P. Dupon, M. Hanson. Promising methods for local surface treatment of high-speed steels // *International Journal of Mechanics*, 2021. № 14(2). P. 14 – 19.
2. D. Kornelli, N. Poulain. Modelling of heating and cooling processes during electron beam treatment of powder high-speed steels // *International Journal of Mechanics*, 2022. № 12(3). P. 20 – 26.
3. N. Kohan, D. MacNeil. Laser and electron beam technologies in modern tool manufacturing. – Berlin: Springer Nature, 2023. 309p.
4. J. Konan, K. Meir. Features of electron beam hardening treatment of tungsten-containing high-

- speed steels // International Journal of Mechanics, 2024. № 18(3). P. 62 – 68.
5. K. O'Malley, P. Crawford. Strengthening electron beam treatment of iron-carbon alloys. – New York: Academic Press, 2022. 268p.
 6. M. Simons, D. Kornelli. New technological processes for electron beam and laser hardening of high-speed steels. – New York: Academic Press, 2023. 217p.
 7. J. Konan, K. Meir. The influence of the overlap coefficient of strengthening tracks on the width of the tempering zone during electron beam treatment of stamped steels, 2023. № 20(3). P. 33 – 38.

Шевченко О.В., Зінченко Д.М. Дослідження закономірностей формування структури інструментальних швидкорізальних сталей при поверхневій електронно-променевої обробці.

Мета дослідження полягала у вивченні режимів електронно-променевого зміцнення на структуру та властивості поверхневих шарів інструментальних швидкорізальних сталей. Експериментальним шляхом було визначено граничні режими електронно-променевого зміцнення, які дозволяють отримати максимальну мікротвердість загартованого шару без оплавлення поверхні, що піддається обробці. За результатами експериментальних досліджень запропоновано комплексний параметр режиму обробки, за яким можна визначити інтенсивність нагрівання та охолодження поверхнього шару інструменту - цільність потужності променя. Цей параметр містить в собі всі інші параметри режиму зміцнювальної обробки: діаметр, потужність, швидкість переміщення променя відносно поверхні інструменту. Встановлено, що максимальної твердості зміцненого шару при електронно-променевої обробці можна досягнути при високотемпературному гартуванні без оплавлення оброблюваної поверхні. Зміцнювальна обробка без оплавлення також забезпечує формування високодисперсної структури по всій глибині зміцненого шару. Оплавлення поверхні інструменту, що піддається зміцнювальній електронно-

променевої обробці, слід розглядати як вкрай небажаний варіант обробки. У разі оплавлення поверхнього шару в інструменті із швидкорізальних сталей спостерігається суттєве зменшення мікротвердості. При цьому у поверхньому шарі міститься значна кількість залишкового аустеніту. Гартування із оплавленням, при якому утворюється значна кількість залишкового аустеніту, є основною причиною того, що в поверхньому шарі різко зменшується вміст карбідних фаз. Разом все це призводить до зменшення зносостійкості інструментальних швидкорізальних сталей. У разі гартування з оплавленням також спостерігається погіршення пружання інструменту великим пластичним деформаціям при підвищених температурах в зоні різання. Встановлено, що глибина зміцненого шару суттєвим чином залежить від вихідної структури сталей. Максимальну глибину зміцненого шару в інструментальних швидкорізальних сталях можна отримати у разі їхньої попередньої термічної обробки у вигляді об'ємного гартування та відпуску. В рамках проведених експериментальних досліджень було встановлено діапазон оптимальних значень коефіцієнта перекриття, яким відповідають мінімальні значення ширини зони відпуску.

Ключові слова: швидкорізальні сталі, термічна обробка, мартенсит, карбіди, аустеніт, мікротвердість.

Шевченко Олександр Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Київ), e-mail: shev19761976@gmail.com.

Зінченко Дмитро Миколайович – к.т.н., доц., доцент кафедри космічної інженерії інституту авіаційних технологій Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (м. Київ), e-mail: dmytro.m.zinchenko@gmail.com.

Стаття подана 19.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-29-32>

УДК 621.745.55:629.1.01

RESEARCH INTO THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE AND COERCIVE FORCE OF SPRING STEELS FOR THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELASTIC SUSPENSION ELEMENTS IN ELECTRIC LOCOMOTIVES

Shevchenko O.V., Zinchenko D.M.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ СТРУКТУРОЮ ТА КОЕРЦИТИВНОЮ СИЛОЮ ПРУЖИННИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ МЕТОДИКИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДВІСКИ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Шевченко О.В., Зінченко Д.М.

The research is devoted to studying the relationship between the following characteristics of structural steels used to manufacture suspension springs for freight electric locomotives: hardness, residual deformation and coercive force. The results of testing the elastic elements of electric locomotive suspension for residual deformation under static load have shown that their optimal structure is troostite, which is formed during medium tempering. It is the troostite structure formed during medium tempering of pre-hardened steel that allows obtaining the optimal ratio of elastic characteristics of electric locomotive suspension elastic elements during their operation under alternating loads. The results of experimental studies prove that standard methods of measuring coercive force can be used to control and evaluate the final structure and mechanical properties of the elastic elements of electric locomotive suspension. Given that the quality control of springs for hardness and residual deformation is almost 100%, this allows for a significant reduction in the time spent on control operations. The coercive force of spring steels depends solely on their structural state. If there is a decarburised layer on the surface of the springs, it has practically no effect on the coercive force if the thickness of this layer does not exceed the values established by the applicable regulatory and technical documents. Thus, a slight deviation of the coercive force of the elastic elements of electric locomotive suspension from the optimal values of coercive force established in this study may indicate an excessive thickness of the decarburised layer. The presence of surface cracks on the elastic elements of electric locomotive suspension has no effect on the coercive force. In this context, the nature and mechanisms of crack formation are also irrelevant. The results of the study show that the optimal coercive force

of the elastic elements of electric locomotive suspension, which corresponds to their optimal hardness, can only be determined on the basis of preliminary tests of the elastic elements of electric locomotive suspension for residual deformation. The latter parameter is the main operational characteristic of springs, which can be used to determine their suitability for use as elastic elements in electric locomotive suspension systems. The results of the research established a relationship between the structure and residual deformation under static load of elastic elements in electric locomotive suspension systems.

Key words: *springs, residual deformation, coercive force, hardness, troostite.*

Introduction. Magnetic structural analysis is one of the most advanced methods of non-destructive testing of structural materials in modern mechanical engineering [1, 2]. In particular, magnetic structural analysis can be extremely effective in controlling the quality of spring structures. As of today, the most common method of controlling the structure of springs is to measure their hardness. However, in mass production, given the geometry of spring coils, measuring hardness causes certain complications [3]. These complications can be easily overcome by replacing hardness measurement with coercive force measurement. It is known that for most structural steels there is a clear relationship between their hardness and coercive force [4]. This is the basis for the use of magnetic structural analysis for heat

treatment quality control [5]. An important factor here is that in order to determine the range of optimal coercive force values, it is necessary to know in advance the range of optimal hardness value.

Requirements for spring hardness largely depend on the conditions of their operation [6]. Even springs made of the same structural steel but designed for different operating conditions may have completely different hardness requirements. It is important to note that different hardness will be determined by different heat treatment modes and, consequently, different structures. According to [6], the main method of mechanical testing of springs is testing for residual deformation under load. All springs with excessively high or excessively low residual deformation under load are rejected. Based on this, it is advisable to establish a relationship between the hardness of springs and their residual deformation under load. This will allow us to clearly determine the range of optimal or acceptable values of spring hardness. After that, it will be possible to experimentally determine the range of optimal or acceptable values of the coercive force of springs. The availability of such data will make it possible to replace the procedure for measuring the hardness of springs and the procedure for testing springs for residual deformation with a much simpler and more convenient procedure for measuring the coercive force.

The objective. This research objective is to develop a procedure for controlling the quality of spring structures by measuring their coercive force, which should replace the procedure for measuring spring hardness and the procedure for testing springs for residual deformation under load.

Research problem. 1. To determine the relationship between spring stiffness and their residual deformation under load. To determine the range of optimal spring stiffness values.

2. To determine the relationship between spring stiffness and their structure in order to determine the optimal spring structure.

3. To determine the relationship between spring stiffness and their coercive force. Determine the range of optimal values for spring coercive force.

Research methodology. Residual deformation was determined on the springs 8TN 281.319 of the suspension of the 2EL5 electric locomotive in accordance with DSTU 1452-96 (fig. 1). The diameter of the spring coils is 42 mm, the material is 58CrV4 steel (EN 10060).

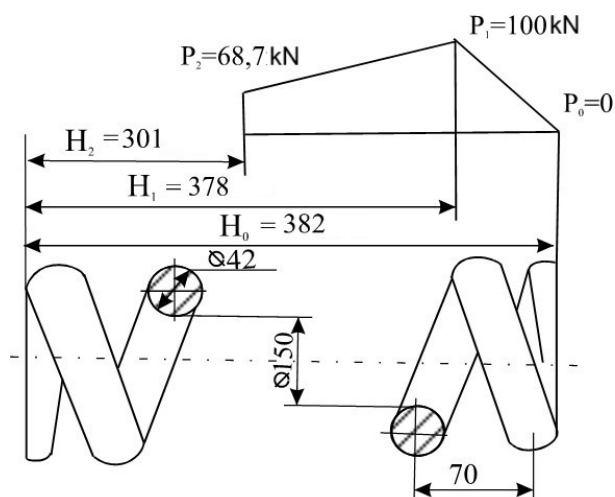


Fig. 1. Diagram of testing 8TN 281.319 springs for residual deformation under load

Residual deformation tests were performed on a P-125 hydraulic press. First, the spring is compressed twice under a load of 100 kN. After the load is completely removed, the height of the spring is measured. The height of the spring after the first test cycle should not change. Then the spring is compressed under a load of 68.7 kN and its height is measured in the loaded state.

A TK-type hardness tester was used to measure hardness, a MIM-8 optical microscope was used to determine the microstructure, and a KIMF-1 coercivity tester was used to measure coercive force.

Results of experimental studies and their analysis. Twenty springs were subjected to a residual deformation test. All springs were hardened in oil at a temperature of 860°C, followed by tempering at a temperature of 350-450°C. The absolute deviation of the actual residual deformation of the springs from the nominal value of this deformation (77 mm) should not exceed +7 mm and -5 mm. At the same time, no residual deformation of the springs is allowed after the load is completely removed. The residual deformation of springs Nos. 1, 6, 12, 15, 19 does not meet the regulatory indicators (table 1). Depending on the magnitude of the residual deformation under load, all springs that have failed the test can be divided into two separate groups. The first group includes springs whose residual deformation under load is less than the lower limit of 72 mm (springs Nos. 6, 19). The second group includes springs whose residual deformation under load is greater than the upper limit of 85 mm (springs Nos. 1, 12, 15).

Table 1

Results of experimental studies

No. of springs	Residual deformation (f), mm	Surface hardness / hardness in the core, HRC	Structure (tempering temperature)	Coercive force, A/cm (before/after removal of the decarburised layer)
1, 12, 15	86 - 88	36 - 38 / 35 - 37	Troostite and sorbite (450°C)	50 - 52 / 50 - 52
6, 19	68 - 71	48 - 50 / 47 - 49	Troostite and martensite (350°C)	68 - 70 / 68 - 70
The rest of the springs	74 - 83	42 - 44 / 41 - 43	Troostite (400°C)	58 - 60 / 58 - 60

Springs with increased residual deformation under static load have relatively low hardness, which corresponds to a troostite-sorbite structure. Springs with reduced residual deformation under static load are characterised by increased hardness, which is typical of a troostite-martensitic structure. Springs with normal residual deformation values have a hardness corresponding to a troostite structure. Thus, the optimal spring structure, at which the required residual deformation values of springs under static load are achieved, is troostite tempering with a hardness of 41-43 HRC. This structure corresponds to a coercive force of 58-60 A/cm.

In the second stage of the research, the influence of the decarburised layer on the coercive force was analysed. The decarburised layer is formed when the springs are heated during hardening. Its depth depends on the composition of the atmosphere in which the heating takes place. In this study, springs were used that were heated during hardening in air, without the use of any protective gas environment. Under such heating conditions, the maximum depth of the decarburised layer is usually observed, which, nevertheless, does not exceed the values regulated by the current standard (DSTU 1763-98). According to this standard, the depth of the decarburised layer should not exceed 2.5% of the diameter of the rolled product. Springs with a troostite and sorbite structure, in which excessive residual deformation under static load is observed, contain a decarburised layer with a depth of 0.4-0.5 mm (fig. 2). A decarburised layer of the same depth is found in springs with a troostite and martensite structure (fig. 3) and troostite structure. It is characteristic that in all cases, after removing the decarburised layer by grinding, the coercive force remains almost unchanged (table 1). Therefore, it can be reasonably

concluded that the presence of a decarburised layer on the surface of springs does not affect their coercive force, provided that the depth of the decarburised layer does not exceed the values specified by the current standard. This means that coercive force measurements can be taken immediately after the springs are released, before they are ground.

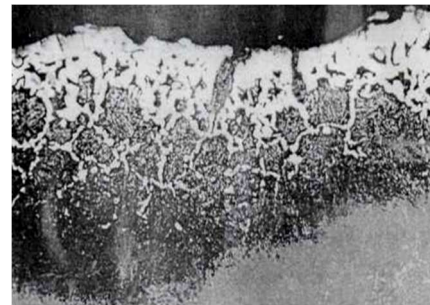


Fig. 2. Decarburised layer in springs with a troostite and sorbite structure, × 300

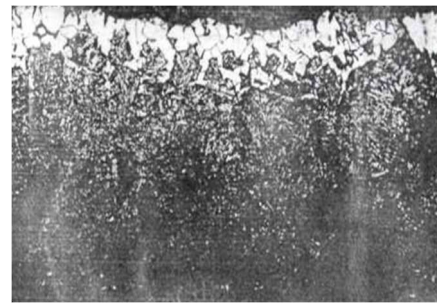


Fig. 3. Decarburised layer in springs with a troostite and martensite structure, × 300

Conclusions. 1. The optimal spring structure, at which the specified values of their residual deformation under static load are achieved, is a troostite with a hardness of 41 - 43 HRC.

2. A correlation between the hardness and coercive force of springs has been established. The optimal hardness of springs corresponds to a coercive force of 58 - 60 A/cm.

3. The presence of a decarburised layer does not affect the coercive force of springs if its depth exceeds the values established by the current standard.

References

1. D. Marshal. Advanced methods of non-destructive testing of construction materials. New York: Academic Press, 2022. 221p.
2. T. Norman, K. Frank. Magnetic structural and phase analysis of iron-carbon-chromium alloys. Berlin: Springer Nature, 2023. 243p.

3. F. Nevil, M. Abry. Modern methods of non-destructive testing of springs. *Columbus*: McGraw-Hill Higher Education, 2024. 254p.
4. P. Stone, B. Kantor. Determination of structurally sensitive characteristics of metals and alloys by magnetic structural analysis methods. Oxford: Pergamon Press, 2021. 203p.
5. S. Kamia, P. Konar, M. Dolorez. Non-destructive quality control of springs. New York: Academic Press, 2020. 209p.
6. G. Delacroix, R. Richard, P. Broyard. Mechanical testing of springs. Oxford: Pergamon Press, 2022. 229p.

Шевченко О.В., Зінченко Д.М. Дослідження взаємозв'язку між структурою та коерцитивною силою пружинних сталей для розробки методики неруйнівного контролю пружних елементів підвіски електровозів.

Дослідження присвячене вивченню взаємозв'язку між наступними характеристиками конструкційних сталей, з яких виготовляються пружини підвіски вантажних електровозів: твердість, залишкова деформація та коерцитивна сила. Результати випробувань пружних елементів підвіски електровозів на залишкову деформацію під статичним навантаженням дозволили встановити, що їхньою оптимальною структурою є троостит, що утворюється при середньому відпуску. Саме структура трооститу, що утворюється у процесі середнього відпуску попередньо загартованої сталі, дозволяє отримати оптимальне співвідношення пружних характеристик пружних елементів підвіски електровозів при їхній експлуатації в умовах знакозмінних навантажень. Результати експериментальних досліджень доводять, що для контролю та оцінки кінцевої структури та механічних властивостей пружних елементів підвіски електровозів можна використовувати стандартні методи вимірювання коерцитивної сили. З урахуванням того, що контроль якості пружин за твердістю та залишковою деформацією є майже стовідсотковим, це дозволяє суттєвим чином скоротити витрати часу на контрольні операції. Коерцитивна сила пружинних сталей залежить виключно від їхнього структурного стану. Якщо на поверхні пружин є наявним зневуглецьований шар, він

не чинить практично ніякого впливу на коерцитивну силу, якщо товщина цього шару не перевищує значень, встановлених діючими нормативно-технічними документами. Таким чином, незначне відхилення коерцитивної сили пружних елементів підвіски електровозів по відношенню до оптимальних значень коерцитивної сили, встановлених у цьому дослідженні, може свідчити про понаднормову товщину зневуглецьованого шару. Наявність поверхневих тріщин на пружних елементах підвіски електровозів не чинить жодного впливу на коерцитивну силу. В цьому контексті також не мають жодного значення природа та механізми утворення тріщин. З результатів дослідження витікає, що оптимальна коерцитивна сила пружних елементів підвіски електровозів, яка відповідає їхній оптимальній твердості, може бути визначена лише на основі попередніх випробувань пружних елементів підвіски електровозів на залишкову деформацію. Останній параметр представляє собою основну експлуатаційну характеристику пружин, за якою можна визначити можливість їхнього використання в якості пружних елементів підвіски електровозів. За результатами досліджень встановлено взаємозв'язок між структурою та залишковою деформацією під статичним навантаженням пружних елементів підвіски електровозів.

Ключові слова: пружини, залишкова деформація, коерцитивна сила, твердість, троостит.

Шевченко Олександр Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Київ), e-mail: shyv19761976@gmail.com.

Зінченко Дмитро Миколайович – к.т.н., доц., доцент кафедри космічної інженерії інституту авіаційних технологій Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (м. Київ), e-mail: dmytro.m.zinchenko@gmail.com.

Стаття подана 17.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-33-42>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ХВИЛЬОВОГО ПІДХОДУ

Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко Я.О., Азарян А.А., Грищенко А.М.

MODELING OF AUTOMATED CONTROL OF MINING PRODUCTION FACILITIES BASED ON THE WAVE APPROACH

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Azaryan A.A., Gritsenko A.M.

В процесі класифікації подрібненої руди за крупністю на грохоті тонкого вологого грохочення руди в його конструкції формуються різноманітні коливання, які поширюються у вигляді біжучих хвиль. Для опису і моделювання динамічної реакції об'єкту, в елементах якого розповсюджуються біжучі хвилі, його представлено у вигляді мультиагентної системи. Такий підхід базується на хвильовій передавальній функції, яка визначає взаємодії між агентами, параметри біжучих хвиль та описує поведінку системи з локальної точки зору окремих її елементів. Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що використаний підхід добре підходить для відображення загальної топології хвильових процесів у досліджуваній структурі та її загальної поведінки. Разом з тим, застосована модель включає основні вузлові точки конструкції грохота але не відображає хвильовий процес, що відбувається безпосередньо на ситовій поверхні. Вирішення цього завдання потребує використання великої кількості агентів із відповідним врахуванням їх взаємодії, що є досить складним при цьому підході. Розглянуто альтернативний підхід, заснований на застосуванні блоків фізичного моделювання на основі програмного комплексу Simscape® для Simulink® /MATLAB®. Ситове полотно представлено у вигляді структури з розподіленими параметрами, реалізованої для податливості конструкції на вертикальні коливання та вигин. Запропонована структура складається з елементарних блоків Mass-Spring-Damper, що з'єднуються між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів. Така структура забезпечує інерцію полотна, а системи пружинних демпферів забезпечують її податливість. Модель симулює динамічну реакцію системи, коливається у відповідь на прикладену силу і згинається у відповідь на статичний дисбаланс маси. Перевагою такого

підходу є можливість застосування будь якої кількості елементарних блоків Mass-Spring-Damper з можливістю формування із необхідною точністю розподілення як пружинних якостей полотна, так і маси рудного матеріалу на ньому. Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що запропонований підхід дозволяє визначати, формувати та досліджувати різноманітні режими руху рудного матеріалу під час грохочення для досягнення оптимальних технологічних та енергетичних показників процесу.

Ключові слова: руда, грохочення, енергоефективність, моделювання, керування, автоматизація, характеристики.

Вступ. Технологічні процеси гірничого виробництва пов'язані із використанням силових енергетичних впливів на продукти видобутку та переробки корисних копалин. Завдяки цьому відбувається руйнування гірської породи під час буріння свердловин, дроблення, подрібнення і класифікація руди в процесі її збагачення та ін. В свою чергу, силовий вплив, що формується технологічними агрегатами у вигляді ударів, коливань і вібрацій, призводить до генерації та розповсюдження пружинних поперечних і поперечних хвиль. Цей процес відбувається як у гірському масиві, кусковій рудній масі чи рудній пульпі, так і в елементах конструкції самих технологічних агрегатів, що з ними контактують.

У практиці гірничого виробництва класифікація подрібненої руди за крупністю має важливе значення для досягнення високої якості

продукту, який подається далі на металургійний переділ. Останнім часом велика увага приділяється вдосконаленню цієї технологічної операції шляхом використання грохотів тонкого вологого грохочення руди. Мотивовані потребою промисловості ефективно обробляти гранульовані матеріали та бажанням досягти фундаментальних успіхів у фізиці нерівноважних станів, експериментальні та теоретичні дослідження показали, що розділення за розмірами є складним явищем. Хоча співвідношення розмірів є домінуючим фактором, специфічні для частинок властивості, такі як густина, пружність та тертя, можуть відігравати важливу роль. Характер вхідної енергії, граничні умови та проміжне середовище також виявилися значними факторами у визначенні просторових розподілів. Для дослідження цих властивостей використовуються експериментальні методи, включаючи електромагнітні перетворення, пряму візуалізацію, магнітно-резонансну томографію та ін. Для дослідження розділення за розмірами були розроблені методи молекулярної динаміки та моделювання Монте-Карло. Аналітичні методи, такі як кінетична теорія, використовуються для вивчення взаємодії між розміром частинок і густиною у віброфлюїдизованому режимі, а для опису розділення за розмірами для глибоких шарів були запропоновані геометричні моделі [1].

У роботі [2] досліджується рух частинок та еволюцію внутрішньої мікроструктури в бінарних сумішах за вібраційних умов. Акцент робиться на розумінні як глобальних, так і локальних процесів сегрегації в часі, а також на з'ясуванні потенційних основних механізмів. Моделювання за допомогою методу дискретних елементів (МДЕ) доводить, що великі частинки мають тенденцію підніматися до поверхні контейнера, тоді як дрібні частинки агрегуються на дні, що призводить до відомого ефекту бразильського горіха. Зі збільшенням інтенсивності вібрації ступінь сегрегації стає більш вираженим. Вертикальна сегрегація передуює радіальній сегрегації та зрештою призводить до стабільного розділення бінарної суміші. Для всебічного аналізу поведінки сегрегації введено індекс сегрегації та виявлено кореляцію між вертикальною та радіальною сегрегацією. Ці результати підкреслюють потенційний вплив зовнішніх збурень на мікроструктуру гранульованих сумішей, що має значення для таких сценаріїв, як землетруси, селеві потоки та транспортні навантаження.

У роботі [3] представлено числове дослідження потоку частинок та поведінки просіювання на вібраційному грохоті. Потік частинок моделюється за допомогою методу дискретних елементів (МДЕ) у масштабі частинок. Модель МДЕ спочатку перевіряється на наявність відповідності між числовими та експериментальними результатами з точки зору розподілу відсотка проходження частинок різного розміру вздовж деки грохота. Потім вивчається вплив таких змінних, як кут нахилу, частота коливань та амплітуда, з особливим акцентом на загальну ефективність грохота та розподіл швидкостей проходження для частинок різного розміру. Показано, що продуктивність такого процесу просіювання пов'язана з потоком частинок на грохоті, таким як структура шару частинок, швидкості частинок та взаємодія частинка-частинка та частинка-дека.

Що стосується зовнішнього збудження, то в більшості попередніх досліджень для генерації тремтіння використовувалося синусоїдальне збудження, тоді як насправді все ще існують тремтіння в несинусоїдальному режимі. На сьогоднішній день, окрім таких окремих досліджень, було проведено мало систематичних досліджень взаємозв'язку між режимами струшування, які створюють несинусоїдальний рух, та явищем сегрегації. У роботі [4] еволюція сегрегації за різних режимів вібрації простежується та аналізується, при цьому сегрегація характеризується новим графічним індексом сегрегації, що має як фізичне, так і геометричне значення.

Динамічну поведінку конструкції технологічних агрегатів можна оцінити з точки зору параметрів хвиль, що поширюються через її елементи [5]. Цей підхід широко відомий як метод біжучої хвилі (МБХ). Поширення зовнішнього збудження всередині елементів конструкції та поведінка хвиль на розриві визначаються амплітудою хвиль зміщення, а також коефіцієнтами відбиття та пропускання хвиль. Сукупність цих властивостей забезпечує стислий метод оцінки динамічної реакції конструкції. У роботі [5] показано, що МБХ вимагає менше обчислювального часу, ніж метод дискретних елементів МДЕ, може безпосередньо враховувати частотно-залежні ефекти взаємодії елементів конструкції в аналізі та дає точніші результати на високих частотах.

Метою цієї статті є формулювання та обґрунтування теоретичної основи використання підходу поширення біжучих

хвиль для аналізу динаміки та керування процесом тонкого вологого грохочення руди.

Викладання основного матеріалу. В процесі класифікації подрібненої руди за крупністю на грохоті тонкого вологого грохочення руди в його конструкції формуються різноманітні коливання, які поширюються у вигляді біжучих хвиль (рис. 1).

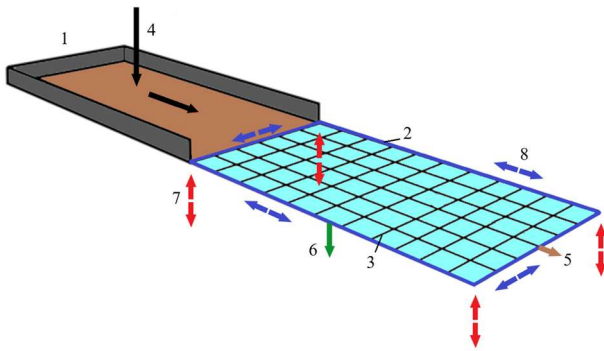


Рис. 1. Розповсюдження пружних хвиль по конструкції грохота тонкого вологого грохочення руди: 1 – рудний живильник; 2 – рама грохота; 3 – полотно сита; 4 – вхідний рудний матеріал; 5 – надрешітний продукт грохочення; 6 – підрешітний продукт грохочення; 7 – вертикальні вібрації рами грохота; 8 – пружні хвилі у рамі грохота

Біжуча хвиля в середовищі – це збурення середовища, яке поширюється через нього в певному напрямку та з певною швидкістю. Під «збуренням» мається на увазі зміщення частинок, що складають середовище, від їхнього положення спокою або рівноваги. Ідея підходу полягає в тому, щоб розглядати кожен частину пружного середовища як потенційний осцилятор, який взаємодіє з сусідніми частинами, штовхаючи або тягнучи їх. Коли біжуча хвиля досягає певного місця в середовищі, вона приводить цю частину середовища в рух, надаючи їй певну енергію та імпульс, які вона потім передає сусідній частині, і так далі по лінії [6-8].

Математичний вираз біжучої хвилі можна отримати із загального диференціального рівняння в частинних похідних

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f\left(u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t}, \dots\right), \quad (1)$$

Це рівняння можна проаналізувати шляхом заміни змінних

$$u(x, t) = U(\xi), \quad (2)$$

де $\xi = \xi(x, t) =$ функція, яку потрібно визначити.

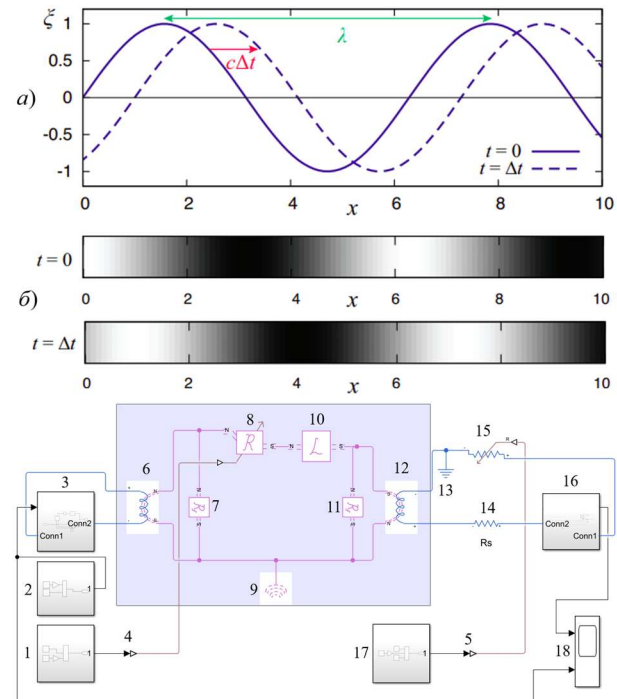


Рис. 2. Процес розповсюдження поперечних (а) та повздовжніх (б) хвиль у середовищі (нормалізовані значення амплітуди): ξ – амплітуда; x – переміщення; t – час; c – швидкість

Тоді, рівняння (1) можна записати як [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} \\ &= f\left(U, \frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}\right), \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}\right), \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}\right)\right], \dots\right) = \\ &= f\left(U, \frac{dU}{d\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \frac{d^2 U}{d\xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)^2, \frac{d^2 U}{d\xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \frac{\partial \xi}{\partial t}, \frac{d^2 U}{d\xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right), \dots\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Біжуча хвиля є лінійним випадком рівняння (3) для якого частинні похідні мають вигляд

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -kc, \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = k, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial t} = \dots = 0,$$

відповідно

$$\xi(x, t) = k(x - ct), \quad (4)$$

де k - хвильове число; c – швидкість хвилі.

Цей випадок визначають як біжучу хвилю, оскільки він відповідає лінійному переміщенню вздовж осі x відносно t . Для цього випадку рівняння (3) зводиться до

$$(-kc) \frac{dU}{d\xi} = f \left(U, k \frac{dU}{d\xi}, k^2 \frac{d^2U}{d\xi^2}, -k^2 c \frac{d^2U}{d\xi^2}, -k^3 c \frac{d^3U}{d\xi^3}, \dots \right) \quad (5)$$

або в канонічній формі

$$\frac{dU}{d\xi} = f \left(U, \frac{dU}{d\xi}, \frac{d^2U}{d\xi^2}, \frac{d^3U}{d\xi^3}, \dots \right), \quad (6)$$

де константи c та k входять до f .

Коли хвиля поширюється через середовище, його частинки, або елементи маси, коливаються навколо положення рівноваги. Із врахуванням фази ϕ швидкість коливань визначається виразом [8]

$$v_y(x, t) = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [A \sin(kx - ct + \phi)] = -A \omega \cos(kx - ct + \phi) = -v_{y \max} \cos(kx - ct + \phi), \quad (7)$$

Швидкість частинок середовища не є постійною, що означає наявність прискорення

$$\begin{aligned} a_y(x, t) &= \frac{\partial v_y(x, t)}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} [-A \omega \cos(kx - ct + \phi)] \\ &= -A \omega^2 \sin(kx - ct + \phi) = \\ &= -a_{v \max} \sin(kx - ct + \phi). \end{aligned} \quad (8)$$

Важливими елементами хвильового підходу для оцінки динамічного стану об'єкту є визначення характеристичних ознак процесу поширення хвилі. До таких ознак можна віднести частинні похідні відносно координати x . Перша похідна – це нахил хвилі в точці x у момент часу t [8]

$$\text{slope} = \frac{\partial \xi(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [A \sin(kx - ct + \phi)] = A k \cos(kx - ct + \phi). \quad (9)$$

Друга частинна похідна виражає як змінюється нахил або кривизна хвилі залежно від положення

$$\text{curvature} = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} [A \sin(kx - ct + \phi)] = -A k^2 \sin(kx - ct + \phi). \quad (10)$$

Загалом, за зазначених умов хвильовий процес описується лінійним хвильовим

рівнянням, яке визначається співвідношенням прискорення та кривизни

$$\frac{\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}}{\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial x^2}} = \frac{-A c^2 \sin(kx - ct + \phi)}{-A k^2 \sin(kx - ct + \phi)} = \frac{c^2}{k^2} = v^2, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\xi x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi(x, t)}{\partial t^2}. \quad (12)$$

Хвиля є носієм енергії. Повна усереднена за часом густина енергії в області середовища, зайнятій хвилею, визначається як [6]

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{2} \rho_0 \omega^2 \xi_0^2. \quad (13)$$

де V - об'єм середовища; ρ_0 - щільність середовища.

У разі застосування хвильового імпульсу p енергетичне співвідношення має вигляд

$$\frac{E}{V} = \frac{cp}{V}. \quad (14)$$

Якщо хвиля поширюється зі швидкістю c , тоді потік енергії дорівнює $\frac{E}{V} c$. Цей параметр визначає інтенсивність хвилі [6]

$$I = \frac{1}{2} c \rho_0 \omega^2 \xi_0^2 = \frac{1}{2} Z \omega^2 \xi_0^2, \quad (15)$$

де Z - акустичний імпеданс середовища.

$$Z = c \rho_0. \quad (16)$$

Для опису і моделювання динамічної реакції об'єкту, в елементах якого розповсюджуються біжучі хвилі, зручно представити його у вигляді мультиагентної системи [9]. Цей підхід заснований на використанні хвильових передавальних функцій та описує біжучі хвилі за допомогою графу шляхів [10, 11].

Поведінка n -го агента в мультиагентній системі описується як [9-11]

$$X_n(s) = P(s)U_n(s), \quad (17)$$

де s - змінна Лапласа; $X_n(s)$ - вихідний сигнал агента, наприклад, положення; $P(s)$ - передавальна функція агента, тобто модель динаміки агента; $U_n(s)$ - вхідний сигнал агента, який передається локальним контролером агента з метою вирівнювання $X_n(s)$ з вихідними сигналами сусідніх агентів.

У разі наявності довільної кількості сусідів у агента

$$U_n(s) = C(s) \sum_{k \in N_b} (X_k(s) - X_n(s)), \quad (18)$$

де N_b - набір сусідніх агентів n -го агента; $C(s)$ - передавальна функція контролера.

Модель агента тоді має вигляд

$$X_n(s) = M(s) \sum_{k \in N_b} (X_k(s) - X_n(s)), \quad (19)$$

де $M(s) = P(s)C(s)$.

Також (19) можна виразити як

$$X_n(s) = T_N(s) \sum_{k \in N_b} (X_k(s)), \quad (20)$$

де $T_N(s) = M(s)/(1 + NM(s))$; N - кількість сусідів n -го агента.

Ідея підходу хвильової передавальної функції для багатоагентної системи з топологією графа шляхів полягає в тому, що вихід кожного агента, наприклад, позиція, визначається двома компонентами $W_{n,n+1}^d$ та $W_{n+1,n}^a$, що представляють дві хвилі, які поширюються в прямому та зворотному напрямках відповідно [10]. Перший нижній індекс є індексом агента, з якого відходить хвиля, а другий нижній індекс є індексом агента, до якого прибуває хвиля. Верхній індекс позначає, чи хвиля є агентом, що її відправляє (d), чи з агентом, до якого вона прибуває (a). У разі застосування простої лінійної топології (сусідами агента n є агенти $n - 1$ та $n + 1$) має місце такий зв'язок [9]

$$X_n(s) = W_{n,n+1}^d(s) + W_{n+1,n}^a(s) = W_{n-1,n}^a(s) + W_{n,n-1}^d(s), \quad (21)$$

Спосіб поширення хвилі описується ірраціональною передавальною хвильовою функцією (ПХФ), що визначається як [9,10]

$$G(s) = \frac{X_{n+1}(s)}{X_n(s)} = \frac{1}{2} \alpha(s) - \frac{1}{2} \sqrt{\alpha^2(s) - 4}, \quad N \rightarrow \infty \quad (22)$$

де $\alpha(s) = 1/M(s) + 2 G^{-1}(s) = 1/G(s)$.

Із врахуванням (21) та (22)

$$W_{n,n+1}^a(s) = G(s)W_{n,n+1}^d(s), \quad (23)$$

$$W_{n+1,n}^a(s) = G(s)W_{n+1,n}^d(s), \quad (24)$$

Якщо існує хвиля, що поширюється до агента з більш ніж двома сусідами, то вона частково відбивається від цього агента і частково передається далі. Передавальна функція $T_{t,N}(s)$ описує, як хвиля проходить через агент з N сусідами, та передавальна функція $T_{r,N}(s)$ описує, як хвиля відбивається від агента з N сусідами [10]

$$T_{t,N}(s) = \frac{W_{n,n-1}^d(s)}{W_{n+1,n}^a(s)} = \frac{T_N(s)(1-G^2(s))}{G(s)(1-NT_N(s)G(s))}, \quad N \geq 2 \quad (25)$$

$$T_{r,N}(s) = \frac{W_{n,n-1}^d(s)}{W_{n-1,n}^a(s)} = \frac{(N-1)T_N(s)G^2(s) + T_N(s) - G(s)}{G(s)(1-NT_N(s)G(s))}, \quad N \geq 1, \quad (26)$$

де $n - 1$ та $n + 1$ -й є сусідніми агентами n -го агента.

Зазначений підхід використаний для формування динамічної моделі грохота тонкого вологого грохочення руди та опису топології взаємодії його елементів. На рис. 3 наведена схема моделі на основі мультиагентної структури з топологією графа шляхів.

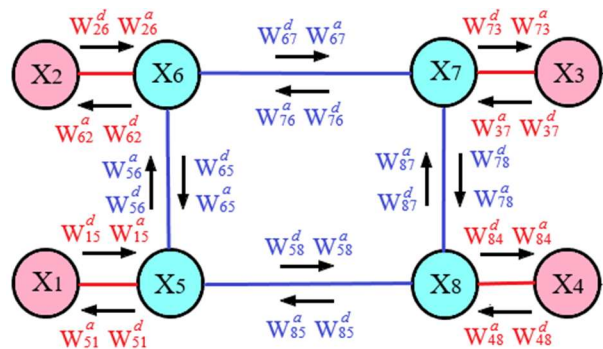


Рис. 3. Схема моделі грохота тонкого вологого грохочення руди на основі мультиагентної структури з топологією графа шляхів

Наведені на рис. 3 агенти X_n можуть бути активними чи пасивними та описуються локальною динамікою $G(s)$. Розповсюдження біжучих хвиль у системі відповідає виразам (21-24).

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що використаний підхід добре підходить для відображення загальної топології хвильових процесів у досліджуваній структурі та її загальної поведінки. Разом з тим, представлена на рис. 3 модель включає основні вузлові точки конструкції грохота але не

відображає хвильовий процес, що відбувається безпосередньо на ситовій поверхні. Вирішення цього завдання потребувало би використання великої кількості агентів із відповідним врахуванням їх взаємодії, що є досить складним при цьому підході [9]. Далі розглянутий альтернативний підхід, заснований на застосуванні блоків фізичного моделювання на основі програмного комплексу Simscape® для Simulink® /MATLAB® [12].

Ситове полотно представлено у вигляді структури з розподіленими параметрами, подібно до блоку Flexible Shaft із бібліотеки Simscape / Driveline / Couplings & Drives [12,13], але реалізованої для податливості конструкції на вертикальні коливання та вигин. Запропонована структура складається з n елементарних блоків Mass-Spring-Damper, що з'єднуються між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів (рис. 4).

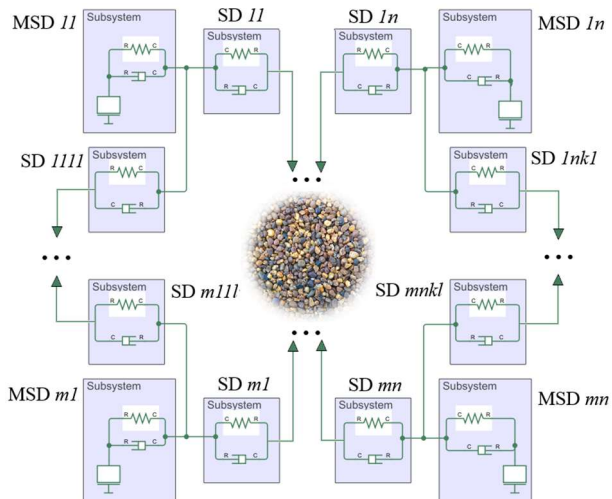


Рис. 4. Схема моделі ситового полотна у вигляді структури з розподіленими параметрами на основі елементарних блоків Mass-Spring-Damper

Зазначена структура забезпечує інерцію полотна, а системи пружинних демпферів забезпечують її податливість. Модель симулює динамічну реакцію системи, коливається у відповідь на прикладену силу і згинається у відповідь на статичний дисбаланс маси. Перевагою такого підходу є можливість застосування будь якої кількості елементарних блоків Mass-Spring-Damper з можливістю формування із необхідною точністю розподілення як пружних якостей полотна, так і маси рудного матеріалу на ньому.

На рис. 5 наведена схема моделі загальної структури автоматизованого керування грохотом тонкого вологого грохочення руди на

основі хвильового підходу із застосуванням блоків програмного комплексу Simscape® для Simulink® /MATLAB® [12].

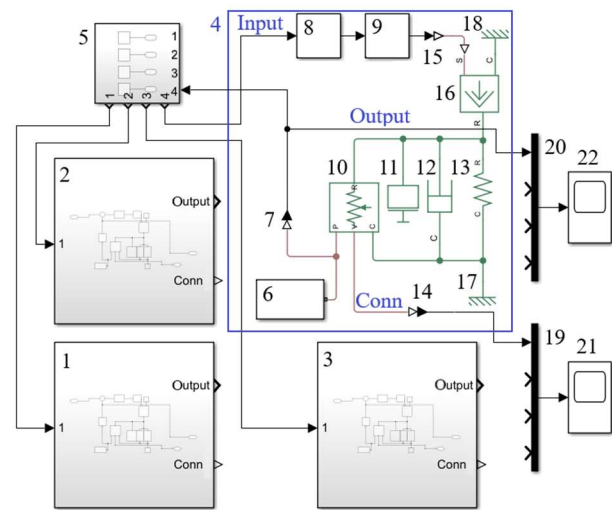


Рис. 5. Схема моделі загальної структури автоматизованого керування грохотом тонкого вологого грохочення руди на основі хвильового підходу

У наведеній на рис. 5 моделі використані наступні елементи: 1-5 – блоки Subsystem 1-5; 6 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 7,14 – блоки PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 8 – формувач сигналу запуску ЕМП; 9 – блок ЕМП; 10 - блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sensors; 11- блок Mass із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 12 - Translational Damper із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 13 - блок Translational Spring із бібліотеки Simscape / Mechanical Translational Elements; 15 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 16 – блок Ideal Force Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Mechanical Sources; 17,18 – блок Mechanical Translational Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Mechanical / Translational Elements; 19,20 - блоки Mux із бібліотек Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Signal Routing; 21,22 - блоки Scope із бібліотек Scope Simulink / Commonly Used Blocks, Simulink / Sinks.

Блоки Subsystem 1-4 відображають структуру системи із можливістю формування активних силових впливів у чотирьох точках (кутах) рами грохота. Ситове полотно умовно

відображено кількома елементарними блоками Mass-Spring-Damper.

Блок Subsystem 5 застосовується для формування керуючих впливів в системі із врахуванням сигналів Input та Output с кожного блоку Subsystem 1-4.

У якості формувача силових впливів використаний електромагнітний перетворювач ЕМП [14], параметри якого задаються блоком ЕМП.

Блок Ideal Force Source являє собою ідеальне джерело механічної енергії, яке генерує силу, пропорційну вхідному фізичному сигналу. Джерело є ідеальним у тому сенсі, що воно достатньо потужне, щоб підтримувати задану силу на своєму виході незалежно від швидкості на терміналах джерела.

Блок Ideal Translational Motion Sensor являє собою пристрій, який перетворює змінну, виміряну між двома вузлами механічного поступального руху, на керуючий сигнал, пропорційний прискоренню, швидкості або положенню. Датчик є ідеальним, оскільки він не враховує інерцію, тертя, затримки, споживання енергії тощо. Термінали A, V (на рис. 5 не показаний) та P – це порти виведення фізичних сигналів, що відповідають прискоренню, швидкості та положенню відповідно.

На рис. 6, у якості прикладу моделювання, наведено сигнал, що відповідає хвильовому процесу у двох точках ситового полотна грохота, що утворюється від прикладення періодичного силового впливу з частотою 100 Гц, 20 Гц, 10 Гц та 2 Гц до одного із кутів рами грохота.

Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що запропонований підхід дозволяє визначати, формувати та досліджувати різноманітні режими руху рудного матеріалу під час грохочення для досягнення оптимальних технологічних та енергетичних показників процесу [15]. Хвильові процеси, наведені на рис. 6, сформовані із застосуванням силового впливу, прикладеного лише в одній з можливих точок моделі. У якості регульованих параметрів також можуть бути застосовані амплітуда, частота, ширина силових імпульсів, та їх фазовий зсув у разі застосування декількох джерел генерації. З урахуванням частотного перетворення хвильових процесів, що слідує з рис. 6, для ідентифікації сформованих робочих режимів грохота доцільно використовувати результати спектрального аналізу виміряних сигналів. Зазначені особливості дають підстави вважати перспективним використання

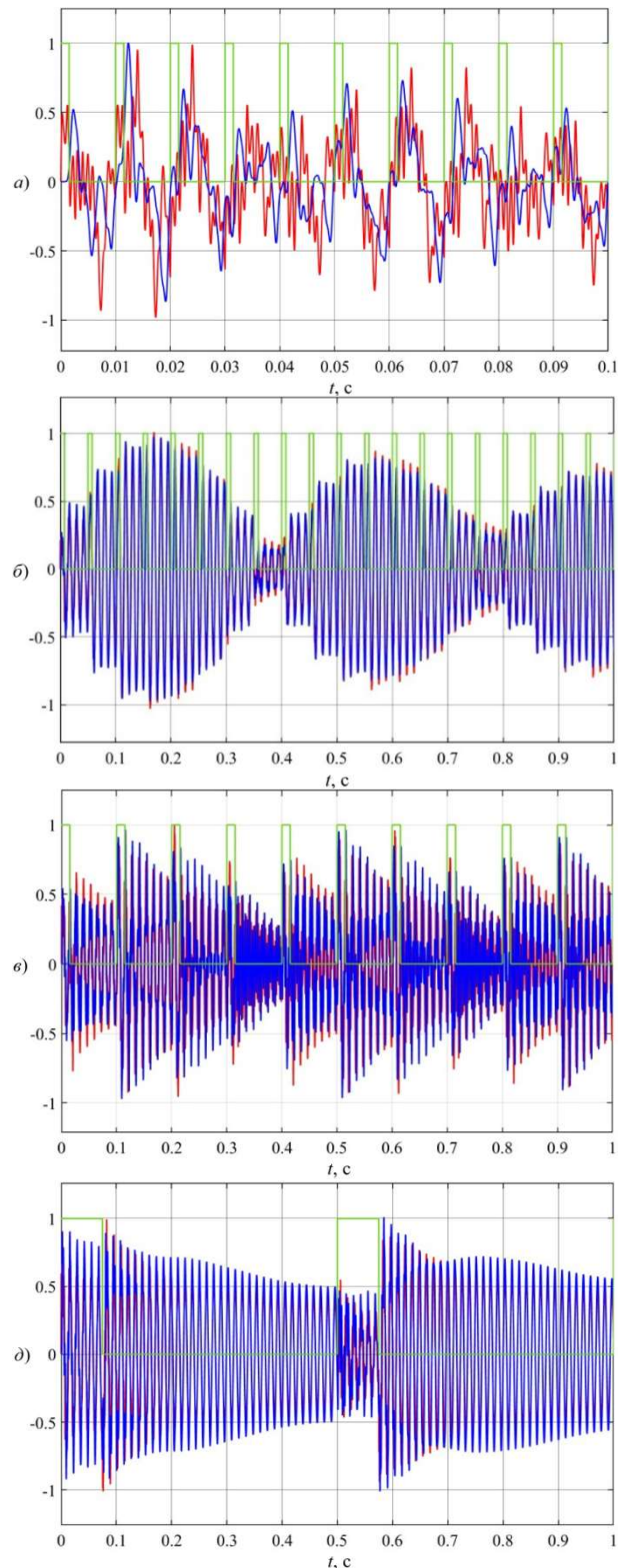


Рис. 6. Хвильовий процес у двох точках ситового полотна грохота, що утворюється від прикладення періодичного імпульсного силового впливу з частотою 100 Гц (а), 20 Гц (б), 10 Гц (в) та 2 Гц (д) до одного із кутів рами грохота (нормалізовані значення амплітуди). Ширина імпульсу – 15%

алгоритму модельно-прогнозуючого керування (МПК) для формування автоматизованого управління процесом тонкого вологого грохочення руди, реалізованого для об'єкта класу МІМО (Multiple-Input Multiple-Output).

Висновки. Вперше динамічну модель грохота тонкого вологого грохочення руди представлено у вигляді мультиагентної системи, в елементах якої розповсюджуються пружні біжучі хвилі, передавальні функції визначають хвильові процеси взаємодії між ними, а топологія представлена графовою структурою, що дозволяє спрогнозувати локальну поведінку і вплив основних елементів конструкції на технологічні та енергетичні характеристики процесу грохочення.

Для підвищення якості моделювання руху рудного матеріалу під час грохочення ситове полотно представлено у вигляді структури з розподіленими параметрами, яка складається з елементарних блоків маса-пружина-демпфер, з'єднаних між собою за допомогою паралельних пружинних амортизаторів, що дозволяє формувати із необхідною точністю розподілення як пружних якостей полотна, так і маси рудного матеріалу на ньому, та симулювати динамічну реакцію системи у вигляді коливань у відповідь на прикладену силу і згинання у відповідь на статичний дисбаланс маси.

Напрямок подальших досліджень слід вважати алгоритмізацію формування та визначення параметрів оптимальних керуючих впливів у системі автоматизованого управління процесом тонкого вологого грохочення руди на основі хвильового підходу.

Література

1. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter. *Reports on Progress in Physics*. 2004, vol. 67 (3). DOI 10.1088/0034-4885/67/3/R01.
2. Dai S., Zhang S., Gao F., He X., Sheng D. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism. *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 169, 106236. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106236>.
3. Dong K. J., Wang B., & Yu A. B. Modeling of Particle Flow and Sieving Behavior on a Vibrating Screen: From Discrete Particle Simulation to Process Performance Prediction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013, 52 (33), 11333-11343. DOI: 10.1021/ie3034637.
4. Dai Bei-Bing, Yuan Wei-Hai, Liu Jian-Kun, Liu Feng-Tao, Chang D. Estimating the segregation of a granular bed subjected to vibration in various modes. *Advanced Powder Technology*/ 2021, vol. 32(5), p. 1450-1462. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.03.001>.

5. Çağlar N.M., Şafak E. Application of Travelling Wave Method for dynamic analysis of plane frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2019, vol. 17, 1361–1377. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0493-7>.
6. Gea-Banacloche J. *University Physics I: Classical Mechanics*. 2019. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/768>.
7. Griffiths G. W., Schiesser W. E. *Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods with MATLAB and Maple*. Elsevier Science. 2012, ISBN: 978-0-12-384652-5.
8. Ling S. J., Sanny J., Moebs W. *University Physics Volume 1*. 2016. ISBN-13 978-1-938168-27-7. <https://d3bxy9euw4e147.cloudfront.net/oscms-prodcms/media/documents/UniversityPhysicsVolume1-LR.pdf>
9. Dan Martinec D., Herman I, Šebek M. Travelling waves in a multi-agent system with general graph topology. *IFAC-PapersOnLine*. 2015, vol. 48 (22), p. 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.311>.
10. Martinec D., Herman I., Hurák Z. Šebek, M. (2014). Wave-absorbing vehicular platoon controller. *European Journal of Control*, 20, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2014.06.001>.
11. Martinec, D., Herman, I., & Šebek, M. The transfer-function approach to travelling waves in path graphs. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.0474>
12. Simscape Block Libraries. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
13. Flexible Shaft. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html>.
14. Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко С.М., Грищенко Я.О. Моделювання комбінованого електромагнітного та електромеханічного приводу грохота для підвищення його ефективності. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, № 1 (287), с. 46-56. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
15. Моркун В., Моркун Н., Грищенко Я., & Бобров Є. Моделювання динаміки надрешітного продукту тонкого вологого грохочення залізної руди. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025, 7 (293), 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.

References

1. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter. *Reports on Progress in Physics*. 2004, vol. 67 (3). DOI 10.1088/0034-4885/67/3/R01.
2. Dai S., Zhang S., Gao F., He X., Sheng D. Investigation of particle segregation in a vertically vibrated binary mixture: Segregation process and mechanism. *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 169, 106236. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106236>.
3. Dong K. J., Wang B., & Yu A. B. Modeling of Particle Flow and Sieving Behavior on a Vibrating Screen: From Discrete Particle Simulation to Process Performance Prediction. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013, 52 (33), 11333-11343. DOI: 10.1021/ie3034637.
4. Dai Bei-Bing, Yuan Wei-Hai, Liu Jian-Kun, Liu Feng-Tao, Chang D. Estimating the segregation of a granular bed subjected to vibration in various

- modes. *Advanced Powder Technology*/ 2021, vol. 32(5), p. 1450-1462. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.001>.
5. Çağlar N.M., Şafak E. Application of Travelling Wave Method for dynamic analysis of plane frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2019, vol. 17, 1361–1377. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0493-7>.
 6. Gea-Banacloche J. *University Physics I: Classical Mechanics*. 2019. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/768>.
 7. Griffiths G. W., Schiesser W. E. *Traveling Wave Analysis of Partial Differential Equations: Numerical and Analytical Methods with MATLAB and Maple*. Elsevier Science. 2012, ISBN: 978-0-12-384652-5.
 8. Ling S. J., Sanny J., Moebs W. *University Physics Volume 1*. 2016. ISBN-13 978-1-938168-27-7. <https://d3bxy9euw4e147.cloudfront.net/oscms-prodcms/media/documents/UniversityPhysicsVolume1-LR.pdf>
 9. Dan Martinec D., Herman I, Šebek M. Travelling waves in a multi-agent system with general graph topology. *IFAC-PapersOnLine*. 2015, vol. 48 (22), p. 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.311>.
 10. Martinec D., Herman I., Hurák Z. Šebek, M. (2014). Wave-absorbing vehicular platoon controller. *European Journal of Control*, 20, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2014.06.001>.
 11. Martinec, D., Herman, I., & Šebek, M. The transfer-function approach to travelling waves in path graphs. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.0474>
 12. Simscape Block Libraries. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.
 13. Flexible Shaft. Retrieved from <https://se.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html>.
 14. Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Hryshchenko Y.O. Modeling of a combined electromagnetic and electromechanical drive of a screen to increase its efficiency. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2025, No. 1 (287), pp. 46-56. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-46-56>.
 15. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko Ya., & Bobrov Ye. Modeling the dynamics of the oversize product of fine wet screening of iron ore. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2025, 7 (293), 56–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-56-66>.

Morkun V.S., Morkun N.V., Hryshchenko Y.O., Azaryan A.A., Gritsenko A. M. Modeling of automated control of mining production facilities based on the wave approach

During the classification of crushed ore by size on a fine wet ore screen, various vibrations are formed in its structure, which propagate in the form of traveling waves. To describe and model the dynamic response of an object in which traveling waves propagate, it is represented as a multi-agent system. This approach is based on a wave transfer function that determines the interactions between agents and the parameters of traveling waves and describes the behavior of the system from the local point of view of its individual elements. Analysis of the obtained simulation results showed that the approach used is well suited for reflecting the general topology of wave processes in the studied structure and its overall behavior. At the same time, the applied model includes the main nodal points of the screen structure but does not reflect the wave process occurring directly on the screen surface. Solving this problem requires the use of a large number of agents with appropriate consideration of their interaction, which is quite difficult with this approach. An alternative approach based on the use of physical modeling blocks based on the Simscape® software package for Simulink®/MATLAB® is considered. The screen cloth is presented as a structure with distributed parameters, implemented for the compliance of the structure to vertical vibrations and bending. The proposed structure consists of elementary Mass-Spring-Damper blocks connected to each other by parallel spring shock absorbers. This structure provides the inertia of the canvas, while the spring damper systems ensure its compliance. The model simulates the dynamic response of the system, oscillating in response to the applied force and bending in response to the static mass imbalance. The advantage of this approach is the possibility of using any number of elementary Mass-Spring-Damper blocks with the ability to form with the necessary accuracy the distribution of both the elastic qualities of the canvas and the mass of the ore material on it. Analysis of the simulation results shows that the proposed approach allows determining, forming, and investigating various modes of ore material movement during screening to achieve optimal technological and energy performance of the process.

Keywords: ore, screening, energy efficiency, simulation, control, automation, characteristics.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

Азарян Альберт Арамаїсович – доктор технічних наук, професор Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), s-gischenko@ukr.net

Грищенко Андрій Миколайович – к.тех.наук, доцент, доцент Криворізького національного університету, (Кривий Ріг), smgrischenko@gmail.com.

Стаття подана 12.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-43-51>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕДУРИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИЧНИХ ОЗНАК МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Моркун Н.В., Лорія М.Г., Грищенко С.М., Олійник Т.А.

MODELLING THE PROCEDURE FOR DETERMINING THE CHARACTERISTIC FEATURES OF MINERALOGICAL VARIETIES OF IRON ORE IN THE PROCESS OF DRILLING WELLS

Morkun N.V., Loryia M.G., Hryshchenko S.M., Oliinyk T.A.

Буріння свердловин є найбільш поширеною та ресурсоемною технологічною операцією при видобутку корисних копалин. Економічна ефективність цієї операції напряму залежить від якості автоматизованого керування процесом, що, в свою чергу, визначається повнотою його інформаційного забезпечення. Головним чинником, що впливає на результати процесу буріння є відповідність швидкості проходки свердловин та сформованих при цьому керуючих дій фізико-механічним характеристикам гірської породи або її мінералогічним різновидам. Запропоновано метод підвищення ефективності процедури визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин на основі симуляції перетворення зонduючого електромагнітного сигналу у досліджуваному середовищі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®. Використаний підхід заснований на використанні електромагнітного перетворювача, який генерує зонduючий імпульс у залізовмісній гірській породі, що має певні електричні та магнітні властивості. В результаті у досліджуваному середовищі формуються вихрові струми, які створюють індуковане магнітне поле, впливаючи на такі параметри, як напруга на вимірвальній котушці або її імпеданс. Електромагнітні властивості матеріалу середовища впливають на розподіл цих індукованих вихрових струмів, що змінює параметри вимірвальної котушки порівняно із зразковим матеріалом. В процесі моделювання визначалися параметри сигналу, виміряного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища.

При цьому імітувались зміни співвідношення мінералів у складі різновидів залізної руди. Аналіз отриманих результатів показує сильну їх залежність від вмісту магнетиту у досліджуваному середовищі. Це ускладнює розпізнавання різновидів залізної руди, які включають інші слабомагнітні мінерали з малою електричною провідністю. Для отримання задовільних результатів цієї процедури необхідно долучати додаткові характеристичні ознаки фізичних властивостей предмету розпізнавання, до яких, в першу чергу, слід віднести параметри розповсюдження ультразвукових хвиль, що утворюються при формуванні електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі.

Ключові слова: буріння, модель, керування, автоматизація, характеристики, електромагнітний перетворювач.

Вступ. У світі відомо кілька тисяч родовищ залізної руди, що поширені в різних регіонах за різних геологічних умов і в різних геологічних формаціях. Залізні руди зустрічаються в найрізноманітніших геологічних середовищах у магматичних, метаморфічних або осадових породах, або як продукти вивітрювання різних первинних залізовмісних матеріалів. При видобутку залізної руди використовуються відповідні технології, обладнання та методи видобутку відповідно до умов родовищ. Протягом останніх кількох десятиліть технології буріння стрімко розвивалися, і в останні роки з'явилося кілька інноваційних

рішень для вирішення ключових проблем у гірничодобувній промисловості. Автоматизовані бурові установки стали критично важливою інновацією та рушійною силою технологічного прогресу в сучасному гірничому підприємстві. Автоматизована система керування (АСК) буровою установкою оптимізує аналітичні рішення, виводячи їх з-під контролю операторів та зменшуючи ризик людської помилки, яка може серйозно вплинути на весь процес буріння [1].

Запорукою ефективності АСК є якісна інформаційна база, що забезпечує формування керуючих дій відповідно до фізико-механічних характеристик гірської породи або її мінералогічних різновидів та стану бурового устаткування. Важливим етапом формування такої інформаційної бази є визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин. Для вирішення цієї задачі можуть бути використані різноманітні ефекти безконтактної взаємодії електромагнітного поля з досліджуваним середовищем.

У роботі [2] досліджено зразки матеріалів та їх станів за допомогою багаточастотного вихрострумовевого аналізу з високою просторовою роздільною здатністю. Такий аналіз, виконаний з використанням різних частот збудження, показав, що локальний розподіл сигналу залежить від геометрії та матеріалу зразків. Було показано, що зі збільшенням частоти різниця значень, отриманих для різних станів матеріалу, збільшується, що дозволяє надійно ідентифікувати різні стани.

Сучасне виробниче обладнання базується на результатах контролю якості, а також на параметрах процесу. У роботі [3] представлено нову систему датчиків на основі вихрових струмів, яка виконує безконтактне вимірювання магнітної анізотропії заготовки та реалізує розділення та корекцію ефектів нахилу. Принцип вимірювання демонструється на прикладі двох зразків з різними значеннями магнітної анізотропії, викликаними холодним формуванням. Обидва зразки аналізуються під різними кутами нахилу між віссю датчика та поверхнею заготовки. У цій роботі демонструється цифрова обробка сигналів отриманих вихідних даних для диференціації впливу нахилу та анізотропії з використанням попередніх результатів як прикладу двох підготовлених зразків.

У роботі [4] досліджувалася можливість виявлення механічно введених розривів за допомогою різних магнітних датчиків без намагнічування тестованого об'єкта сильним зовнішнім полем. У цьому дослідженні використовувалися диференціальні датчики (що вимірюють різницю значень поля на рівні нанотесл) та абсолютні датчики (що дозволяють вимірювати модуль вектора магнітного поля або його компоненти на рівні мікротесл). Кожен результат вимірювання, отриманий від датчиків, дозволяв виявляти розриви в лінії.

У статті [5] представлено метод зондування на основі вихрових струмів (ЕС) з обертовим сфокусованим полем, який використовує переваги фокусування магнітним полем та обертовим магнітним полем для виявлення дефектів довільної орієнтації. Результати експериментів показали, що зонд має здатність виявляти дефекти з будь-якою орієнтацією, зберігаючи при цьому ту саму чутливість, а глибину дефекту можна кількісно оцінити за допомогою амплітуди сигналу. Порівняно з існуючими зондами обертового поля, представлений зонд не потребує додаткового налаштування збудження або об'єднання даних. Водночас, завдяки своєму фокусувальному ефекту, він може генерувати сильне обертове магнітне поле в місці дефекту зі слабким фоновим шумом, що забезпечує велике співвідношення сигнал/шум.

У роботі [6] наведено принцип роботи датчика вихрових струмів та запропоновано метод виготовлення зонда. Загальний план проектування схеми обробки отриманої інформації було розроблено шляхом аналізу характеристик вихідного сигналу зонда. Зміна вихідного сигналу зонда була перетворена на імпульси різної ширини, а потім разом з опорним сигналом подавалася на цифровий фазовий дискримінатор. Вихідний сигнал цифрового фазового дискримінатора оброблявся фільтром низьких частот для отримання постійної складової. Нарешті, сигнал був посилений та скомпенсований для зменшення впливу температури. Детально описано критерії вибору частоти збуджувального сигналу та конструкцію схеми формування сигналу, а також конструкцію схеми температурної компенсації на основі цифрового потенціометра з вбудованим датчиком температури.

У феромагнітних матеріалах ключовими складовими загальних енергетичних втрат є втрати на гістерезис та вихрові струми. У

процесі проектування електромагнітних пристроїв вигідно мати точну та обчислювально недорогу модель, як це продемонстрував Hornik T. (2025) [7]. Класичні експериментальні підходи до вивчення магнітних втрат відзначаються високою трудомісткістю, значними фінансовими витратами та обмеженістю у відтворенні різноманітних режимів роботи. До того ж, вони не завжди забезпечують оперативне коригування параметрів для пошуку оптимальних рішень.

Ghoni R. та інші (2014) [8] проаналізував технічно характеристику дефектів на основі методу вихрових струмів. Розширення можливостей контролю зроблено за допомогою зондів, а комп'ютерні технології моделювання та аналізу дозволили визначити глибокі дефекти у металевих конструкціях і виконати оцінювання стану поверхні матеріалу.

Meng B. та ін. (2025) [9] запропонували рішення в часовій області для коаксіального збудження, приймальних котушок та датчиків Холла, що взаємодіють з вихровим полем в області, де вводяться сторонні металеві предмети, використовуючи підхід контролю вихрового струму. Вплив ефекту відриву на властивості класифікації та ідентифікації сторонніх металевих предметів ретельно досліджується. Результати моделювання та експериментів показують, що сигнали системи виявлення сторонніх металевих предметів, оброблені алгоритмом придушення шуму, дозволяють класифікувати та ідентифікувати положення падіння, розмір, провідність та магнітну проникність сторонніх металевих предметів на основі точки відриву, пікового значення, часу до піку та ефективного проміжку часу.

Таким чином, різноманітні ефекти, що виникають при взаємодії електромагнітного поля з феромагнітним середовищем є перспективним напрямом щодо визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин. Вихрострумові методи - ідеальне рішення для визначення властивостей різноманітних матеріалів, але з огляду на сучасні вимоги до підвищення енергоефективності та зменшення витрат, виникає необхідність у якісному їх моделюванні.

Метою роботи є підвищення ефективності процедури визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин на основі симуляції

перетворення зондуючого електромагнітного сигналу у досліджуваному середовищі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®.

Викладання основного матеріалу.

Принцип дії електромагнітного перетворювача (ЕМП) полягає у застосуванні імпульсного зондуючого сигналу, який вводиться у збуджувальну котушку, розташовану на поверхні випробуваного середовища [10]. Це збудження генерує змінне магнітне поле в середині котушки, яке, у свою чергу, індукуює вихрові струми на поверхні досліджуваного матеріалу. Вихрові струми створюють індуковане магнітне поле, яке протидіє змінам початкового змінного магнітного поля, впливаючи на такі параметри, як напруга на вимірювальній котушці або її імпеданс. Характеристики матеріалу середовища впливають на розподіл цих індукованих вихрових струмів, що змінює параметри вимірювальної котушки порівняно із зразковим матеріалом. Зазначені зміни можуть бути використані у якості характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища.

Зміну напруги ΔU на вимірювальній котушці можна виразити наступним чином [10]

$$\Delta U = \sum_{i=1}^N j\omega \int \Delta B \cdot ds = \sum_{i=1}^N j\omega \oint \Delta A \cdot dl \quad (1)$$

де N - кількість витків котушки; $\omega = 2\pi f$; f - частота сигналу збудження; ΔB та ΔA - зміни інтенсивності магнітної індукції та магнітного векторного потенціалу відповідно.

Це рівняння показує, що зміна напруги прямо пропорційна кількості витків котушки та частоті сигналу збудження. Імпульсні вихрові струми демонструють явище, відоме як скін-ефект, відповідно до якого розподіл індукованих вихрових струмів нерівномірний і швидко зменшується з глибиною.

Це одним наслідком формування імпульсного зондуючого електромагнітного сигналу у феромагнітній гірській породі є генерація пружних хвиль. Цей еластодинамічний процес описується набором диференціальних рівнянь у частинних похідних, що визначають, як матеріал деформується і піддається внутрішньому напруженню [11,12]

$$\rho(x) \frac{\partial v_i}{\partial t}(x, t) = \sum_{j=1}^d \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}(x, t) + f_i(x, t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^d \sum_{i=1}^d c_{ijkl}(x) \frac{\partial \mathbf{v}_k}{\partial x_l} + \boldsymbol{\theta}_{ij}(x, t) \quad (3)$$

де ρ – щільність маси, а c_{ijkl} - 4-й тензор жорсткості досліджуваного зразка; \mathbf{f}_i та $\boldsymbol{\theta}_{ij}$ - джерело сили і джерело тензорної швидкості деформації відповідно.

Параметрами, що підлягають обчисленню, є швидкість \mathbf{v}_i і тензор напружень \mathbf{T}_i . Рівняння (2) є другим законом Ньютона: коли до досліджуваного зразка прикладається сила, виникає напруга і деформація, а також зміщення частинок. Рівняння (3), засноване на законі Гука, описує співвідношення швидкості тензора напружень і швидкості тензора деформацій при виникненні деформації [13].

Як доведено у роботі [14], параметри розповсюдження пружних ультразвукових хвиль у гірській породі несуть інформацію стосовно її фізичних характеристик, зокрема, щільності, гранулометричного складу, наявності порожнеч та ін.

У свою чергу електромагнітні властивості залізної руди можуть бути охарактеризовані такими параметрами як магнітна сприйнятливість, електрична провідність та діелектрична проникність.

Відносна магнітна проникність μ_r показує, у скільки разів магнітна індукція у речовині відрізняється від магнітної індукції у вакуумі за однакових умов

$$\mu_r = B/B_0 \quad (4)$$

де B - магнітна індукція в середовищі, B_0 - магнітна індукція у вакуумі.

Магнітні властивості часто виражаються через магнітну сприйнятливість χ , яка пов'язана із відносною проникністю μ_r

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (5)$$

Абсолютна магнітна проникність становить

$$\mu = \mu_r/\mu_0 \quad (6)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму.

Електрична провідність чисельно дорівнює оберненій величині електричного опору R середовища. Питома провідність σ залежить від матеріалу, довжини L , площі поперечного перерізу S та оберненої величини питомого опору ρ

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R \cdot S} \quad (7)$$

Відносна діелектрична проникність (діелектрична стала) середовища ϵ характеризує поляризаційні властивості середовища. Вона показує у скільки разів сила взаємодії між зарядами в середовищі менша, ніж у вакуумі.

Електромагнітні властивості різновидів залізної руди сильно залежать від конкретної мінералогії (наприклад, магнетит, гематит, сидерит), співвідношення мінералогічних складових, структурно-текстурних особливостей та фізичних умов, за яких вони вимірюються. Тому числові значення відповідних параметрів зазвичай представлені у вигляді діапазонів, а не окремих фіксованих точок. У Таблиці 1 наведена магнітна сприйнятливість, електрична провідність та діелектрична проникність деяких мінералів, які є основними утворюючими залізних руд Криворізького басейну.

Таблиця 1

Електромагнітні властивості основних утворюючих мінералів залізних руд Криворізького басейну

Мінерали	Хімічна формула	Магнітна сприйнятливість, од. SI	Електрична провідність, S/m	Діелектрична проникність
Магнетит	Fe ₃ O ₄	8,8-25	100 - 0, 1	33 - 81
Гематит	(α -Fe ₂ O ₃)	(1,3 – 13) · 10 ⁻³	10 - 0,01	1 - 25
Сидерит	FeCO ₃	(2,7 – 7,5) · 10 ⁻³	1 - 0, 001	0.1 - 5,2

З наведеного можна зробити висновок, що магнетит вирізняється сильним магнетизмом та відносно високою електропровідністю порівняно з гематитом та сидеритом, які є слабкими магнітами та поганими провідниками електрики. Присутність води, домішок та інших мінералів може суттєво змінити ці властивості в природних родовищах залізної руди.

Лабораторні методи вимірювання електромагнітних властивостей гранульованих матеріалів на частотах від герців до мегагерців зазвичай базуються на аналізі еквівалентної схеми, що виконується за допомогою LCR-метрів [15]. Провідність та діелектрична проникність отримують шляхом вимірювання величини та фази електричного імпедансу емнісної комірки, заповненої досліджуваним

матеріалом. Аналогічно, магнітна проникність та відповідні втрати отримують шляхом вимірювання імпедансу соленоїда, повністю вбудованого в матеріал.

Загальна густина струму J_{tot} , що протікає через матеріал у ємнісній комірці, складається з членів провідності та зміщення. Ці два параметри можна поєднати шляхом введення комплексної діелектричної проникності як [15,16]

$$J_{tot} = J_c + J_d = j\omega\epsilon_0\epsilon^*E \quad (8)$$

де E – електричне поле, ω – кутова частота, ϵ_0 – діелектрична проникність у вакуумі ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), а ϵ^* – відносна комплексна діелектрична проникність, визначена як

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} + \epsilon_d''\right) \quad (9)$$

Дійсна частина ϵ^* пов'язана з поляризованістю, тоді як уявна частина включає ефект втрат постійної провідності (σ) та дисипацію, пов'язану з процесом поляризації (ϵ_d''). Зазвичай, на робочих частотах <1 МГц член ϵ_d'' є незначним відносно $\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$, а уявна частина (9) зводиться до $\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$ [16].

Магнітні властивості матеріалу характеризуються відносною комплексною магнітною проникністю μ^* , яка пов'язує магнітне поле H з щільністю потоку B як [17]

$$B = \mu_0\mu^*H \quad (10)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність у вакуумі.

Відносну комплексну проникність можна визначити як

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' \quad (11)$$

Дійсна частина у виразі (11) відображає намагніченість матеріалу, тоді як уявна частина враховує всі магнітні втрати, включаючи гістерезис, втрати на вихрові струми (особливо залежні від провідності) та релаксацію доменних стінок [15,17].

З наведеного можна зробити висновок, що у сукупності параметри формування та розповсюдження зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітній залізовмісній гірській породі є

характеристичними ознаками процесу і можуть бути використані для розпізнавання її мінералогічних різновидів [18,19]

Для моделювання цієї процедури в процесі буріння свердловин використані можливості розширення Simscape® програмного продукту Simulink® /MATLAB®.

Еквівалентна електрична схема електромагнітного перетворювача (рис. 1) представлена у вигляді неідеального двообмоткового трансформатора [20].

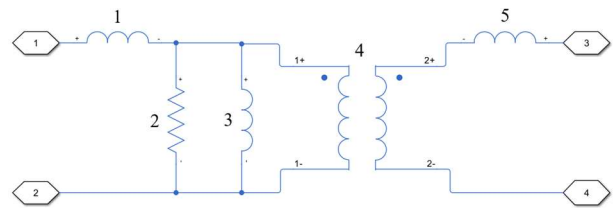


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема електромагнітного перетворювача: 1 та 5 – власна індуктивність первинної та вторинної обмоток відповідно; 2 – взаємний опір між двома обмотками, спричинений втратами на вихрові струми; 3 - взаємна індуктивність між двома обмотками; 4 – ідеальний трансформатор

На рис. 2 наведена схема моделювання процедури формування зонduючого імпульсу у феромагнітній гірській породі та визначення його характеристик із врахуванням змін електричних та магнітних властивостей досліджуваного середовища.

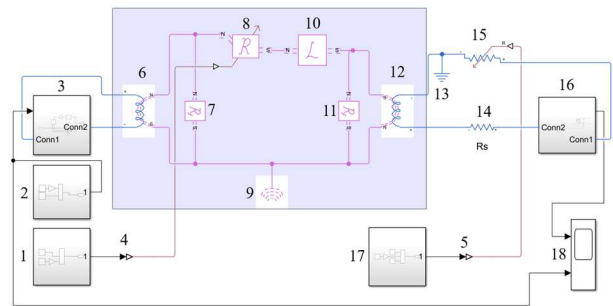


Рис. 2. Схема моделювання процедури формування зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі та визначення його характеристик

У наведеній моделі використані наступні блоки Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 – блок Subsystem 1; 2 – блок Subsystem 2; 3 - блок Subsystem 3; 4,5 – блоки Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 – блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 7 – блок Fundamental Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic

Elements; 8 – блок Variable Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 9 – блок Magnetic Reference із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 10 – блок Eddy Current із бібліотеки Simscape / Electrical / Passive; 11 – блок Fundamental Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 12 – блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 13 – блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 14 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 15 – блок Variable Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 16 – блок Subsystem 4; 17 – блок Subsystem 5; 18 – блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

Блок Subsystem 1 формує сигнал із змінними параметрами, який симулює динамічні зміни магнітних характеристик гірської породи із стохастичною складовою.

Блок Subsystem 2 генерує імпульсний синусоїдальний сигнал заданої амплітуди та частоти.

В блоці Subsystem 3 формується зонduючий електромагнітний імпульс та відстежуються його електричні параметри (рис. 3).

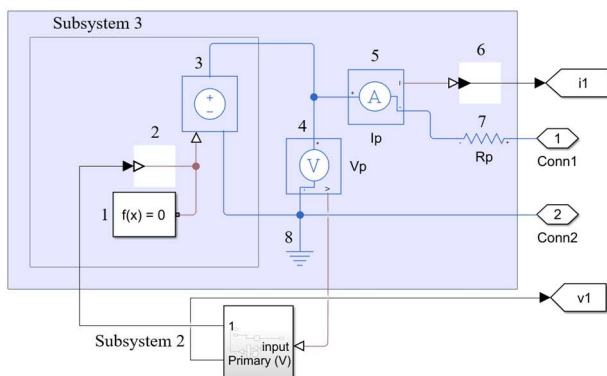


Рис. 3. Схема формування зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітній залізовмісній гірській породі: V_p – напруга на первинній обмотці; I_p – струм у первинній обмотці; R_p – електричний опір первинної обмотки.

У наведеній на рис. 3 моделі використані наступні блоки розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 – блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 3 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 4 – блок

Voltage Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 5 – блок Current Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 6 – блок PS-Simulink Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 7 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements.

Блок Subsystem 4 використовується для відстеження параметрів сигналів на вторинній (вимірювальній) обмотці електромагнітного перетворювача. Завдяки наявності різноманітних сенсорів блок дозволяє вимірювати як електричні, так і магнітні характеристики перетворення зонduючого сигналу.

В блоці Subsystem 5 формується сигнал, що імітує зміни електричних властивостей гірської породи.

Для симуляції змін електричних та магнітних властивостей гірської породи використані блоки Variable Reluctance та Variable Resistor (відповідно блоки 8 та 15 на рис. 2).

Блок Variable Reluctance моделює змінний магнітний опір, тобто компонент, який протистоїть магнітному потоку. Відношення магніторушійної сили на компоненті до результуючого потоку, який протікає через компонент, є постійним, а значення співвідношення визначається як опір. Опір залежить від геометрії ділянки, що моделюється. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = \Phi \cdot \mathfrak{R} \quad (12)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{g}{\mu_0 \mu_r A} \quad (13)$$

де MMF – магніторушійна сила на компоненті; Φ – потік через компонент; \mathfrak{R} – опір; g – товщина ділянки, що моделюється; μ_0 – константа проникності; μ_r – відносна проникність матеріалу; A – площа поперечного перерізу секції, що моделюється.

Блок Variable Resistor моделює лінійний змінний резистор, що описується наступним рівнянням

$$V = I \cdot R \quad (14)$$

де V – напруга; I – струм; R – опір.

На рис. 4 наведено приклад сформованих за допомогою дослідженої моделі (рис. 2) сигналів: a – зонduючий імпульс на виході блоку Subsystem 2 (один пакет із заповненням

синусоїдальними коливаннями частотою 60 кГц та повторенням з частотою 2,5 кГц); *б* – сигнал на виході блоку Subsystem 1, що імітує зміни магнітних властивостей гірської породи (зростання магнітного опору із Slope = 1 та стохастичною складовою); *в* - сигнал на виході блоку Subsystem 5, що імітує стрибкоподібні зміни електричної провідності гірської породи, також із стохастичною складовою.

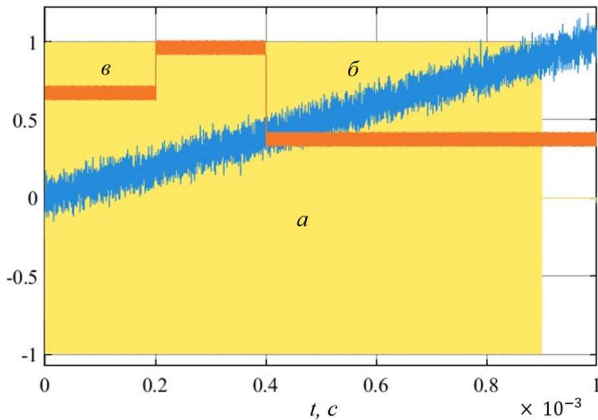


Рис. 4. Приклад сформованих за допомогою дослідженої моделі сигналів (нормалізовані значення амплітуди): *a* – первинний прямокутний імпульс із заповненням синусоїдальними коливаннями; *б* – сигнал, що імітує зміни магнітних властивостей гірської породи (Slope = 1); *в* – сигнал, що імітує стрибкоподібні зміни електричної провідності гірської породи

На рис. 5 наведено реакцію дослідженої моделі (струм у вторинній обмотці електромагнітного перетворювача) на відповідні імітовані зміни магнітних та електричних властивостей гірської породи.

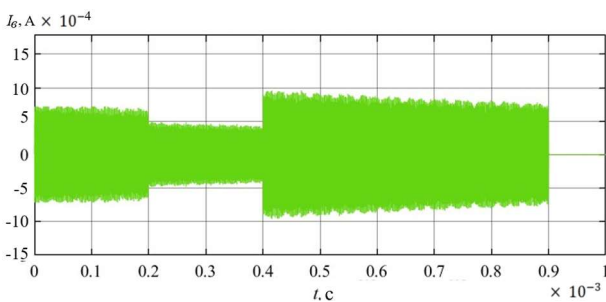


Рис. 5. Реакція дослідженої моделі ЕМП на зміни магнітних та електричних властивостей гірської породи

У Таблиці 2 наведено параметри сигналу, виміряного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища. При цьому імітувались зміни співвідношення

мінералів у складі різновидів *R* залізної руди, електромагнітні властивості яких наведено у Таблиці 1.

Таблиця 2

Параметри сигналу, виміряного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища, при зміні його характеристик

Різновид залізної руди	Параметр			
	A_{max}	A_{min}	Peak to peak	RMS
R_1	8.983e-4	-8.986e-4	17.97e-4	2.342e-4
R_2	10.31e-4	-10.57e-4	20.88e-4	3.121e-4
R_3	8.309e-4	-8.403e-4	16.71e-4	2.437e-4
R_4	3.976e-4	-4.037e-4	8.013e-4	1.004e-4
R_5	10.02e-4	-10.26e-4	20.28e-4	2.489e-4

У таблиці 2 прийнято наступні позначення: A_{max} – максимальне позитивне значення амплітуди; A_{mi} – максимальне негативне значення амплітуди; Peak to peak - амплітуда сигналу від максимально позитивного до максимально негативного значення; RMS – середньоквадратичне значення амплітуди. Аналіз отриманих результатів показує сильну їх залежність від вмісту магнетиту у досліджуваному середовищі, що ускладнює розпізнавання різновидів залізної руди, які включають інші слабомагнітні мінерали з малою електричною провідністю. Тобто для отримання задовільних результатів цієї процедури необхідно долучати додаткові характеристичні ознаки фізичних властивостей предмету розпізнавання, до яких, в першу чергу, слід віднести параметри розповсюдження ультразвукових хвиль, що утворюються при формування електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі [14,18,19].

Висновки. Запропоновано метод підвищення ефективності процедури визначення характеристичних ознак мінералогічних різновидів залізної руди в процесі буріння свердловин на основі симуляції перетворення зондуючого електромагнітного сигналу у досліджуваному середовищі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®. Використаний підхід заснований на використанні електромагнітного перетворювача, який генерує зондуючий

імпульс у залізовмісній гірській породі, що має певні електричні та магнітні властивості. В результаті у досліджуваному середовищі формуються вихрові струми, які створюють індуковане магнітне поле, впливаючи на такі параметри, як напруга на вимірювальній котушці або її імпеданс. Електромагнітні властивості матеріалу середовища впливають на розподіл цих індукованих вихрових струмів, що змінює параметри вимірювальної котушки порівняно із зразковим матеріалом. Електромагнітні властивості залізної руди можуть бути охарактеризовані такими параметрами як магнітна сприйнятливість, електрична провідність та діелектрична проникність.

Також під дією імпульсного зонduючого електромагнітного сигналу у феромагнітній гірській породі відбувається генерація пружних хвиль. Параметри розповсюдження пружних ультразвукових хвиль у гірській породі несуть інформацію стосовно її фізичних характеристик, зокрема, щільності, гранулометричного складу, наявності порожнеч та ін.

В процесі моделювання визначались параметри сигналу, вимірюваного на вторинній обмотці електромагнітного перетворювача при зміні характеристик досліджуваного середовища. Електромагнітні властивості різновидів залізної руди сильно залежать від конкретної мінералогії (наприклад, магнетит, гематит, сидерит), співвідношення мінералогічних складових, структурно-текстурних особливостей та фізичних умов, за яких вони вимірюються. Під час моделювання імітувались зміни співвідношення основних мінералів у складі різновидів залізної руди. Аналіз отриманих результатів показує сильну їх залежність від вмісту магнетиту у досліджуваному середовищі. Це ускладнює розпізнавання різновидів залізної руди, які включають інші слабomagнітні мінерали з малою електричною провідністю.

Напрямок подальших досліджень слід вважати визначення додаткових характеристичних ознак фізичних властивостей мінералогічних різновидів залізної руди для підвищення якості їх розпізнавання, до яких, в першу чергу, слід віднести параметри розповсюдження ультразвукових хвиль, що утворюються при формуванні електромагнітного імпульсу у феромагнітній гірській породі.

Література

1. Davey R. (2023, November 23). Drilling Deeper: Innovations in Mining Drill Rigs and Techniques. AZoMining. Retrieved on November 23, 2025 from <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1772>
2. Bobrov I., Epp J. (2023). Microscaled Multi-frequency Eddy Current Analysis for High Throughput Characterization of Steel Microsamples. *J Nondestruct Evaluation*, 42, 23. <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00930-4>.
3. Wendler F., Munjal R., Waqas M., Laue R., Härtel S., Awiszus B., & Kanoun O. (2021). Eddy Current Sensor System for Tilting Independent In-Process Measurement of Magnetic Anisotropy. *Sensors*, 21(8), 2652. <https://doi.org/10.3390/s21082652>
4. Roskosz M., Mazurek P., Kwaśniewski J., & Wu J. (2023). Use of Different Types of Magnetic Field Sensors in Diagnosing the State of Ferromagnetic Elements Based on Residual Magnetic Field Measurements. *Sensors*, 23(14), 6365. <https://doi.org/10.3390/s23146365>.
5. Xu Z., Wang X., and Deng Y. (2020). Rotating Focused Field Eddy-Current Sensing for Arbitrary Orientation Defects Detection in Carbon Steel. *Sensors*, 20(8), 2345. <https://doi.org/10.3390/s20082345>.
6. Xu Z., Feng Y., Liu Y., Shi F., Ge Y., Liu H., Cao W., Zhou H., Geng S., and Lin W. (2024). Single-Ended Eddy Current Micro-Displacement Sensor with High Precision Based on Temperature Compensation. *Micromachines*, 15(3), 366. <https://doi.org/10.3390/mi15030366>.
7. Hornik T. (2025). Accuracy of magnetic loss models for electrical machines: FEM vs analytical methods. *Electrical Engineering*, 107. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03085-9>.
8. Ghoni R., Dollah M., Sulaiman A. and Ibrahim F. M. (2014). Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 182496, 11. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/182496>
9. Meng B., Zhuang Z., Ma J., and Zhao S. (2025). Study on the effect of pulsed eddy current lift-off characteristics for feeding metallic foreign objects detection in coal mine crushers. *Scientific Reports*, 15, 23775. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08185-x>.
10. Zheng X., Huang J., and Luo N. (2024). Enhanced Nondestructive Testing Using Pulsed Eddy Current and Electromagnetic Ultrasonic Techniques. *Applied Sciences*, 14(15), 6488. <https://doi.org/10.3390/app14156488>.
11. Bossy E. (2012). SimSonic Suite User's Guide for SimSonic3D.
12. Virieux J. (1986). P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, 51, 4, 889–901. <https://doi.org/10.1190/1.1442147>.

13. Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z., Yin W. (2016). Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. *Journal of Sensors*, 5451821, 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5451821>.
14. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., and Bobrov Y. (2024). Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
15. Pettinelli E., Vannaroni G., Cereti A., Pisani A. R., Paolucci F., D. Del Vento, Dolfi D., Riccioli S., Bella F. (2005). Laboratory investigations into the electromagnetic properties of magnetite/silica mixtures as Martian soil simulants. *Journal of geophysical research*, 110, E04013. <https://doi.org/10.1029/2004JE002375>.
16. Guèguen Y. and Palciauskas V. (1994), *Introduction to the Physics of Rocks*, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J.
17. Klein K., and Santamarina J. C. (2000). Ferromagnetic inclusions in geomaterials: Implications, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(2), 167–179.
18. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A. and Bobrov Ye. (2023). Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 21(1), 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
19. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., and Bobrov Ye. (2023). Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, 57(1), 88-95.
20. Eddy Current. <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/eddycurrent.html>.

Morkun N.V., Loria M.G., Hryshchenko S.M., Oliinyk T.A. Modelling the procedure for determining the characteristic features of mineralogical varieties of iron ore in the process of drilling wells

Well drilling is the most common and resource-intensive technological operation in the extraction of minerals. The economic efficiency of this operation directly depends on the quality of automated process control, which, in turn, is determined by the completeness of its information support. The main factor affecting the results of the drilling process is the correspondence of the speed of well penetration and the resulting control actions to the physical and mechanical characteristics of

the rock or its mineralogical varieties. A method is proposed to improve the efficiency of the procedure for determining the characteristic features of mineralogical varieties of iron ore in the process of drilling wells based on the simulation of the conversion of a probing electromagnetic signal in the studied environment using Simscape® physical modeling blocks for Simulink®/MATLAB®. The approach used is based on the use of an electromagnetic transducer that generates a probing pulse in iron-bearing rock with certain electrical and magnetic properties. As a result, eddy currents are formed in the studied medium, which create an induced magnetic field, affecting parameters such as the voltage on the measuring coil or its impedance. The electromagnetic properties of the medium material affect the distribution of these induced eddy currents, which changes the parameters of the measuring coil compared to the reference material. During the modeling process, the parameters of the signal measured on the secondary winding of the electromagnetic transducer were determined when the characteristics of the studied medium changed. At the same time, changes in the ratio of minerals in the composition of iron ore varieties were simulated. Analysis of the results obtained shows their strong dependence on the magnetite content in the studied medium. This complicates the recognition of iron ore varieties that include other weakly magnetic minerals with low electrical conductivity. To obtain satisfactory results from this procedure, it is necessary to include additional characteristic features of the physical properties of the object being recognized, which primarily include the parameters of the propagation of ultrasonic waves formed during the formation of an electromagnetic pulse in ferromagnetic rock.

Keywords: *drilling, model, control, automation, characteristics, electromagnetic converter.*

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Лорія Марина Геннадіївна – д-р техн. наук, проф., професор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua.

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.наук., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Державний податковий університет (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com.

Олійник Тетяна Антоліївна – д-р техн. наук, проф., завідувачка кафедри збагачення корисних копалин і хімії Криворізького національного університету (Кривий Ріг), zkkh@knu.edu.ua.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-52-60>

УДК 621.33:629.4

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОЇ СИТЕМИ ПРОМИСЛОВОГО АКУМУЛЯТОРНОГО МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВУ

Рябов Є.С., Качан А.В.

REASONING FOR THE PARAMETERS OF THE TRACTION SYSTEM OF AN INDUSTRIAL SHUNTING BATTERY LOCOMOTIVE

Riabov Ye.S., Kachan A.V.

Стаття присвячена визначенню та обґрунтуванню параметрів тягової системи промислового маневрового акумуляторного локомотиву, застосування якого на промислових підприємствах дозволить оновити локомотивного парк з недостатньо ефективними тепловозами. Ключовим при використанні таких локомотивів є зменшення витрати паливно-енергетичні ресурси та технічне обслуговування, а також зменшення шкідливих викидів. Для визначення параметрів тягової систем виконано аналіз параметрів режимів роботи наявних маневрових тепловозів за даними бортових систем. Опрацьовано дані з тепловозів ЧМЕЗ, які використовуються для маневрової роботи на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат». Визначено, що споживання енергії за дванадцятигодинну зміну становить від 404 кВт·год до 1031 кВт·год при максимальній дотичній потужності 250 кВт. При вказаному споживанні енергії ємність накопичувача енергії становить 1022...1874 кВт·год. Розрахунки параметрів накопичувача енергії з літій-залізо-фосфатними комірками показують, що маса комірок складає 5,8...10,7 т, а об'єм, необхідний для їх розміщення – 2,9...4,9 м³. Для розміщення накопичувачів з такими масо-габаритними параметрами, а також іншого електрообладнання, необхідний відповідна конструкція локомотиву. Потужність накопичувача енергії становить 511...937 кВт, що дозволяє використати локомотив для вивізної роботи, яка характеризується дотичною потужністю не вище 420 кВт.

Для забезпечення енергетичної ефективності тягового електроприводу доцільне використання накопичувача енергії з найбільшою напругою 600 В. Це дозволяє здійснити безпосереднє підключення перетворювачів допоміжних систем до

накопичувача. Для цього випадку запропоновано структурну схему тягової системи.

*Розглянуто енергетичні показники тягового колекторного та асинхронного електроприводу. При використанні тягових асинхронних електродвигунів у поєднанні з двоступінчастими редукторами очікується підвищення ККД як тягового електроприводу, так і зменшення споживання енергії на охолодження тягових електродвигунів. При використанні асинхронного тягового електроприводу можливе створення чотиривісного локомотиву, в тому числі, при модернізації наявних екіпажних частин серійних маневрових локомотивів. Наведено 3D-ескізи розміщення обладнання на акумуляторному локомотиві та візка з двома обмотореними осями на прикладі тепловозу ЧМЕЗ. **Ключові слова:** тягова система, накопичувач енергії, електродвигун, енергоефективність, локомотив, тяговий рухомий склад*

Вступ. На промислових підприємствах розповсюджене використання залізничного транспорту у технологічних процесах. Для переміщення вагонів використовуються серійні маневрові тепловози серій ЧМЕЗ, ТЕМ2, ТГМ4, ТГМ4. Аналіз умов експлуатації показує, що в багатьох випадках технічні характеристики цих локомотивів вищі, ніж потрібно для їх експлуатації на промислових підприємствах. Це призводить до підвищених витрат на експлуатацію локомотивного парку, технічне обслуговування та ремонт тягового рухомого складу. З урахуванням технічного зносу наявних тепловозів необхідна їх заміна. Традиційною є модернізація тепловозів із застосуванням сучасного дизельного двигуна. Це достатньо

суттєво скорочує споживання дизельного пального, на придбання якого припадає значна частина експлуатаційних витрат. Альтеративним варіантом є використання акумуляторних локомотивів, використання яких забезпечує практично нульові викиди шкідливих речовин, а також може суттєво знизити витрати на енергетичні ресурси. На сьогодні акумуляторні локомотиви виготовляються серійно і доступні для комерційної експлуатації.

Аналіз поточної ситуації. На сьогодні акумуляторні локомотиви виготовляються серійно і доступні для комерційної експлуатації. Компанія Progress Rail розробила акумуляторний локомотив EMD Joule, який може використовуватися у якості маневрового [1] (рис.1а). Прикладом застосування акумуляторного локомотиву EMD Joule є його використання компанією Pacific Harbor Line (США, м. Лос-Анджелес). Компанія прийняла рішення стати першою компанією в США з нульовим рівнем викидів CO₂. Для цього було введено в експлуатацію акумуляторний локомотив SD40JR виробництва Progress Rail (Caterpillar), ємність літій-іонних батарей якого становить 2,4 МВт·год, а потужність – 3000 к.с. Локомотив використовується з травня 2023 року для маневрово-вивізної роботи в порту Лос-Анджелеса та перевезення великовагових вантажів. Для заряджання батарей використовується зворотній пантограф потужністю 700 кВт, який розташований у місці обслуговування локомотива в порту Лос-Анджелеса. Зарядка локомотива триває близько 3 годин.

Акумуляторний локомотив FLXdrive пропонує компанія Wabtec [2] (рис.3). Його маневрові версії можуть бути шестивісними з потужністю 1700 кВт та акумулятором ємністю 2,7 МВт·год та чотиривісні з потужністю 700 кВт з акумулятором ємністю 1,2 МВт·год [3].

Компанія CRRC розробила акумуляторні локомотиви різного призначення [4-6]. Локомотив NXY (рис.1в) обладнаний тяговим акумулятором на LFP-комірках ємністю 1200 кВт год. Потужність локомотиву – 1500 кВт. Локомотив може здійснювати рух з поїздом масою 1200 т на відстань 128 км.

Компанія Express Service виготовляє акумуляторні локомотиви-штовхачі [7]. Найпотужнішим є локомотив ES3000 потужністю 90 кВт з акумулятором ємністю 220 кВт·год (рис.1г).



а



б



в



г



д

Рис.1. Акумуляторні локомотиви:
а – EMD Joule, б – FLXdrive, в – NXY, г – ES3000,
д – ECOMO (фото з мережі Інтернет)

Японський перевізник J-TREC використовує акумуляторні локомотиви ECOMO (HEZF-55LPC) для маневрово-вивізної роботи [8] (рис.1д). Розробкою акумуляторних локомотивів займаються компанії Clayton Equipment [9], Medha [10] та інші. Варто відзначити, що тягові акумуляторні батареї також використовуються у гібридних (комбінованих) енергетичних установках локомотивів [11] та як джерела енергії при автономному русі для моторвагонного рухомого складу [12,13].

Таким чином, використання акумуляторних локомотивів достатньо розповсюджене. Ключовими перевагами від їх використання є відсутність шкідливих викидів на місці експлуатації та зменшення експлуатаційних витрат. Параметри та конструкції акумуляторних локомотивів варіюються в широкому діапазоні і адаптовані до умов експлуатації.

Метою роботи є визначення та обґрунтування параметрів тягової системи акумуляторного маневрового локомотиву для вітчизняних промислових підприємств. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- аналіз режимів експлуатації маневрових локомотивів на промислових підприємствах;
- визначення та обґрунтування параметрів тягової системи промислового маневрового акумуляторного локомотиву.

Виклад основного матеріалу дослідження.

На вітчизняних промислових підприємствах використовуються маневрові тепловози з електричною передачею потужності ТЕМ2 та ЧМЕЗ. Аналіз режимів роботи локомотивів, які отримані з бортових систем тепловозу, показує, що тепловози, які виконують маневрові роботи, працюють на позиціях контролера машиніста не вище третьої. У табл.1 наведено розподіл відносної тривалості роботи протягом 12 годинних змін, отримані при обробці даних з тепловозу ЧМЕЗ, який експлуатується на ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

Таблиця 1

Розподіл відносної тривалості роботи маневрового тепловозу ЧМЕЗ по позиціям контролера машиніста на промисловому підприємстві

Позиція контролера машиніста	Зміна 1	Зміна 2	Зміна 3	Зміна 4
0	59,4	56,1	67,6	54,8
1	13	18,9	15	15,8
2	12,8	17,7	12,3	18,2
3	5,5	4,4	5,1	6,3
4	2,6	0,8	0	1,4
5	2	0,9	0	1,4
6	1,2	1,2	0	1,8
7	3,1	0	0	0,1
8	0	0	0	0,1

Як видно з даних табл.1, найбільш тривалі режими роботи припадають на 1, 2 та 3 позиції контролера машиніста. Вищі позиції контролера машиніста часто не використовуються.

Енергія, яка споживається протягом зміни, може бути визначена за виразом

$$E = T \left(\alpha_0 P_{oc0} + \sum_{i=1}^8 (\alpha_i (P_i + P_{oci})) \right) \quad (1)$$

де T – тривалість зміни, рівна 12 год;

α_0 – відносна тривалість роботи на холостому ході;

P_{oc0} – потужність допоміжних систем на холостому ході;

α_i – відносна тривалість роботи на i -й позиції контролера машиніста;

P_i – потужність на клеммах тягового генератора на i -й позиції контролера машиніста;

P_{oci} – потужність допоміжних систем на i -й позиції контролера машиніста.

У табл.2 наведено результати розрахунків спожитої енергії за зміну. При розрахунках прийнято, що потужність допоміжних систем на холостому ході складає 5 кВт, а потужність допоміжних систем на кожній позиції контролера машиніста становить 15% від потужності на тягу. При розрахунках використовувалися значення потужності на позиціях контролера машиніста, наведені у [14].

Таблиця 2

Результати розрахунків спожитої енергії

Зміна	Спожита енергія, кВт·год
1	1031
2	640
3	404
4	808

Як видно з даних табл.2, споживання енергії за зміну може змінюватися достатньо суттєво. Розрахунки параметрів накопичувача за [15] наведено у табл.3. При розрахунках прийнято, що найбільша напруга становить 600 В. SOC-window прийнято 10...90%, що виключає роботу накопичувача на суттєво нелінійних ділянках зарядно-розрядних характеристик. Зменшення ємності комірок протягом терміну служби прийнято рівним 20%. Для розрахунків обрано LFP-комірки EVE MB30 [16].

З даних табл.3 слідує, що ємність накопичувача практично удвічі перевищує спожиту енергію. Основною причиною цього є те, що при визначенні ємності накопичувача необхідно враховувати деградацію комірок протягом терміну служби. Втім, на початку терміну служби це дає підвищену ємність накопичувача.

Таблиця 3

Параметри накопичувача енергії

Спожита енергія, кВт·год	Ємність накопичувача, кВт·год	Потужність накопичувача, кВт	Маса комірок, т	Об'єм комірок, м ³	Найбільша напруга, В	Найменша напруга, В
1031	1874	937	10,7	4,9	600	554
640	1363	681	7,8	3,6	600	553
404	1022	511	5,8	2,9	600	552
808	1533	766	8,8	4,0	600	554

З табл.3 слідує що напруга накопичувача енергії буде змінюватися у діапазоні 550...600 В. Це дозволяє як тяговий електропривод, так і допоміжні перетворювачі безпосередньо підключити до накопичувача енергії. Однак зниження напруги накопичувача має бути враховано при визначення параметрів тягового електроприводу. Зміна напруги складає 8,3%, що є допустимим для живлення допоміжних систем, зокрема, допоміжних асинхронних електродвигунів.

При використанні у накопичувачі вказаних комірок з Р-рейтингом 0,5, величина потужності накопичувача становить половину величини ємності (табл.3). Це означає, що при ємності накопичувача енергії, рівній 1500 кВт·год, його потужність може становити 750 кВт. З урахуванням потужності, яка споживається допоміжними системами та ККД тягового електроприводу, дотична потужність локомотиву може становити близько 500 кВт.

Аналіз параметрів режимів експлуатації показує, що найбільш тривалі режими роботи при маневрових операціях здійснюються не вище 4 позиції контролера машиніста з дотичною потужністю близько 250 кВт. З тягових характеристик тепловозу ЧМЕЗ слідує, що сила тяги при русанні тепловозу на 4 позиції контролера машиніста становить 310 кН. Ці величини можна вважати достатніми для виконання маневрової роботи. В [17] також визначено, що при виконанні вивізної роботи дотична потужність складає близько 420 кВт. При використанні накопичувача енергії потужністю 750 кВт, дотична потужність локомотиву може становити близько 650 кВт. Тобто акумуляторний локомотив з таким накопичувачем може використовуватися і для вивізної роботи. Однак підвищувати дотичну потужність не доцільно, оскільки в експлуатації вона навряд чи буде затребувана, але це призведе до зростання вартості тягового електроприводу. Тому дотична потужність прийнята 450 кВт. Втім заряджання

накопичувача може здійснюватися з потужністю 750 кВт, що скоротить тривалість заряджання.

Для забезпечення сили тяги при русанні, рівної 310 кН, необхідне використання шестивісного локомотиву з тяговими колекторними електродвигунами або чотирівісного локомотиву з тяговими асинхронними електродвигунами (або іншими електродвигунами змінного струму).

На рис.2 показана структурна схема тягової системи локомотиву з електродвигунами змінного струму, в якому тяговий електропривод та блок допоміжних перетворювачів приєднані безпосередньо до накопичувача енергії. Передбачається повільне живлення тягових електродвигунів. Для заряджання накопичувача енергії можуть використовуватися стаціонарні зарядні пристрої з 800-вольтовою архітектурою, а також накопичувач енергії заряджається при електродинамічному гальмуванні.

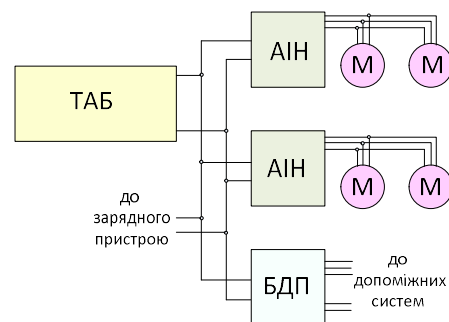


Рис.2. Структурна схема акумуляторного локомотиву:

ТАБ – тягова акумуляторна батарея (накопичувач енергії); АІН – автономний інвертор напруги; М – тяговий асинхронний двигун; БДП – блок допоміжних перетворювачів

Можливим варіантом створення акумуляторного локомотиву є модернізація наявних застарілих тепловозів. На рис.3 показано 3D-ескіз акумуляторного локомотиву, який може бути створений на основі епкіжної частини тепловозу ЧМЕЗ. Ескізне проектування показало,

що у великому капоті можливе розміщення накопичувача енергії ємністю 1500 кВт. Це забезпечує робочу енергоемність близько 1200 кВт·год на початку експлуатації накопичувача, тобто такий накопичувач забезпечить виконання маневрової роботи за сценаріями, які відповідають витратам енергії протягом досліджуваних змін.

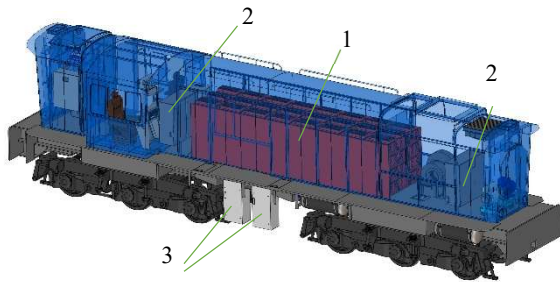


Рис. 3. Компонування обладнання акумуляторного локомотиву на основі тепловозу ЧМЕЗ:
1 – накопичувач енергії, 2 – тягові перетворювачі;
3 – перетворювачі допоміжних систем

Аналіз параметрів тягового електродвигуна ТЕ006, який використовується на тепловозів ЧМЕЗ, показує, що у маневрових режимах роботи при русі з низькими швидкостями та низькою потужністю ККД електродвигунів може складати 50...70% [18]. При більш високих швидкостях, ККД зростає до 90%. Подібні величини ККД показують розрахунки для електродвигуна ЕД118А, яким обладнано тепловози ТЕМ2. Тому можна вважати, що колекторний тяговий електропривод буде мати низьку енергоефективність у маневрових режимах. У випадку модернізації наявних тепловозів можливе встановлення двох обмотованих осей на тривісних візках. На рис.4 наведено 3D-ескіз візка тепловозу ЧМЕЗ з двом електродвигунами та двоступінчастим редуктором, який має високе передатне відношення. Це підвищує енергоефективність тягового електроприводу [19]. Для компонування мотор-редукторного блоку обрано редуктор ТКН 22,5-220 виробництва Ganz Motor Kft [20]. Цей редуктор може виконуватися з передатним відношенням 9,4 та застосовуватися на локомотивах з осьовим навантаженням 22,5 т. Найбільша частота обертання асинхронних тягових електродвигунів може досягати 4000 об/хв і вище. При діаметрі ведучих коліс 1,05 м, передатному відношенні 9,4 найбільша швидкість руху локомотиву складе близько 85 км/год. Це відповідає вимогам щодо транспортної швидкості промислових локомотивів [21].

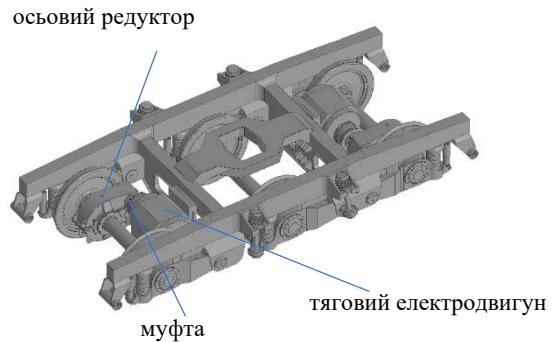


Рис. 4. Візок тепловозу ЧМЕЗ з двома обмотованими осями

При вказаних параметрах осьового редуктора і діаметрі ведучих коліс при силі тяги при русанні з місця, рівній 310 кН. Важливою особливістю електродвигунів змінного струму є можливість їх достатньо тривалого використання з параметрами, близькими до пускових режимів. З урахуванням певного зниження коефіцієнту зчеплення при зростанні швидкості, сила тяги тривалого режиму може бути прийнята на рівні 280 кН, що становить близько 90% від пускової. Це відповідає рекомендаціям [21] щодо величин сили тяги промислового локомотиву.

У табл.4 наведені розрахункові параметри трифазного шестипольного тягового асинхронного електродвигуна для акумуляторного локомотиву. При розрахунках приймалося, що напруга нпроміжного контуру становить 550 В, що відповідає найнижчій напрузі накопичувача енергії. Розрахунки електродвигуна виконані за [22]. Допустимі габаритні розміри визначені з ескізу компонування мотор-редукторного блоку та візка.

З даних табл. 4 слідує, що ККД запропонованого тягового асинхронного електродвигуна у маневровому та вивізному режимі роботи вищий, ніж ККД колекторного двигуна.

Важливим наслідком використання тягових асинхронних електродвигунів є суттєве зниження потужності мотор-вентиляторів охолодження електродвигунів. За результатами розрахунків запропонованого тягового асинхронного електродвигуна, витрата охолоджуючого повітря на один електродвигун має становити 0,35...0,4 м³/с при тиску близько 400 Па. Таким параметрам, наприклад, задовольняє вентилятор ВР 88-75 (ВЦ 4-75) №3,15, який комплектується електродвигуном потужністю 1,1 кВт. Натомість для охолодження серійного тягового електродвигуна ТЕ006 потрібен вентилятор з електродвигуном

Таблиця 4

Розрахункові параметри тягового асинхронного електродвигуна при синусоїдальному живленні

Параметр	Режим роботи		
	Маневровий (дотична потужність 250 кВт, сила тяги 280 кН)	Вивізний (дотична потужність 500 кВт, сила тяги 280 кН)	Вивізний (найбільша експлуатаційна швидкість 40 км/год)
Потужність електродвигуна, кВт	65	115	130
Лінійна напруга, В	175	285	420
Частота напруги, Гц	8,1	14,0	97
Частота обертання ротора, об/хв	154	271	1906
Фазний струм, А	290	290	175
Момент на валу, Нм	4050	4050	575
ККД, %	83,5	90,0	93,5
Коефіцієнт потужності, ч.о.	0,9	0,9	0,95

потужністю 5...6 кВт. Тобто використання тягових асинхронних електродвигунів, які мають вищу енергоефективність, призводить до суттєвого зменшення витрат енергії для їх охолодження.

Як вказувалося вище, ключові ефекти від використання акумуляторного локомотиву полягають у зменшенні шкідливих викидів та зниженні витрат на паливно-енергетичні ресурси. Для оцінки та порівняння проведено визначення витрат та викидів для однієї зміни, протягом якої споживається 800 кВт·год. На сьогодні, вартість електроенергії для промислових підприємств складає близько 10 грн/кВт·год. Тобто витрати на енергоресурси протягом зміни оцінюються у 8 тис.грн. Середні викиди CO₂ для електроенергії становлять 0,278 кг/кВт·год [23]. Тоді загальні викиди CO₂ складуть 222,4 кг.

Для виробництва енергії величиною 800 кВт·год при роботі дизельного двигуна з середньою питомою витратою пального, рівною 0,22 кг/кВт·год, споживається 176 кг дизельного пального. При вартості дизельного пального 58 грн/л, витрати складуть загальна вартість на сьогодні складає близько 12 тис. При спалюванні одного кілограма дизельного пального виділяється 3,14 кг CO₂, тобто буде виділено 552,6 кг CO₂. Як бачимо з наведеного, при експлуатації акумуляторного локомотиву витрати на паливно-енергетичні ресурси нижчі у 1,5 рази, викиди CO₂ менші у 2,5 рази. Для подальшого зменшення витрат на енергоресурси необхідне впроваджувати заряджання акумулятора від джерел енергії з низькою вартістю, а зменшення шкідливих

викидів потребує використання «зелених» джерел енергії.

За результатами аналізу, розрахунків та узагальнення робіт інших дослідників у табл.5 наведено технічні параметри акумуляторного локомотиву для промислових підприємств.

Таблиця 5

Технічні параметри акумуляторного локомотиву

Параметр	Значення
Рід служби	Маневрово-вивізний
Ємність накопичувача енергії, кВт·год	>1000
Потужність (дотична), кВт	450
Тривала сила тяги, кН	250...280
Експлуатаційна швидкість, км/год	40
Транспортна швидкість, км/год	80
Тип тягового електроприводу	асинхронний
Кількість обмоторених осей	4
Осьове навантаження, кН (т)	196,2...225,6(20...23)

Таким чином, проведений аналіз та розрахунки показують можливість та доцільність створення акумуляторного локомотиву для вітчизняних промислових підприємств.

Висновки. Оновлення локомотивного парку промислових підприємств є необхідним для стабільного функціонування багатьох виробничих процесів. Для цього може бути використаний тяговий рухомий склад із

живлення від бортових накопичувачів енергії. Використання такого рухомого складу зменшує витрати на паливно-енергетичні ресурси та зменшує шкідливі викиди.

На основі аналізу параметрів режимів руху маневрових локомотивів визначено параметри акумуляторного локомотиву. Для роботи на промислових підприємствах необхідний чотиривісний локомотив з дотичною потужністю 450 кВт. Сила тяги тривалого режиму має становити не менше 250 кН. Локомотив з такими параметрами може застосуватися для маневрової і вивізної роботи. Ємність бортового накопичувача енергії – не менше 1000 кВт·год, чого достатньо для руху протягом дванадцяти годинної зміни для більшості варіантів використання локомотиву для маневрової роботи. Для зменшення кількості обладнання доцільне використання бортового накопичувача з найбільшою напругою 600 В.

Для підвищення енергетичної ефективності тягового електроприводу він має виконуватися на основі електродвигунів змінного струму, зокрема, асинхронних. У випадку модернізації наявних шестивісних маневрових локомотивів можливе використання чотирьох обмоторених осей (по дві на візку) з мотор-редукторними блоками з двоступінчастими редукторами та тяговими асинхронними електродвигунами. Проект такого локомотиву з використанням кузова і екіпажної частини тепловозу ЧМЕЗ наведено у дослідження.

Література

- EMD® JOULE BATTERY ELECTRIC LOCOMOTIVES. URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/Locomotive/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (дата звернення: 15.11.2025)
- FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/FLXdrive> (дата звернення: 15.11.2025)
- FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline> (дата звернення: 15.11.2025)
- Traction & Rolling Stock Vale takes delivery of CRRC battery locomotive. URL: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/vale-takes-delivery-of-crcc-battery-locomotive/61495.article> (дата звернення: 15.11.2025)
- CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. URL: <https://www.railjournal.com/technology/crcc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/> (дата звернення: 15.11.2025)
- The new shunting locomotive XNY with battery traction. URL: <https://www.railway.supply/en/the-new-shunting-locomotive-xny-with-battery-traction/> (дата звернення: 15.11.2025)
- Battery Locomotives URL: <https://lz1866.com/battery-locomotives> (дата звернення: 15.11.2025)
- Japan: Hokuriku liefert hellblaue und gelbe Rangierloks an J-TREC. URL: <https://www.lokreport.de/news/uebersee/item/42036-japan-hokuriku-liefert-hellblaue-und-gelbe-rangierloks-an-j-trec.html> (дата звернення: 15.11.2025)
- Battery Locomotives & Hybrid Rail Shunters URL: <https://claytonequipment.co.uk/metro-mainline/battery-locomotives/> (дата звернення: 15.11.2025)
- Battery Electric Locomotive (BEL) URL: <https://medhatransportation.com/assets/files/MBL%20flyer%20editable.pdf> (дата звернення: 15.11.2025)
- Alstom Platform H3 / H4 SBB Aem 940 Lokomotive. URL: <https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf> (дата звернення: 15.11.2025)
- Lightweight and flexible: FLIRT. URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> (дата звернення: 15.11.2025)
- Mireo Plus – a powerful train becomes even more powerful. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (дата звернення: 15.11.2025)
- Правила капітальних ремонтів КР-1, КР-2 тепловозів серії ЧМЕЗ, ЧМЕЗТ, ЧМЕЗЕ (ЦТ-0124), які затверджені наказом Укрзалізниці від 13.12.2005 № 691-ЦЗ. URL: https://uz.gov.ua/about/technical_and_social_policy/repair_docs/ndi/ (дата звернення: 15.11.2025)
- Riabov I., Kachan A. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*, 2025, 27, 105881 doi: 10.1016/j.rineng.2025.105881
- EVE Energy URL: <https://www.evemall.eu/power-battery/prismatic-lfp-cell> (дата звернення: 15.11.2025)
- Рябов Є.С., Якунін Д.І., Рой С.В., Яготін В.О., Качан А.В. Визначення параметрів plug-in гібридної тягової системи для промислового маневрового локомотиву. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2024. №2(18). С.63-68. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08>
- Шайда В. П., Юр'єва О. Ю., Лисенко Є. В., Сич О. А. Підвищення енергетичної ефективності

- тягового колекторного електроприводу для маневрових тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2024, 2(18). С.77-82. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.10>
19. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębiowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ЧМЕ3, ČKD S200). *Energies* 2022, 15, 317. <https://doi.org/10.3390/en15010317>
 20. Axle drives ТЕН 22,5 / ТКН 22,5 URL: <https://www.ganzmotor.hu/product/axle-drives/axle-drives-teh-225-tkh-225/> (дата звернення: 15.11.2025)
 21. Немілостивий В.О., Донченко А.В., Павленко Ю.С., Бойко В.О., Леонтев В.М. Дослідження та розробка технічних вимог до нового маневрового тепловоза потужністю 750-800 к.с. для експлуатації у залізничних господарствах підприємств промисловості України. *Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». Рейковий рухомий склад*. 2020, №8. С.17-24
 22. Циценков Д.В., Иванов О.Б., Бобров О.В., Кузнецов В.В., Артемчук В.В., Баб'як М.О. Проектування електричних машин: навч. посіб. ; *Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Д. : НТУ «ДП»*. 2020. 408 с.
 23. Коефіцієнт викидів парникових газів для виробництва та споживання електроенергії URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (дата звернення: 15.11.2025)
- ### References
1. EMD® JOULE BATTERY ELECTRIC LOCOMOTIVES. URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/Locomotive/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (data zvernennia: 15.11.2025)
 2. FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/FLXdrive> (data zvernennia: 15.11.2025)
 3. FLXdrive™ BATTERY-ELECTRIC LOCOMOTIVE TECHNOLOGY. URL: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline> (data zvernennia: 15.11.2025)
 4. Traction & Rolling Stock Vale takes delivery of CRRC battery locomotive. URL: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/vale-takes-delivery-of-crcc-battery-locomotive/61495.article> (data zvernennia: 15.11.2025)
 5. CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. URL: <https://www.railjournal.com/technology/crcc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/> (data zvernennia: 15.11.2025)
 6. The new shunting locomotive XNY with battery traction. URL: <https://www.railway.supply/en/the-new-shunting-locomotive-xny-with-battery-traction/> (data zvernennia: 15.11.2025)
 7. Battery Locomotives URL: <https://lz1866.com/battery-locomotives> (data zvernennia: 15.11.2025)
 8. Japan: Hokuriku liefert hellblaue und gelbe Rangierloks an J-TREC. URL: <https://www.lok-report.de/news/uebersee/item/42036-japan-hokuriku-liefert-hellblaue-und-gelbe-rangierloks-an-j-trec.html> (data zvernennia: 15.11.2025)
 9. Battery Locomotives & Hybrid Rail Shunters URL: <https://claytonequipment.co.uk/metro-mainline/battery-locomotives/> (data zvernennia: 15.11.2025)
 10. Battery Electric Locomotive (BEL) URL: <https://medhatransportation.com/assets/files/MBL%20flyer%20editable.pdf> (data zvernennia: 15.11.2025)
 11. Alstom Platform H3 / H4 SBB Aem 940 Lokomotive. URL: <https://tst-suisse.ch/files/folder.78/sbb-aem-940.pdf> (data zvernennia: 15.11.2025)
 12. Lightweight and flexible: FLIRT. URL: <https://www.stadlerail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt> (data zvernennia: 15.11.2025)
 13. Mireo Plus – a powerful train becomes even more powerful. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (data zvernennia: 15.11.2025)
 14. Pravyla kapitalnykh remontiv KR-1, KR-2 teplovoziv seriji ChME3, ChME3T, ChME3E (CT-0124), jaki zatverdzeni nakazom Ukrzaliznyci vid 13.12.2005 # 691-CZ. URL: https://uz.gov.ua/about/technical_and_social_policy/repair_docs/ndi/ (data zvernennia: 15.11.2025)
 15. Riabov I., Kachan A. Selection of energy storage for an industrial battery locomotive. *Results in Engineering*, 2025, 27, 105881 doi: 10.1016/j.rineng.2025.105881
 16. EVE Energy URL: <https://www.evemall.eu/power-battery/prismatic-lfp-cell> (data zvernennia: 15.11.2025)
 17. Rjabov Je.S., Jakunin D.I., Roj S.V., Jaghotin V.O., Kachan A.V.. Vyznachennja parametriv plug-in ghibrydnoji tjaghovoji systemy dlja promyslovogho manevrovogho lokomotyvu. *Visnyk Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI».Serija: Energhetychni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja*, 2024. #2(18). С.63-68. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.08>

18. Shajda V. P., Jur'jeva O. Ju., Lysenko Je. V., Sych O. A.. Pidvyshhennja energhetichnoji efektyvnosti tjaghovogho kolektornogho elektroprivodu dlja manevrovjkh teplovoziv. *Visnyk Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI»*. Serija: *Energhetichni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja*, 2024, 2(18). С.77-82. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2024.02.10>
19. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębiowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ČME3, ČKD S200). *Energies* 2022, 15, 317. <https://doi.org/10.3390/en15010317>
20. Axle drives TEH 22,5 / TKH 22,5 URL: <https://www.ganzmotor.hu/product/axle-drives/axle-drives-teh-225-tkh-225/> (data zvernennia: 15.11.2025)
21. Nemilostivj V.O., Donchenko A.V., Pavlenko Ju.S., Bojko V.O., Leontjev V.M. Doslidzhennja ta rozrobka tekhnichnykh vymogh do novogho manevrovogho teplovoza potuzhnistju 750-800 k.s. dlja ekspluataciji u zaliznychnykh ghospodarstvakh pidprijemstv promyslovosti Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh pracj DP "UkrNDIV". Rejkovyj rukhomyj sklad*. 2020, #8. S.17-24
22. Cyplenkov D.V., Ivanov O.B., Bobrov O.V., Kuznecov V.V., Artemchuk V.V., Bab'jak M.O. Projektuvannja elektrychnykh mashyn: navch. posib. ; *Nac. tekhn. un-t «Dniprov'sjka politekhnika»*. D. : NTU «DP». 2020. 408 s.
23. Koefficient vykydiv parnykovykh ghaziv dlja vyrobnyctva ta spozhyvannja elektroenerhiji. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf (data zvernennia: 15.11.2025)

Riabov Ye.S., Kachan A.V. Reasoning for the Parameters of the Traction System of an Industrial Battery Shunting Locomotive

The article is devoted to determining and justifying the parameters of the traction system of an industrial manoeuvring battery locomotive, the use of which in industrial enterprises will allow the renewal of the locomotive fleet with insufficiently efficient diesel locomotives. The key advantages of using such locomotives are reduced fuel and energy consumption, lower maintenance costs, and reduced harmful emissions. To determine the parameters of traction systems, an analysis of the operating modes of existing

shunting diesel locomotives was performed based on data from on-board systems. Data from ChME3 diesel locomotives used for shunting at Poltava Mining and Processing Plant PJSC was processed. It was determined that energy consumption during a twelve-hour shift ranges from 404 kWh to 1031 kWh at a maximum tangential power of 250 kW. With the specified energy consumption, the capacity of the energy storage device is 1022...1874 kWh. Calculations of the parameters of an energy storage device with lithium iron phosphate cells show that the mass of the cells is 5.8...10.7 tonnes, and the volume required for their placement is 2.9...4.9 m³. To accommodate storage devices with such mass and size parameters, as well as other electrical equipment, an appropriate locomotive design is required. The power of the energy storage device is 511...937 kW, which allows the locomotive to be used for hauling work characterised by a tangential power of no more than 420 kW. To ensure the energy efficiency of the traction electric drive, it is advisable to use an energy storage device with a maximum voltage of 600 V. This allows direct connection of auxiliary system converters to the storage device. For this case, a structural diagram of the traction system is proposed.

The energy performance of traction collector and asynchronous electric drives is considered. When using traction asynchronous electric motors in combination with two-stage gearboxes, an increase in the efficiency of both the traction electric drive and a reduction in energy consumption for cooling traction electric motors is expected. When using an asynchronous traction electric drive, it is possible to create a four-axle locomotive, including when modernising the existing crew compartments of serial shunting locomotives. 3D sketches of the equipment layout on a battery locomotive and a bogie with two motorised axles are provided using the example of the ChME3 diesel locomotive.

Keywords: traction system, energy storage, electric motor, energy efficiency, locomotive, traction rolling stock

Рябов Євген Сергійович – канд. техн. наук, ст. наук. спіроб., доцент, доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків), YEVEN.RIABOV@khp.edu.ua
Качан Андрій Володимирович – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків), Andrii.Kachan@ieec.khpi.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-61-66>

УДК 681.5.015

СТАБІЛІЗАЦІЯ ЦИКЛУ СИНТЕЗУ МЕТАНОЛУ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІЧНОГО КЕРУВАННЯ ВУЗЛОМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ

Дуришев О.А

STABILISATION OF THE METHANOL SYNTHESIS CYCLE BASED ON ALGORITHMIC CONTROL OF THE COOLING AND CONDENSATION UNIT

Duryshv O. A.

У роботі досліджено вплив режимів роботи вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на стійкість та економічну ефективність циклу синтезу метанолу. Показано, що незгоджене керування апаратами повітряного охолодження, яке реалізується переважно в ручному режимі, призводить до значних температурних і гідравлічних збурень у циркуляційному контурі синтезу. Це, у свою чергу, спричиняє коливання витрат синтез-газу, зміну перепадів тиску на компресорі та зниження стабільності роботи агрегату в цілому. Проаналізовано існуючі підходи до регулювання теплообмінних процесів, зокрема застосування перетворювачів частоти для керування вентиляторними апаратами повітряного охолодження, та обґрунтовано їх обмежену ефективність і високу вартість для діючих виробництв.

Запропоновано альтернативний підхід до автоматизації вузла охолодження і конденсації, який базується на принципі компенсації збурень за входними параметрами процесу. Суть підходу полягає у використанні дискретної системи керування з алгоритмічним вибором оптимальної комбінації працюючих апаратів повітряного охолодження з урахуванням температури газопродуктової суміші на вході вузла, її витрати та температури навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє мінімізувати температурні стрибки на виході вузла, зменшити зміну перепадів тиску та забезпечити більш плавний характер перехідних процесів у циклі синтезу метанолу. Перевагою запропонованого рішення є можливість його реалізації без встановлення додаткового дорогого обладнання, виключно на базі існуючих засобів автоматизації та керування. Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності та енергоефективності діючих агрегатів синтезу метанолу.

Впровадження запропонованого підходу створює передумови для подальшої інтеграції інтелектуальних методів керування та цифрових двійників технологічних процесів, що відповідає сучасним тенденціям розвитку хімічної промисловості та концепції Industry 4.0.

Ключові слова: синтез метанолу, апарати повітряного охолодження, конденсація, автоматизація, дискретне керування, компенсація збурень.

Вступ. Виробництво метанолу посідає одне з провідних місць у структурі сучасної хімічної промисловості, оскільки метанол є універсальною хімічною сировиною та енергоносієм, що широко використовується у виробництві формальдегіду, оцтової кислоти, синтетичних палив, полімерних матеріалів, фармацевтичних продуктів і компонентів альтернативних моторних палив. У контексті глобальних тенденцій декарбонізації та переходу до більш сталих технологій метанол також розглядається як перспективний носій енергії та проміжний продукт у технологіях Power-to-X, що додатково підвищує вимоги до ефективності та надійності його промислового виробництва.

Сучасні агрегати синтезу метанолу є складними багатоконтурними технологічними системами, у яких тісно взаємопов'язані хімічні, теплові, масообмінні та гідродинамічні процеси. Навіть незначні відхилення режимних параметрів у окремих вузлах можуть призводити до каскадного поширення збурень по всьому циркуляційному контуру,

викликаючи зниження продуктивності, перевитрату енергоресурсів і погіршення якості готового продукту. Особливо чутливим у цьому відношенні є вузол охолодження і конденсації газопродуктової суміші, який виконує функцію стабілізації температурного режиму після реактора синтезу та безпосередньо впливає на умови роботи циркуляційного компресора і реакційної системи.

В умовах експлуатації діючих хімічних підприємств, зокрема в Україні, значна частина обладнання агрегатів синтезу метанолу була введена в експлуатацію десятки років тому. Такі установки, як правило, проектувалися з урахуванням технологічних та економічних реалій свого часу і не передбачали широкого використання сучасних автоматизованих систем керування. У результаті регулювання багатьох критичних параметрів, зокрема температури та ступеня охолодження газопродуктових потоків, і досі здійснюється в ручному або напівавтоматичному режимах, що істотно обмежує можливості забезпечення стабільної роботи процесу.

Додатковим ускладнюючим чинником є змінність складу та витрати синтез-газу, що надходить у цикл синтезу метанолу. Коливання параметрів вихідної сировини можуть бути зумовлені як особливостями роботи суміжних виробництв, так і змінами режимів підготовки газу. У таких умовах вузол охолодження і конденсації фактично виконує роль демпфуючої ланки, від ефективності якої залежить здатність усього агрегату адаптуватися до збурень без втрати стійкості.

Традиційні підходи до підвищення якості керування теплообмінними процесами зазвичай пов'язані з упрощенням додаткового регульовального обладнання, зокрема частотно-керованих електроприводів вентиляторів апаратів повітряного охолодження або складних багатоконтурних систем автоматичного регулювання. Однак реалізація таких рішень на діючих установках часто потребує значних капітальних вкладень, тривалих зупинок виробництва та модернізації електросилового господарства, що в умовах обмежених інвестиційних ресурсів є малореалістичним.

У зв'язку з цим актуальним науково-технічним завданням є пошук альтернативних рішень, спрямованих на підвищення стабільності та ефективності роботи агрегатів синтезу метанолу шляхом оптимального використання вже наявного технологічного та автоматизаційного обладнання. Особливий

інтерес у цьому контексті становлять алгоритмічні та програмні методи керування, які дозволяють реалізувати принципи компенсації збурень і наблизити якість дискретного керування до рівня аналогових систем без суттєвих матеріальних витрат.

Основна частина

Метою даної роботи є дослідження впливу режимів роботи вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на стабільність циклу синтезу метанолу та обґрунтування доцільності застосування дискретної системи керування, орієнтованої на вхідні параметри процесу. У роботі поставлено завдання проаналізувати механізми виникнення збурень у циркуляційному контурі, оцінити обмеження традиційних методів регулювання та запропонувати підхід, який дозволяє підвищити надійність і керованість процесу без встановлення додаткового дорогого обладнання.

Процес синтезу метанолу належить до класу безперервних багатопараметричних хіміко-технологічних процесів, які характеризуються високою чутливістю до змін температури, тиску та складу сировини. Реакція синтезу метанолу з оксидів вуглецю та водню є екзотермічною, тому ефективне відведення тепла є критично важливим для забезпечення стабільної роботи реактора, збереження активності каталізатора та досягнення заданих показників селективності і виходу цільового продукту.

Після реактора синтезу парогазова суміш з підвищеною температурою надходить у систему рекуперації тепла, а далі – у вузол охолодження і конденсації, де відбувається подальше зниження температури та конденсація метанолу. Саме на цій стадії формується температурний і гідравлічний режим циркуляційного контуру, який визначає умови роботи сепараційного обладнання та циркуляційного компресора. Будь-які відхилення в роботі вузла охолодження і конденсації безпосередньо впливають на перепади тиску в системі, витрату циркуляційного газу та співвідношення між свіжим і рециркуляційним потоками.

Технологічною особливістю розглянутого процесу є використання апаратів повітряного охолодження, які працюють у змінних кліматичних умовах і мають суттєву залежність ефективності теплообміну від температури та швидкості повітря навколишнього середовища. У зимовий період надмірне охолодження може призводити до різкого зниження температури газопродуктової суміші та збільшення

гідравлічного опору, тоді як у літній період часто виникає дефіцит холодопродуктивності, що ускладнює підтримання заданого температурного режиму.

На практиці регулювання роботи апаратів повітряного охолодження на багатьох діючих установках здійснюється шляхом дискретного вмикання або вимикання вентиляторів окремих теплообмінників. Такий підхід є простим з точки зору реалізації, однак він супроводжується значними недоліками. Зокрема, ступінчаста зміна кількості працюючих апаратів викликає різкі температурні стрибки газопродуктового потоку, які з часовим запізненням поширюються на інші вузли агрегату. Це призводить до неузгодженої роботи компресора, зміни витрати синтез-газу та виникнення тривалих перехідних процесів.

Суттєвою проблемою є також нерівномірність ефективності теплообміну в послідовно з'єднаних апаратах повітряного охолодження. Перші за ходом газу теплообмінники працюють з більшим температурним напором і, відповідно, мають вищу холодопродуктивність, тоді як останні апарати забезпечують значно менший вклад у загальний тепловий баланс. Ігнорування цієї особливості при керуванні призводить до нераціонального використання встановленої теплообмінної поверхні та ускладнює досягнення плавного регулювання температури.

Додатковим чинником, що ускладнює керування процесом, є змінність витрати та складу синтез-газу, яка обумовлена роботою суміжних технологічних ланок. Зміна концентрацій оксидів вуглецю і водню впливає на тепловий ефект реакції та температуру газу на виході з реактора, що, у свою чергу, створює збурення для вузла охолодження і конденсації. При традиційному керуванні за температурою на виході вузла ці збурення компенсуються із запізненням, коли негативний вплив уже поширився на циркуляційний контур.

Таким чином, основна проблематика процесу полягає у відсутності узгодженого та адаптивного керування вузлом охолодження і конденсації, здатного своєчасно реагувати на зміну вхідних параметрів і забезпечувати стабільність температурного та гідравлічного режимів. Це обумовлює необхідність розробки нових підходів до керування, які враховують специфіку роботи апаратів повітряного охолодження, нерівномірність їх ефективності та вплив зовнішніх і внутрішніх збурень на цикл синтезу метанолу.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється інтегрованому керуванню теплообмінними процесами у хімічних реакторних системах. Роботи останніх років [1-2] демонструють ефективність використання моделей процесу та прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC) для стабілізації температурних режимів у виробництві метанолу та інших продуктів синтез-газової хімії. Дослідження [3-4] підтверджує доцільність застосування керування за збуренням (feedforward control) у поєднанні з класичними зворотними зв'язками, що дозволяє зменшити амплітуду перехідних процесів.

Окремий напрям сучасних публікацій [5-6] присвячений оптимізації роботи апаратів повітряного охолодження з урахуванням змінних кліматичних умов та енергоспоживання. Запропоновано алгоритми дискретного та гібридного керування [7], які забезпечують наближення якості регулювання до аналогових систем без значних капітальних витрат. Також активно розвиваються підходи до цифровізації [8-9] та впровадження програмних регуляторів на базі промислових контролерів, що підвищує гнучкість та адаптивність систем автоматизації діючих установок.

У роботі запропоновано реалізувати дискретну систему керування вузлом охолодження і конденсації з орієнтацією на параметри газопродуктової суміші на вході вузла. Алгоритм керування забезпечує поетапне вмикання або вимикання апаратів повітряного охолодження з урахуванням їх індивідуальної ефективності та поточних зовнішніх умов. Це дозволяє мінімізувати сумарний температурний стрибок та забезпечити більш плавний характер регулювання.

Процес синтезу метанолу реалізується в реакторі, заповненому низькотемпературним мідь-цинк-алюмінієвим каталізатором, при робочому тиску до 5,3 МПа. Парогазова продуктова суміш, що виходить з реактора з температурою до 300 °С, надходить у трубний простір рекупераційного теплообмінника, де за рахунок теплообміну з холоднішим газосировинним потоком, що подається в реактор, її температура знижується приблизно до 150 °С.

На наступному етапі охолоджена парогазова суміш направляється у вузол охолодження та конденсації, в якому здійснюється подальше відведення тепла і конденсація метанолу при температурі не вище 60 °С. Після цього газометанольна суміш надходить у сепаратор, де

відбувається фазове розділення. Сконденсований метанол відводиться у збірник метанолу-сирцю, а газова фаза спрямовується на всмоктування циркуляційного компресора, який забезпечує подачу суміші циркуляційного та свіжого сировинного газу в реактор синтезу. Частина газу з сепаратора відводиться на установку вилучення метанолу з продувних газів; при цьому зростання витрати продувного газу за незмінної продуктивності за метанолом свідчить про зниження активності або деградацію каталізатора.

Вузол охолодження і конденсації виконаний на базі восьми апаратів повітряного охолодження типу «холодильник-конденсатор». Конструктивно апарати згруповані у дві паралельні гілки, кожна з яких містить чотири послідовно з'єднані теплообмінники. Регулювання температурного режиму конденсації парів метанолу здійснюється шляхом зміни кількості задіяних апаратів повітряного охолодження. З метою запобігання температурному перекосу між паралельними потоками газопродуктової суміші вмикання та вимикання апаратів, як правило, здійснюється попарно. За низьких температур навколишнього повітря частина вентиляторів переводиться в резервний режим, тоді як у літній період для підвищення інтенсивності теплообміну застосовується система зрошення теплообмінних поверхонь оборотною водою. Керування вентиляторів та системою зрошення здійснюється оперативним персоналом як з місцевих постів, так і дистанційно з пульта керування, розташованого в операторній.

Практика експлуатації показує, що ручне керування вузлом охолодження і конденсації призводить до неузгодженої роботи апаратів повітряного охолодження і є однією з основних причин нестабільності режиму циклу синтезу метанолу. Аналіз експлуатаційних даних підприємства свідчить, що зміна складу або витрати синтез-газу супроводжується зміною теплового режиму реактора, що, у свою чергу, призводить до коливань температури газу на виході з реактора та на вході і виході вузла охолодження і конденсації.

Зафіксувавши відхилення температури після апаратів повітряного охолодження, оператор у ручному режимі приймає рішення щодо вмикання або вимикання вентиляторів однієї чи кількох пар теплообмінників залежно від напрямку зміни температури. Такі дії викликають різкі зміни температури газопродуктового

потoku, що супроводжується зміною гідравлічного опору вузла та перепаду тиску між виходом реактора і всмоктуванням циркуляційного компресора. У результаті змінюється витрата синтез-газу, що призводить до подальшої дестабілізації роботи всього циклу синтезу.

Вмикання вентиляторів апаратів повітряного охолодження зазвичай спричиняє зниження температури газопродуктової суміші та зростання перепаду тиску у вузлі охолодження і конденсації, що веде до збільшення навантаження на компресор і зростання витрати синтез-газу. Вимикання вентиляторів, навпаки, призводить до підвищення температури і зменшення витрати газу. При цьому характерною особливістю процесу є значна тривалість перехідних режимів, які можуть тривати кілька годин.

Традиційним способом підвищення якості регулювання температури після апаратів повітряного охолодження є застосування частотно-керованих електроприводів вентиляторів. У розглянутій схемі це передбачало б установлення додаткових перетворювачів частоти для регулювання продуктивності однієї з пар апаратів з подальшим ступінчастим підключенням або відключенням інших теплообмінників. Проте такий підхід пов'язаний із значними капітальними витратами на придбання та впровадження додаткового обладнання, що є економічно недоцільним для більшості діючих підприємств. Крім того, керування за температурою на виході вузла не дозволяє запобігти поширенню збурень, оскільки регулююча дія реалізується із запізненням.

У сучасних умовах особливо актуальним є пошук рішень, спрямованих на підвищення ефективності виробництва за рахунок оптимального використання наявного обладнання. Для вузла охолодження і конденсації таким рішенням є перехід до керування за температурою парогазової суміші на вході вузла з використанням дискретної системи регулювання. Реалізація такого підходу можлива у вигляді алгоритму, що виконується на промисловому контролері або комп'ютері та використовує наявні засоби вимірювання і керування.

Спрощена функціональна схема запропонованого технічного рішення наведена на рисунку.

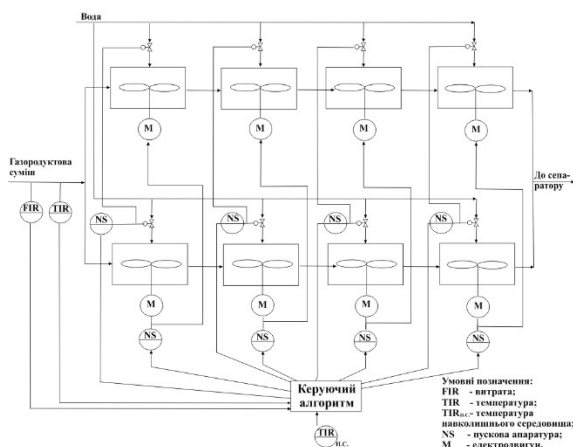


Рис. Схема автоматизації вузла охолодження і конденсації із застосуванням дискретної системи регулювання на базі керуючого алгоритму

Алгоритм керування забезпечує поетапне вмикання або вимкнення апаратів повітряного охолодження з урахуванням температури і витрати газопродуктової суміші, а за необхідності – підключення системи зрошення. Ключовим завданням при цьому є вибір таких комбінацій апаратів, які мінімізують температурні стрибки на виході вузла. Оскільки ефективність теплообміну в послідовно з'єднаних апаратах зменшується за ходом газу, алгоритм повинен враховувати різну холодопродуктивність кожного теплообмінника, а також вплив температури навколишнього повітря.

Висновки. Запропонований підхід до керування вузлом охолодження і конденсації дозволяє підвищити стабільність циклу синтезу метанолу без використання додаткового дорогого обладнання. Реалізація дискретного алгоритмічного керування на базі існуючих технічних засобів сприяє зменшенню збурюючих впливів, покращенню енергетичних та економічних показників виробництва і може бути рекомендована для впровадження на діючих агрегатах синтезу метанолу.

Литература

1. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design. – Elsevier, 2022.
2. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. Wiley, 2023.
3. Luyben W.L. Design and Control of the Methanol Synthesis Process. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020.
4. Skogestad S. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Wiley, 2021.

5. Wang L., Zhang J. Advanced Control of Heat Exchanger Networks under Disturbances. – Journal of Process Control, 2019.
6. Seraya, O.V., Demin, D.A. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data (2012) Journal of Automation and Information Sciences, 44 (7), pp. 34-48.
7. Study of the influence of the cooling and condensation unit of the gas product mixture on the operation of the methanol synthesis cycle / [S. O. Vitkovskiy, O. B. Tselishchev, M. H. Loria, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2010. No. 7 (154) Ch 2. P. 95-99.
8. Optimal control of the cooling and condensation unit of the gas product mixture in the production of methanol synthesis / [M. H. Loria, O. V. Porkuyan, O. B. Tselishchev, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2019. No. 2(250) P. 54-59.
9. Loria M.G. Finding ways to ensure the maximum efficiency of the methanol synthesis column / M.G. Loria // Bulletin of the Donbas State Metallurgical Academy. 2019. No. 2. P. 43-50.

References

1. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design. – Elsevier, 2022.
2. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. Wiley, 2023.
3. Luyben W.L. Design and Control of the Methanol Synthesis Process. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020.
4. Skogestad S. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Wiley, 2021.
5. Wang L., Zhang J. Advanced Control of Heat Exchanger Networks under Disturbances. – Journal of Process Control, 2019.
6. Seraya, O.V., Demin, D.A. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data (2012) Journal of Automation and Information Sciences, 44 (7), pp. 34-48.
7. Study of the influence of the cooling and condensation unit of the gas product mixture on the operation of the methanol synthesis cycle / [S. O. Vitkovskiy, O. B. Tselishchev, M. H. Loria, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2010. No. 7 (154) Ch 2. P. 95-99.
8. Optimal control of the cooling and condensation unit of the gas product mixture in the production of methanol synthesis / [M. H. Loria, O. V. Porkuyan, O. B. Tselishchev, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2019. No. 2(250). P. 54-59.
9. Loria M.G. Finding ways to ensure the maximum efficiency of the methanol synthesis column / M.G. Loria // Bulletin of the Donbas State Metallurgical Academy. 2019. No. 2. P. 43-50.

Duryshch O. A. Stabilisation of the methanol synthesis cycle based on algorithmic control of the cooling and condensation unit.

The paper investigates the influence of the operating modes of the gas-product mixture cooling and condensation unit on the stability and economic efficiency of the methanol synthesis cycle. It is shown that uncoordinated control of air cooling devices, which is mainly implemented in manual mode, leads to significant temperature and hydraulic disturbances in the synthesis circulation circuit. This, in turn, causes fluctuations in synthesis gas consumption, changes in pressure drops at the compressor, and a decrease in the overall stability of the unit. Existing approaches to regulating heat exchange processes, in particular the use of frequency converters to control air cooling unit fans, have been analysed, and their limited effectiveness and high cost for existing production facilities have been substantiated. An alternative approach to the automation of the cooling and condensation unit is proposed, based on the principle of compensation for disturbances in the input parameters of the process. The essence of the approach lies in the use of a discrete control system with algorithmic selection of the optimal combination of operating air cooling devices, taking into account the temperature of the gas-product mixture at the unit inlet, its flow rate and the ambient

temperature. This approach minimises temperature jumps at the unit outlet, reduces pressure drops and ensures a smoother transition in the methanol synthesis cycle. The advantage of the proposed solution is that it can be implemented without installing additional expensive equipment, using only existing automation and control systems. The results obtained can be used to improve the reliability and energy efficiency of existing methanol synthesis units.

The implementation of the proposed approach creates the conditions for the further integration of intelligent control methods and digital twins of technological processes, which is in line with current trends in the development of the chemical industry and the Industry 4.0 concept.

Keywords: *methanol synthesis, air cooling devices, condensation, automation, discrete control, disturbance compensation.*

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,

Стаття подана 08.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-67-77>

УДК 665.6

КОАГУЛЯЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МОТОРНИХ ОЛИВ

Червінський Т.І., Казимирів П.І.

COAGULATION PURIFICATION OF USED MOTOR OILS

Chervinskyi T.I., Kazymyryv P.I.

Відпрацьовані нафтові оливи є токсичними сполуками з низьким рівнем біорозкладу і становлять значну загрозу для довкілля. Особливо серйозну екологічну шкоду спричиняє їх потрапляння у ґрунти та водойми. Для відновлення властивостей відпрацьованих олив застосовують різні технологічні операції, що базуються на фізичних, хімічних і фізико-хімічних процесах, спрямованих на видалення продуктів старіння та забруднень. Однак, найбільш проблемними для процесів регенерації є обводнені відпрацьовані оливи (оливні емульсії), у складі яких міститься значний вміст води чи водних розчинів охолоджувальних сумішей, які потрапляють до олив внаслідок аварійних ситуацій. Складність регенерації обводнених олив полягає у тому, що вода, яка є у складі олив, перешкоджає проведенню фізичних методів очищення, зокрема фільтрації, відстоювання, осадження осадів, зневоднення методами атмосферно-вакуумної перегонки через стійкість водно-оливних емульсій. У роботі досліджено процес коагуляції відпрацьованої мінеральної моторної оливи у присутності різних коагулянтів, які є дешевими і доступними на вітчизняному ринку: крохмаль, карбоксиметилцелюлоза, лауретсульфат натрію та кокамідопропілбетаїн. Встановлено вплив природи та кількості коагулянтів на експлуатаційні властивості очищеної моторної оливи. Використання 10 % мас. крохмалю за 80 °C й тривалості 30 хв. дозволило здійснити повне вилучення емульгованої води з відпрацьованої оливи, зменшити вміст механічних домішок та незначно покращити вязкісно-температурні властивості оливи. Залучення у процес коагуляції карбоксиметилцелюлози дало можливість повністю вилучити з відпрацьованої оливи емульговану воду, покращити значення вязкісно-температурних властивостей, зменшити вміст механічних домішок та знизити значення кислотного числа моторної оливи. Водночас, досягнення бажаних результатів процесу коагуляції відпрацьованої моторної оливи

може бути досягнуто при використанні більше 20% мас. лауретсульфат натрію. Доведено, що коагулянт кокамідопропілбетаїн у кількості 10% мас. дозволяє практично повністю вилучити емульговану воду, незначно знизити вміст механічних домішок та покращити значення вязкісно-температурних властивостей очищеної мінеральної моторної оливи. Однак, за встановленої кількості кокамідопропілбетаїну відбувається зростання значення кислотного числа очищеної оливи. Успішне використання обраних коагулянтів для очищення відпрацьованої мінеральної моторної оливи підтверджено дослідними та ІЧ-спектроскопічними методами аналізів. Зневоднену й частково очищену мінеральну моторну оливу для відновлення її експлуатаційних властивостей необхідно скерувати на комбіновані методи регенерації.

Ключові слова: відпрацьовані оливи, старіння олив, регенерація олив, коагуляція, поверхнево-активні речовини, механічні домішки, кислотне число, ІЧ-спектр

Вступ. Екологічна безпека використання мастильних матеріалів тісно пов'язана з необхідністю утилізації відпрацьованих мастильних речовин, які сьогодні належать до найпоширеніших техногенних відходів. Вони справляють негативний вплив на всі складові довкілля — атмосферу, гідросферу та літосферу [1, 2].

Відпрацьовані моторні оливи (ВМО) є токсичними сполуками з низькою здатністю до біологічного розкладу. Забруднення ними гідросфери становить близько 20 % від загального обсягу техногенного впливу. Ці речовини накопичуються в навколишньому середовищі та з часом можуть спричинити

порушення екологічного балансу. Саме тому світова спільнота віднесла відпрацьовані нафтопродукти до категорії небезпечних відходів, які згідно з міжнародними нормами мають підлягати обов'язковому збору та утилізації, а в окремих випадках — знешкодженню. Найефективнішим методом утилізації вважається їх регенерація, що дозволяє відновити експлуатаційні характеристики. У більшості розвинених країн світу налагоджено системи збору та повторної переробки таких матеріалів не лише з екологічних міркувань, але й через їхню економічну доцільність. Відсутність подібної діяльності в тій чи іншій країні свідчить про ігнорування владними структурами ключових державних пріоритетів – охорони довкілля, збереження здоров'я населення та раціонального використання ресурсів [3, 4].

Для відновлення експлуатаційних властивостей відпрацьованих нафтових олив (ВНО) застосовують різноманітні технологічні процедури, що ґрунтуються на фізичних, хімічних та фізико-хімічних процесах і спрямовані на усунення продуктів окиснення та забруднювальних домішок. Процес очищення ВНО зазвичай передбачає послідовне проходження кількох етапів: спочатку здійснюється механічне очищення для вилучення незначної кількості води та твердих домішок, далі застосовують теплофізичні методи (атмосферна або вакуумна перегонка), після чого – фізико-хімічні способи, такі як коагуляція та адсорбція. У випадку, якщо після цих етапів очищення характеристики олив залишаються нижчими за встановлені нормативи, вдаються до хімічної регенерації, яка хоча й забезпечує глибше відновлення, водночас значно підвищує витрати та собівартість кінцевого продукту [5-10].

Однак найбільші труднощі при регенерації виникають у випадку обводнених відпрацьованих олив (емульсійного типу), які містять значну кількість води або водних розчинів охолоджувальних рідин, що потрапляють до складу олив унаслідок аварійних ситуацій [11].

Складність їх регенерації полягає в тому, що присутність води значно ускладнює застосування традиційних фізичних методів очищення — таких як фільтрація, відстоювання, осадження або атмосферно-вакуумна перегонка. Це обумовлено високою стабільністю водно-оливних емульсій.

У зв'язку з цим, у технологічних процесах відновлення таких олив необхідно впроваджувати методи, здатні ефективно відділити воду від оливної фази, щоб забезпечити подальше очищення та повноцінну регенерацію відпрацьованих мастильних матеріалів [12, 13].

На нашу думку, одним із доцільних підходів до очищення обводнених відпрацьованих моторних олив є застосування коагуляційного методу. Цей спосіб дозволяє ефективно видаляти воду з емульсій за допомогою коагулянтів на основі поверхнево-активних речовин (ПАР), які є доступними та економічно вигідними реагентами, широко представленими на ринку.

Мета роботи. Встановити можливість використання процесу коагуляції для очищення відпрацьованих мінеральних моторних олив із застосуванням доступних на вітчизняному ринку поверхнево-активних речовин з метою подальшого обґрунтування ефективного методу їх регенерації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вихідними відпрацьованими мінеральними моторними олівами (ВММО) слугували оливи марок М-10Г₂К та М-10ДМ. ВММО М-10Г₂К була отримана з служби технічного обслуговування після її заміни у картері дизельного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) вантажного автомобіля через потрапляння рідини у картер ДВЗ з системи охолодження. Для отриманої ВММО були встановлені деякі експлуатаційні показники, зокрема: кінематична в'язкість за 50°C – 64,43 мм²/с, за 100°C – 12,16 мм²/с; індекс в'язкості (ІВ) – 109; вміст води – 1,17%; кислотне число (КЧ) – 0,634 мг КОН/г; вміст механічних домішок – 0,032%. ВММО М-10ДМ була отримана з паливно-оливного парку сільськогосподарського підприємства у Львівській обл., яка була злита з картера дизельного двигуна сільськогосподарської техніки марки Т-150 після весняно-осінніх польових робіт у 2024 р. Вона характеризувалась вмістом води – 0,06%, вмістом механічних домішок – 0,062%, кінематичною в'язкістю за 50°C – 51,65 мм²/с, кінематичною в'язкістю за 100°C – 10,22 мм²/с, ІВ 88, КЧ – 2,71 мг КОН/г.

Використаними коагулянтами слугували крохмаль марки «техн.», карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) марки «техн.», лаурет сульфат натрію марки «GalaxyLES70» (SLES) та кокамідопропілбетаїн (КАПБ). Усі

вихідні речовини використовували без додаткового очищення.

Процес очищення відпрацьованої моторної мінеральної оливи із застосуванням вказаних коагулянтів здійснювали у лабораторному реакторі, обладнаному механічним перемішуванням, термометром та дозатором для введення реагенту. У реактор завантажували 100 г зразка ВММО, нагрівали до температури 80 °С, після чого, підтримуючи інтенсивне перемішування, дозовано подавали коагулянт через однакові часові інтервали у необхідній кількості відповідно до маси оливи. Тривалість процесу становила 30 хвилин. Після його завершення реакційну суміш переносили у ділильну воронку та залишали для відстоювання. Після відокремлення нижнього шару (осаду) верхній шар (очищену оливу) скеровували на фільтрацію та визначення її експлуатаційних показників згідно стандартизованих методик аналізів.

Для підтвердження ефективності очищення ВММО були записані ІЧ-спектри за допомогою спектрометра Spectrum Two FT-IR виробництва Perkin Elmer з використанням кювети із селеніду цинку товщиною 0,1036 мм. Обробка та аналіз спектральних даних проводилися за допомогою програмного забезпечення Spectrum v.10.03.06.

Як відомо, крохмаль і карбоксиметилцелюлоза широко застосовуються у процесах коагуляції. Лауретсульфат натрію та кокамідопропілбетаїн активно використовуються для приготування побутових і промислових миючих засобів. З метою встановлення методики очищення ВММО із застосуванням зазначених коагулянтів необхідно встановити вплив кількості вибраних коагулянтів на ефективність очищення відпрацьованих мінеральних моторних олив. Отримані результати проведених досліджень подано у табл. 1-4 та зображено на рис. 1-4.

Результати досліджень з вивчення впливу кількості крохмалю на процес очищення ВММО марки М-10Г₂К подано у табл. 1.

Примітки: температура процесу коагуляції – 80 °С, тривалість – 30 хв.

З отриманих результатів проведених досліджень, що подані у табл. 1 встановлено, що із збільшенням кількості крохмалю від 5 до 20% мас. не відбувається значних змін у значеннях кінематичної в'язкості й кислотного числа. Однак, відбувається зростання значення ІВ, зменшення вмісту механічних домішок та повне вилучення води з ВММО. Оптимальне значення кількості крохмалю становить 10% мас. Збільшення кількості коагулянта більше за оптимальну кількість не приводить до суттєвого покращення експлуатаційних властивостей очищеної оливи. На нашу думку, дія крохмалю полягає у здатності спричинити флокуляцію краплинок води та із зростанням його концентрації й температури сприяти утворенню гелеподібної структури, яка при відстоювання відокремлюється від оливи. Тому оптимальною кількістю крохмалю для успішного перебігу процесу очищення обводненої ВММО було обрано 10 % мас від кількості завантаженої у реактор оливи.

Для очищеної за оптимальної кількості коагулянту моторної оливи М-10Г₂К був записаний ІЧ-спектр, зображений на рис 1.

Аналіз записаного ІЧ-спектру очищеної крохмалем в кількості 10% мас. мінеральної моторної оливи М-10Г₂К, показав, що валентні коливання парафіно-нафтонових вуглеводнів були ідентифіковані в області смуг поглинання 2925-2860 см⁻¹, деформаційні коливання метильної вуглеводневої групи були підтверджені в області смуг поглинання 1450-1380 см⁻¹, вуглеводневі валентні коливання вуглецевої вуглець-вуглець групи були ідентифіковані за 1740-1725 см⁻¹.

Таблиця 1

Вплив кількості крохмалю на експлуатаційні властивості очищеної мінеральної моторної оливи М-10Г₂К

Крохмаль, % мас.	Кінематична в'язкість мм ² /с		Індекс в'язкості	Вміст води, % мас.	Кислотне число, мг КОН/г	Вміст мех. домішок, %
	50 °С	100 °С				
0	64,43	12,16	109	1,17	0,634	0,032
5	53,7	10,6	105	0,09	0,634	0,030
10	51,98	11,42	117	сліди	0,634	0,027
20	51,67	11,42	117	сліди	0,634	0,025

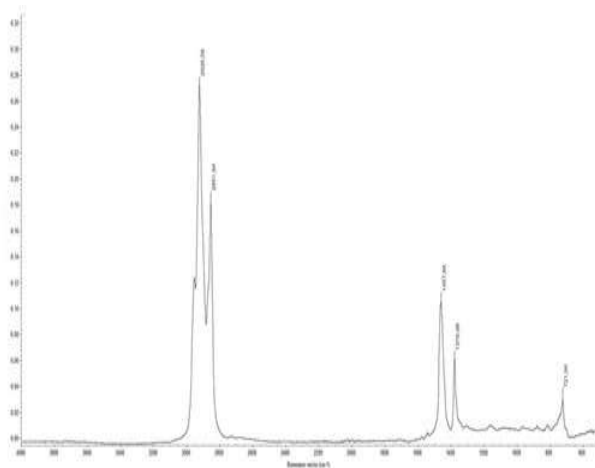


Рис. 1. ІЧ-спектр очищеної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 10% мас. крохмалю

Як зазначалось вище, при використанні оливи у ДВЗ має місце утворення первинних продуктів «старіння» (спирти, альдегіди, органічні кислоти, етери, естери, кетони). Присутність у вуглеводневому складі оливи вище перелічених груп вуглеводнів підтверджено смугами поглинання карбонільної групи C=O в області смуг поглинання за 1745-1625 cm^{-1} . Присутність органічних карбонових кислот підтверджена смугами поглинання карбоксильної групи в області 1725-1685 cm^{-1} . Відсутність води в очищеній за 10% мас. крохмалю моторній оливі М-10Г₂К було підтверджено відсутністю характерної для гідроксильної групи смуги поглинання в області 3400 cm^{-1} .

Як відомо, карбоксиметилцелюлоза є аніонним полісахаридом, який широко використовується у харчовій (загущувач, стабілізатор, емульгатор), фармацевтичній (стабілізатор суспензій та емульсій, зв'язуюча речовина у таблетках), косметичній (компонент зубних паст, гелів, кремів), нафтогазовій (компонент бурових розчинів, стабілізатор

промивних суспензій свердловин) промисловостях завдяки своїм властивостям згущувача та стабілізатора.

Вивчення впливу кількості карбоксиметилцелюлози на процес очищення ВММО М-10Г₂К здійснювали за вище описаною методикою, а отримані результати досліджень подано у табл. 2

Аналіз результатів, поданих у табл. 2, свідчить про те, що із збільшенням кількості КМЦ має місце зменшення значень кінематичної в'язкості, кислотного числа, вмісту механічних домішок. Водночас, найбільший ступінь вилучення води з ВММО М-10Г₂К був досягнутий у присутності 10% мас. КМЦ. Слід відзначити, що збільшення кількості КМЦ не значно покращувало значення експлуатаційних властивостей очищеної оливи. На наш погляд, КМЦ зв'язує краплинки води з оливи (набухає), утворюючи в'язкий гідрогель, який при відстоюванні відділився від оливи. Отже, на основі отриманих нами результатів досліджень, можемо констатувати про успішність застосування КМЦ для очищення ВММО у кількості 10% мас.

Для моторної оливи М-10Г₂К, очищеної за оптимальної кількості коагулянту КМЦ, був записаний ІЧ-спектр, який зображений на рис. 2.

Аналізуючи ІЧ-спектр очищеної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 10% мас. карбоксиметилцелюлози, зображений на рис. 2, можемо підтвердити відсутність смуги поглинання гідроксильної групи за 3210-3450 cm^{-1} . Водночас, має місце зменшення інтенсивності смуг поглинання карбоксильних груп в області 1810-1625 cm^{-1} , що свідчить про зменшення значення кислотного числа.

Отримані нами результати проведених досліджень підтверджують успішність застосування КМЦ як коагулянта для очищення відпрацьованих моторних оливи.

Таблиця 2

Вплив кількості КМЦ на експлуатаційні властивості очищеної оливи М-10Г₂К

КМЦ, % мас.	Кінематична в'язкість, mm^2/c		Індекс в'язкості	Вміст води, % мас.	Кислотне число, mg KOH/g	Вміст мех. дом., % мас.
	50°C	100°C				
0	64,43	12,16	109	1,17	0,634	0,032
5	58,86	10,79	115	0,07	0,482	0,028
10	57,28	10,61	115	сліди	0,379	0,021
20	58,36	10,8	117	сліди	0,379	0,015

Примітки: температура процесу коагуляції – 80 °С, тривалість – 30 хв.

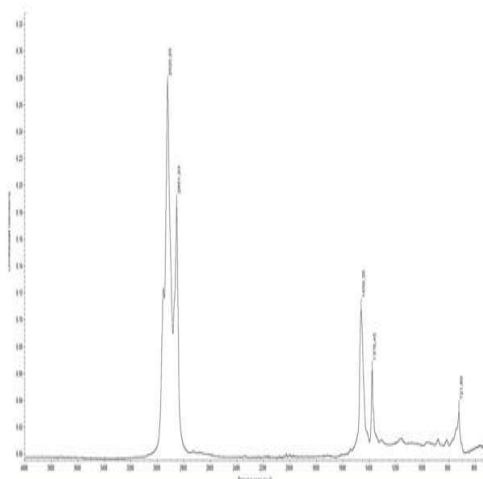


Рис. 2. ІЧ-спектр очищеної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 10 % мас. КМЦ

Як відомо, SLES – це амфіфільна ПАВ (володіє одночасно і гідрофільними і гідрофобними властивостями), що застосовується при виробництві більшості миючих засобів, шампунів, зубних паст, косметичної продукції. Встановлення можливості використання SLES як коагулянта на процес очищення ВММО М-10Г₂К здійснювали за вище поданої методикою, а отримані результати досліджень подано у табл. 3.

Аналіз результатів, поданих у табл. 3, свідчить про те, що застосування 20 % мас. коагулянту приводить до практично повного вилучення води у відпрацьованій оливі та незначного зменшення вмісту механічних домішок. Однак, використання SLES як коагулянта не знижує кислотність оливи, але навіть дещо її підвищує.

На нашу думку, зростання значень кінематичної в'язкості оливи із збільшенням кількості SLES, можна пояснити наступним твердженням: молекули коагулянту утворюють більш структуровані агрегати, такі як міцели та гідрогелі, які можуть сприяти збільшенню в'язкості, оскільки вони створюють більш зв'язану та стабільну мережу між оливною та водною фазами. Такі структури можуть значно

збільшити стійкість емульсії і змінити її реологічні властивості [15]. Зростання кількості SLES сприяє підвищенню стійкості оливної емульсії до фазового розшарування. Це пов'язано з тим, що молекули SLES здатні утримувати оливу та воду у стабільному стані, що, у свою чергу, може збільшити значення кінематичної в'язкості, оскільки всі компоненти утримуються разом у стабільній емульсії.

Зниження значень кінематичної в'язкості та вмісту води за 20 % мас. SLES можна пояснити тим, що коагулянт за достатньо високих концентрацій здатен дестабілізувати емульсію, змушуючи фазу оливи і води розшаруватися. Якщо концентрація SLES досить висока, коагулянт здатен впливати на структуру молекул, що утримують водну фазу (стабільні мікроструктури або міцели). Внаслідок цього водна фаза може бути виведена і емульсія почне розшаруватися. Водночас, за високої концентрації (20 % мас. і більше), SLES здатен спричинити утворення міцел або гелеподібних структур, що дозволяють зібрати воду в окрему фазу. Це сприятиме відокремленню води від оливи, полегшуючи її вилучення [16, 17]. Однак, збільшення кількості коагулянта впливатиме на зростання вартості процесу очищення ВММО.

Для очищеної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 20% мас. SLES був записаний ІЧ-спектр, який зображений на рис 3.

Аналізуючи і порівнюючи ІЧ-спектр очищеної мінеральної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 20 % мас. SLES із вище зображеними ІЧ-спектрами очищеної оливи іншими коагулянтами, ідентифіковано деформаційні коливання в області смуги поглинання 1150 см⁻¹, які відсутні у попередніх зображених спектрах очищеної оливи. Ця смуга коливань є характерною для естерів з асиметричними валентними коливаннями С-О-С зв'язку, що свідчить про присутність лауретсульфат натрію у вуглеводневому складі оливи. На нашу думку, це призвело до зростання значень вязкісно-температурних властивостей оливи, кислотного числа та зміни вуглеводневого складу моторної оливи.

Таблиця 3

Вплив кількості SLES на експлуатаційні властивості очищеної оливи М-10Г₂К

SLES, % мас.	Кінематична в'язкість, мм ² /с		Індекс в'язкості	Вміст води, % мас.	Кислотне число, мг КОН/г	Вміст мех. дом., %
	50°C	100°C				
0	64,43	12,16	109	1,17	0,634	0,032
5	73,19	17,72	125	0,52	0,723	0,030
10	85,85	19,15	138	0,13	0,803	0,020
20	65,72	13,35	112	сліди	0,840	0,029

Примітки: температура процесу – 80 °С, тривалість – 30 хв.

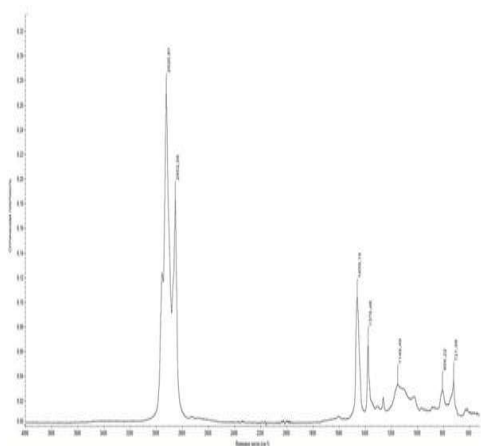


Рис. 3. ІЧ-спектр очищеної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 20 % мас. SLES

На основі отриманих результатів проведених досліджень, поданих табл. 3, можна констатувати, що SLES є ефективним коагулянтном для вилучення лише емульгованої води з відпрацьованих мінеральних моторних оливах у кількостях, більших за 20% мас.

Як відомо, кокамідопропілбетаїн – це амфотерна поверхнево-активна речовина, яку успішно використовують як підсилювач піни у миючих засобах, у косметології - як емульгатор, згущувач, антистатик в кондиціонерах для волосся, проявляє антисептичні властивості. У нафтовій промисловості КАПБ використовують у різних технологічних операціях завдяки здатності стабілізувати або, навпаки, руйнувати емульсії: як компонент бурових і тампонажних рідин, у флотаційних процесах, для зниження міжфазної напруги в системі “вода-нафта”, як коагулянт (деемульгатор) у процесах очищення нафтовмісних стічних вод тощо[18-20].

Вивчення впливу кількості КАПБ на процес очищення ВММО М-10Г₂К здійснювали за методикою, описаною вище, а отримані результати досліджень подано у табл. 4.

Аналізуючи результати, які подані у табл. 4, можемо стверджувати, що із збільшенням

кількості КАПБ відбувається незначне зростання значення кислотного числа та зниження вмісту механічних домішок. Практично повне вилучення вмісту емульгованої води в обводненій ВММО відбувається при використанні 5% мас. КАПБ. Водночас, із збільшенням кількості коагулянта відбувається зниження значень кінематичної в'язкості та ІВ. Механізм вилучення води з оливних емульсій кокамідопропілбетаїном полягає на його амфотерних поверхнево-активних властивостях, які дозволяють ефективно руйнувати стабільну міжфазну плівку між водною та оливною фазами. Після ослаблення захисної плівки, водні краплі зливаються одна з одною, утворюючи більші краплі. Надалі утворені більші краплі води утворюють окрему фазу, яка легко відділяється від оливи за допомогою відстоювання або центрифугування.

З метою підтвердження отриманих результатів був записаний ІЧ-спектр зневодненої ВММО при використанні 5% мас. КАПБ (рис. 4). У записаному спектрі були виявлені кисневмісні сполуки старіння оливи (органічні кислоти, спирти, альдегіди, кетони, етери) та підтверджено відсутність смуг поглинання гідроксильних груп, що свідчить про вилучення емульгованої води з оливи М-10Г₂К.

Нафтопереробна промисловість нашої держави випускає широкий спектр мінеральних моторних оливах як для легких автомобілів, так і для важкої техніки. Водночас широкоживаною для вітчизняних дизельних ДВЗ важкої та сільськогосподарської техніки є мінеральна моторна олива марки М-10ДМ, яка успішно виконує свої функції у дизельних двигунах. Під час її використання у ДВЗ вона зазнає усіх вище перелічених змін як і олива М-10Г₂К. Тому доцільно перевірити дію вибраного коагулянта на іншу нафтову відпрацьовану моторну оливу.

Таблиця 4

Вплив кількості КАПБ на експлуатаційні властивості очищеної оливи М-10Г₂К

КАПБ, % мас.	Кінематична в'язкість мм ² /с		Індекс в'язкості	Вміст води, %	Кислотне число, мг КОН/г	Вміст мех. дом., %
	50°C	100°C				
0	64,43	12,16	109	1,17	0,634	0,032
5	57,81	11,72	103	сліди	0,729	0,030
10	54,92	10,7	100	сліди	0,887	0,025
20	54,11	10,3	98	сліди	0,902	0,012

Примітки: температура процесу – 80 °С, тривалість – 30 хв.

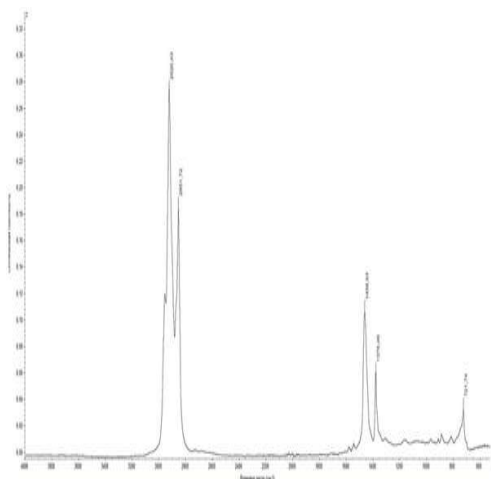


Рис. 4. ІЧ-спектр очищеної моторної оливи М-10Г₂К у присутності 10% мас. КАПБ

Процес коагуляції ВММО М-10ДМ здійснювали за вище встановлених оптимальних умов у присутності карбоксиметилцелюлози за методикою, описаною вище. Визначення експлуатаційних властивостей очищеної М-10ДМ здійснювали за стандартними методиками, а отримані результати досліджень подано у табл. 5.

Аналіз результатів досліджень, які подані в табл. 5, свідчить про зміну експлуатаційних властивостей товарної, відпрацьованої та коагульованої оливи М-10ДМ. Коагульована олива характеризується відсутністю вмісту води, більшим значенням індексу в'язкості, зменшенням кислотним числом і вмістом механічних домішків, порівняно з відпрацьованою оливою. Значення отриманих результатів досліджень підтверджені ІЧ-спектроскопічним дослідженням вихідної

(нової), відпрацьованої та коагульованої у присутності 10% мас. КАПБ оливи.

Аналізуючи ІЧ-спектри товарної та відпрацьованої оливи М-10ДМ (рис. 5) можемо відмітити, що вони різняться між собою. У спектрі вихідної товарної оливи відсутні смуги поглинання, характерні для групи С=О, що ідентифікують первинні продукти старіння оливи (спирти, етери, альдегіди, кетони тощо). Водночас, у спектрі відпрацьованої оливи ці продукти ідентифіковані смугами поглинання С=О групи при 1745-1695 см⁻¹. Наявність карбонових кислот виявлено смугою поглинання карбоксильної групи за 1720-1670 см⁻¹, чого не виявлено у спектрі товарної оливи М-10ДМ.

Присутність води у відпрацьованій оливі М-10ДМ підтверджено смугою поглинання гідроксильної групи в області 3300-3400 см⁻¹, чого не виявлено у спектрі вихідної оливи М-10ДМ.

Аналізуючи ІЧ-спектр оливи М-10ДМ після коагуляції у присутності 10% мас. КАПБ можемо помітити суттєву відмінність від вище описаних спектрів. Як бачимо, у спектрі очищеної оливи М-10ДМ зменшились інтенсивності смуг поглинання, характерних для карбоксильної групи при 1720-1670 см⁻¹. Водночас, в області 3300-3400 см⁻¹, що характеризує присутність гідроксильних груп, спостерігаємо розтягнуту явно невиражену смугу поглинання та появу інтенсивної смуги поглинання при 1043 см⁻¹ характерну для валентних коливань групи С-О, що підтверджує присутність залишкових гідроксильних груп, які б могли залишитись від непрореагованої кількості КАПБ в очищеній оливі.

Таблиця 5

Порівняння експлуатаційних властивостей товарної, відпрацьованої та очищеної у присутності КАПБ мінеральної моторної оливи М-10ДМ

Показники	Олива М-10ДМ		
	Товарна	Відпрацьована	Після коагуляції
Кінематична в'язкість, мм ² /с	60,13	51,65	56,7
	11,40	10,22	10,8
Індекс в'язкості	120	88	110
Вміст води, %	сліди	1,50	сліди
Кислотне число, мг КОН/г	1,30	2,71	0,55
Вміст мех. дом., %	0,023	0,062	0,041

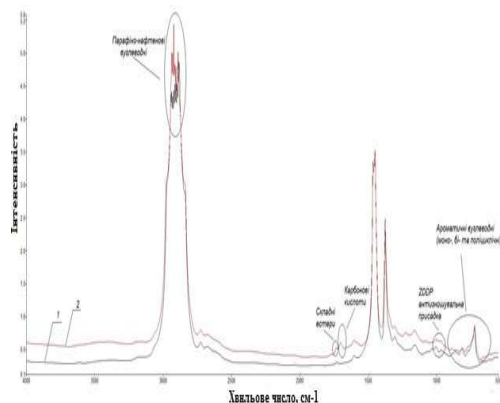


Рис.5. ІЧ-спектри вихідної (1) та відпрацьованої (2) оливи М-10ДМ

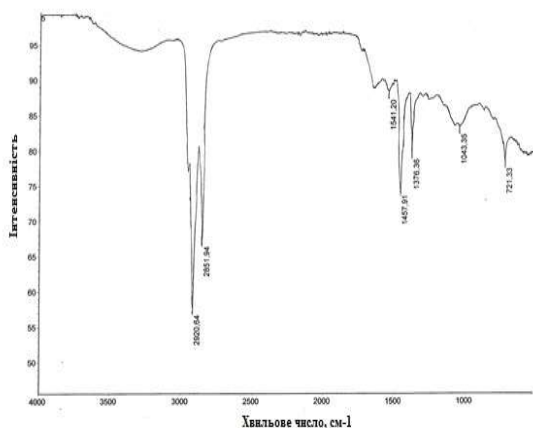


Рис. 6. ІЧ-спектр очищеної оливи М-10ДМ у присутності 10% мас. КМЦ

На основі отриманих результатів проведених досліджень можна констатувати, що використання різних за природою коагулянтів не впливає на якісний склад вуглеводневої частини очищеної оливи, однак, зниження значення кислотного числа, зменшення кількості механічних домішок та відсутність смуг коливань гідроксильних груп в записаних ІЧ-спектрах свідчить про успішність процесу коагуляції відпрацьованих мінеральних моторних оливи.

Висновки. Вивчено вплив кількості крохмалю на процес коагуляції відпрацьованої мінеральної моторної оливи М-10Г₂К. Встановлено, що за 80°C, тривалості 30 хв. та 10 % мас. коагулянта відбувається практично повне вилучення емульгованої води з ВММО, зменшення вмісту механічних домішок та незначне покращення вязкісно-температурних властивостей оливи, що підтверджено дослідним та ІЧ-спектральним методами аналізу.

Встановлено вплив кількості карбоксиметилцелюлози на процес коагуляції ВММО М-10Г₂К. Доведено, що при 10% мас. коагулянта відбувається повне вилучення емульгованої води, покращення значень вязкісно-температурних властивостей, зменшення вмісту механічних домішок та зниження значення кислотного числа. Успішність перебігу процесу очищення ВММО підтверджено дослідним та ІЧ-спектральним методами аналізу.

Доведено вплив кількості лауретсульфат натрію на процес коагуляції ВММО М-10Г₂К. Встановлено, що використання SLES у кількості 20% мас і більше забезпечує вилучення емульгованої води та не впливає на пониження значення кислотного числа та зменшення кількості механічних домішок.

Вивчено процес коагуляції ВММО М-10Г₂К у присутності кокамідпропілбетаїну як коагулянта. Доведено, що коагулянт КАПБ у кількості 10% мас. забезпечує практично повне вилучення вмісту емульгованої води, незначне зниження вмісту механічних домішок та покращення значень вязкісно-температурних властивостей очищеної ВММО. Однак, за встановленої кількості коагулянта відбувається зростання значення кислотного числа.

Для очищення ВММО методом коагуляції найбільш доцільно як коагулянт використовувати карбоксиметилцелюлозу в кількості 10% мас. за 80°C й тривалості процесу 30 хв. За встановлених оптимальних умов здійснення процесу було очищену відпрацьовану мінеральну дизельну оливу М-10ДМ. Очищена олива характеризувалась відсутністю емульсованої води, зниженим значенням кислотного числа та вмісту механічних домішок.

Для відновлення техніко-експлуатаційних властивостей ВММО після процесу коагуляції доцільно скерувати на комбіновані методи регенерації для забезпечення її повторного використання в різних галузях промисловості.

Література

1. Hrynyshyn O., Korchak B., Chervinsky T., Kochubei V. Change in Properties of M-10DM Mineral Motor Oil After Its Using in the Diesel Engine. *Chemistry & Chemical Technology*. 2017. Vol. 11, No 3. P. 387–391. doi: 10.23939/chcht11.03.387.
2. Червінський Т., Гринишин О., Корчак Б. Регенерація відпрацьованих моторних оливи в присутності карбаміду. *Вісник Національного*

- університету «Львівська політехніка». Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2015. № 812. С. 158–163.
- Korchak B., Hrynyshyn O., Chervinsky T., Polyuzhin I. Application of Vacuum Distillation for the Used Mineral Oils Recycling. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018. Vol. 12, No 3. P. 365–371. doi: 10.23939/chcht12.03.365.
 - Кузнецова О., Нетреба З. Дослідження старіння мінеральних гідравлічних олів. І. Фракційний склад. Технологічний аудит і резерви виробництва. 2015. Том 3, № 4. С. 64–68.
 - Korchak B., Grynshyn O., Chervinsky T., Shapoval P., Nagursky A. Thermooxidative Regeneration of Used Mineral Motor Oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020. Vol. 14, No 1. P. 129–134. doi: 10.23939/chcht14.01.129.
 - Dominguez-Rosado E., Pichtel J. Chemical Characterization of Fresh, Used and Weathered Motor Oil Via GC/MS, NMR and FTIR Techniques. *Proceeding of Indiana Academy Science*. 2003. Vol. 112, No 2. P. 109–116.
 - Sánchez-Alvarracín, C.; Criollo-Bravo, J.; Albuja-Arias, D.; García-Ávila, F.; Pelaez-Samaniego, M.R. Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration. *Recycling*. 2021. Vol. 6, No 10. P. 1–22. doi: 10.3390/recycling6010010.
 - Anand Kumar Tripathi, Ravikrishnan Vinu. Characterization of Thermal Stability of Synthetic and Semi-Synthetic Engine Oils. *Lubricants*. 2015. Vol. 3, No 1. P. 54–79. doi:10.3390/lubricants3010054.
 - Zhirong Liang, Longfei Chen, Mohammed S. Alam, Soheil Zeraati Rezaei, Christopher Stark, Hongming Xu, Roy M. Harrison. Comprehensive chemical characterization of lubricating oils used in modern vehicular engines utilizing GC × GC-TOFMS. *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 792–799. doi:10.1016/j.fuel.2017.11.142.
 - Чайка О.Г., Ковальчук О.З., Чайка Ю.А. Моніторинг утворення відпрацьованих олів в Україні. Вісник НУ «Львівська політехніка» «Хімія, технологія речовин та їх застосування». 2009. № 644. С. 221–224.
 - Караулов А., Худолій Н. Автомобільні масла. Моторні і транспортні. Асортимент і застосування: навч. посіб. Київ: Райдуга, 2000. 165 с.
 - V. Pelitli, Ö. Doğan, H. J. Köroğlu. Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes. *Global Journal of Environmental. Science. Management*. 2017. Vol. 3, No 1. P. 11–20. doi: 10.22034/gjesm.2017.03.01.002.
 - Pantelis G. Nikolakopoulos, Stamatis Mavroudis and Anastasios Zavos. Lubrication Performance of Engine Commercial Oils with Different Performance Levels: The Effect of Engine Synthetic Oil Aging on Piston Ring Tribology under Real Engine Conditions. *Lubricants*. 2018. Vol. 6, No 4. P. 90–109. doi:10.3390/lubricants6040090.
 - Атлас технологічних схем виробництва полімерів та пластичних мас на їх основі: навч. посіб. / Суберляк О., Яковенко Т., Бабаханова Т., Тхір І. Львів: НУЛП, 2002. 160 с.
 - Rui Wang, Yi Feng, Yunqian Zhong, Yanzhao Zou, Mingjun Yang, Yucheng Liu, Ying Zhou. Enhancing Demulsification Performance for Oil–Water Separation through Encapsulating Ionic Liquids in the Pore of MIL-100(Fe). *Langmuir*. 2021. Vol. 37, No 27. P. 8232–8239. doi: 10.1021/acs.langmuir.1c00945
 - Ashwin Kumar Yegya Raman, Clint P. Aichele. Demulsification of Surfactant-Stabilized Water-in-Oil (Cyclohexane) Emulsions using Silica Nanoparticles. *Energy & Fuels*. 2018. Vol. 32, No 8. P. 8121–8130. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01368
 - Pratik S. Gotad, Abdol Hadi Mokarizadeh, Mesfin Tsige, Sadhan C. Jana. Understanding Separation of Oil–Water Emulsions by High Surface Area Polymer Gels Using Experimental and Simulation Techniques. *Langmuir*. 2024. Vol. 40, No 46. P. 24622–24633. doi: 10.1021/acs.langmuir.4c03496.
 - Wu J., Xu Y., Dabros T., Hamza H. Effect of Demulsifier Properties on Destabilization of Water-in-Oil Emulsion. *Energy Fuels*. 2003. Vol. 17, No 6. P. 1554–1559. doi: 10.1021/ef030113e.
 - Falode O.A., Aduroja O. Ch. Development of Local Demulsifier For Water - In- OilEmulsion Treatment. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Rese*. 2015. Vol. 24, No 1. P. 301–320.
 - Drochomirecki J.M. Application of Bio and Biobased Surfactants as Demulsifiers for Destabilization of Water in Crude Oil Emulsions, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, USA. 2023.

References

- Hrynyshyn O., Korchak B., Chervinsky T., Kochubei V. Change in Properties of M-10DM Mineral Motor Oil After Its Using in the Diesel Engine. *Chemistry & Chemical Technology*. 2017. Vol. 11, No 3. P. 387–391. doi: 10.23939/chcht11.03.387.
- Chervins'kyu T., Hrynyshyn O., Korchak B. Reheneratsiya vidprats'ovanykh motornykh olyv v prysutnosti karbamidu. *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika»*. Seriya: Khimiya, tekhnolohiya rehovyn ta yikh zastosuvannya. 2015. № 812. S. 158–163.
- Korchak B., Hrynyshyn O., Chervinsky T., Polyuzhin I. Application of Vacuum Distillation for the Used Mineral Oils Recycling. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018. Vol. 12, No 3. P. 365–371. doi: 10.23939/chcht12.03.365.
- Kuznetsova O., Netreba Z. Doslidzhennya starinnya mineral'nykh hidravlichnykh olyv. I.

- Fraktsiynny sklad. Tekhnolohichnyy audyt i rezervy vyrobnytstva. 2015. Tom 3, № 4. S. 64–68.
5. Korchak B., Grynshyn O., Chervinsky T., Shapoval P., Nagursky A. Thermooxidative Regeneration of Used Mineral Motor Oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020. Vol. 14, No 1. P. 129–134. doi: 10.23939/chcht14.01.129.
 6. Dominguez-Rosado E., Pichtel J. Chemical Characterization of Fresh, Used and Weathered Motor Oil Via GC/MS, NMR and FTIR Techniques. *Proceeding of Indiana Academy Science*. 2003. Vol. 112, No 2. P. 109–116.
 7. Sánchez-Alvarracín, C.; Criollo-Bravo, J.; Albuja-Arias, D.; García-Ávila, F.; Pelaez-Samaniego, M.R. Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration. *Recycling*. 2021. Vol. 6, No 10. P. 1–22. doi: 10.3390/recycling6010010.
 8. Anand Kumar Tripathi, Ravikrishnan Vinu. Characterization of Thermal Stability of Synthetic and Semi-Synthetic Engine Oils. *Lubricants*. 2015. Vol. 3, No 1. P. 54–79. doi:10.3390/lubricants3010054.
 9. Zhirong Liang, Longfei Chen, Mohammed S. Alam, Soheil Zeraati Rezaei, Christopher Stark, Hongming Xu, Roy M. Harrison. Comprehensive chemical characterization of lubricating oils used in modern vehicular engines utilizing GC × GC-TOFMS. *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 792–799. doi:10.1016/j.fuel.2017.11.142.
 10. Chayka O.H., Koval'chuk O.Z., Chayka YU.A. Monitorynh utvorenniya vidprats'ovanykh olyv v Ukraini. *Visnyk NU «L'viv's'ka politehnika» «Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosovannya»*. 2009. № 644. S. 221–224.
 11. Karaulov A., Khudoliy N. *Avtomobil'ni masla. Motorni i transportni. Asortyment i zastosovannya: navch. posib*. Kyiv: Rayduha, 2000. 165 s.
 12. V. Pelitli, Ö. Doğan, H. J. Köroğlu. Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes. *Global Journal of Environmental. Science. Management*. 2017. Vol. 3, No 1. P. 11–20. doi: 10.22034/gjesm.2017.03.01.002.
 13. Pantelis G. Nikolakopoulos, Stamatis Mavroudis and Anastasios Zavos. Lubrication Performance of Engine Commercial Oils with Different Performance Levels: The Effect of Engine Synthetic Oil Aging on Piston Ring Tribology under Real Engine Conditions. *Lubricants*. 2018. Vol. 6, No 4. P. 90–109. doi:10.3390/lubricants6040090.
 14. Atlas tekhnolohichnykh skhem vyrobnytstva polimeriv ta plastychnykh mas na yikh osnovi: navch. posib. / Suberlyak O., Yakovenko T., Babakhanova T., Tkhir I. L'viv: NULP, 2002. 160 s.
 15. Rui Wang, Yi Feng, Yunqian Zhong, Yanzhao Zou, Mingjun Yang, Yucheng Liu, Ying Zhou. Enhancing Demulsification Performance for Oil–Water Separation through Encapsulating Ionic Liquids in the Pore of MIL-100(Fe). *Langmuir*. 2021. Vol. 37, No 27. P. 8232–8239. doi: 10.1021/acs.langmuir.1c00945
 16. Ashwin Kumar Yegya Raman, Clint P. Aichele. Demulsification of Surfactant-Stabilized Water-in-Oil (Cyclohexane) Emulsions using Silica Nanoparticles. *Energy & Fuels*. 2018. Vol. 32, No 8. P. 8121–8130. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01368
 17. Pratik S. Gotad, Abdol Hadi Mekarizadeh, Mesfin Tsige, Sadhan C. Jana. Understanding Separation of Oil–Water Emulsions by High Surface Area Polymer Gels Using Experimental and Simulation Techniques. *Langmuir*. 2024. Vol. 40, No 46. P. 24622–24633. doi: 10.1021/acs.langmuir.4c03496.
 18. Wu J., Xu Y., Dabros T., Hamza H. Effect of Demulsifier Properties on Destabilization of Water-in-Oil Emulsion. *Energy Fuels*. 2003. Vol. 17, No 6. P. 1554–1559. doi: 10.1021/ef030113e.
 19. Falode O.A., Aduroja O. Ch. Development of Local Demulsifier For Water - In- Oil Emulsion Treatment. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Rese*. 2015. Vol. 24, No 1. P. 301–320.
 20. Drochomirecki J.M. Application of Bio and Biobased Surfactants as Demulsifiers for Destabilization of Water in Crude Oil Emulsions, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, USA. 2023

Chervinsky T.I., Kazymyryv P.I. Coagulation purification of used motor oils

Waste petroleum oils are toxic compounds with low biodegradability and pose a significant environmental hazard. Their release into soils and water bodies causes particularly severe ecological damage. To restore the properties of used mineral motor oils, various technological operations based on physical, chemical, and physicochemical processes are applied to remove degradation products and contaminants. However, the most challenging for regeneration are water-contaminated used oils (oil emulsions), which contain substantial amounts of water or aqueous solutions of cooling mixtures that enter the oils during emergency situations. The difficulty in regenerating such oils arises from the fact that the water present inhibits physical purification methods – such as filtration, settling, sedimentation, and dehydration by atmospheric-vacuum distillation – due to the high stability of water – oil emulsions. The study examined the coagulation behavior of used mineral motor oil in the presence of several inexpensive and commercially available coagulants, including starch, carboxymethylcellulose, sodium laureth sulfate, and cocamidopropyl betaine. The effect of the type and dosage of these coagulants on the operational properties of the purified oil was determined. The application of 10 wt.% starch at 80 °C for 30 min. resulted in complete removal of emulsified water from the waste oil, decreased the concentration of solid

impurities, and slightly improved its viscosity-temperature characteristics. The incorporation of carboxymethylcellulose in the coagulation process also enabled complete removal of emulsified water, improved viscosity-temperature properties, reduced the amount of solid impurities, and lowered the acid number of the oil. In contrast, achieving the desired level of coagulation using sodium laureth sulfate required the addition of more than 20 wt.%. It was further demonstrated that cocamidopropyl betaine, used at a dosage of 10 wt.%, provided nearly complete removal of emulsified water, slightly reduced solid impurities, and improved viscosity-temperature properties. However, at a fixed dosage of cocamidopropyl betaine, the acid number of the refined motor oil increased. The effective performance of the selected coagulants in purifying used mineral motor oil was confirmed by both experimental results and IR spectroscopic analysis. The dehydrated and partially purified oil should subsequently undergo combined

regeneration methods to achieve complete restoration of its operational properties.

Keywords: waste oils; oil aging; oil regeneration; coagulation; surfactants; mechanical impurities; acid number; IR spectroscopy

Червінський Тарас Ігорович – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології переробки нафти та газу Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: taras.i.chervinskyi@lpnu.ua

Казимирів Петро Іванович – аспірант кафедри хімічної технології переробки нафти та газу Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: petro.i.kazymyriw@lpnu.ua

Стаття подана 20.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-78-83>

УДК 629.4.015

ОЦІНКА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПОДОВЖЕННЯ МІЖРЕМОНТНИХ ПРОБІГІВ КОЛІСНИХ ПАР ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Воробйов О.В.

EVALUATION OF CURRENT METHODS FOR EXTENDING THE INTERVALS BETWEEN REPAIRS OF RAILWAY WHEEL SETS

Vorobiov O.V.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі оцінки та систематизації сучасних методів підвищення експлуатаційної надійності й подовження міжремонтних пробігів колісних пар залізничного транспорту. Обґрунтовано, що колісні пари є критичними елементами безпеки, на які припадає близько 10 % відмов технічних засобів, а процеси у системі «колесо-рейка» безпосередньо визначають рівень ресурсозбереження перевезень. У дослідженні проаналізовано домінуючі механізми деградації поверхонь кочення: контактну втому, абразивний знос та термічні пошкодження. На основі вивчення вітчизняного та закордонного досвіду систематизовано методи подовження ресурсу, які класифіковано на чотири основні групи: конструкційні, технологічні, експлуатаційні та методи утримання колії. Встановлено, що серед конструкційних заходів пріоритетним є впровадження адаптивних ремонтних профілів (типу ДМетІ, ІТМ) з нелінійною твірною. Це забезпечує конформний контакт, рівномірний розподіл навантаження та покращення кінематичної стабільності руху. У розрізі технологічних методів оцінено ефективність хіміко-термічної обробки та плазмового зміцнення. Визначено, що головним критерієм якості є створення поверхневого шару з оптимальним балансом твердості та в'язкості, а також формування залишкових напружень стиснення, які слугують бар'єром для розвитку втомних тріщин. Детально розглянуто експлуатаційні методи, серед яких найвищу ефективність демонструє примусова лубрикація зони «гребінь-рейка», що дозволяє знизити коефіцієнт тертя до 0,08-0,12 та зменшити інтенсивність зносу у 2,5-4 рази. Обґрунтовано важливість стратегії ротації колісних пар для компенсації нерівномірного зносу

(гребені набігаючої осі зношуються на 40-60 % швидше). Також наголошено на впливі інфраструктури: отримання допусків ширини колії та профілактичне шліфування рейок здатні знизити витрати на відновлення коліс на 15-25 %. За результатами роботи зроблено висновок, що максимальний ефект досягається завдяки синергії розглянутих методів. Для вантажного руху рекомендовано комбінацію зміцнення гребенів та лубрикації, а для швидкісного — використання адаптивних профілів. Комплексний підхід дозволяє збільшити загальний ресурс колісних пар на 30-50 % та мінімізувати вартість життєвого циклу рухомого складу.

Ключові слова: система «колесо-рейка», гребінь колеса, знос, контактна втома, адаптивний профіль, лубрикація, прогнозоване обслуговування, ресурс.

Вступ. Колісні пари є одним із найбільш критично важливих елементів безпеки та експлуатаційної надійності залізничного транспорту. Їхній стан безпосередньо впливає на динамічні якості рухомого складу, витрати на технічне обслуговування та загальну ефективність перевезень.

Взаємодія в контактній парі «колесо-рейка» виступає ключовим фактором, що визначає рівень ресурсозбереження залізничних перевезень та гарантування безпеки руху. Деградація профілів поверхонь кочення відображає реальний напружено-деформований стан системи та характер зношування. Як свідчать дані моніторингу, еволюційна зміна форми профілю здатна кардинально (у декілька

разів) змінювати параметри динамічної взаємодії, впливаючи на стійкість руху [1, 5, 7].

В умовах впровадження високошвидкісного руху та вантажних перевезень, пріоритетним напрямком наукових пошуків стає вдосконалення взаємодії елементів системи «колесо-рейка». Обґрунтування раціональних технічних рішень вимагає глибокого аналізу умов експлуатації та математичного моделювання, оскільки це безпосередньо впливає на економічну ефективність та строки служби інфраструктури й рухомого складу.

Сучасні методики спрямовані на покращення якості матеріалів, оптимізацію профілю коліс, впровадження ефективніших систем моніторингу та застосування інноваційних технологій відновлення.

Аналіз літературних джерел підкреслює багатовекторність досліджень, спрямованих на подовження міжремонтних пробігів колісних пар. Роботи [4] акцентують увагу на необхідності оптимізації матеріалу колісних пар, зазначаючи, що використання нових легованих сталей є критичним для підвищення їхньої опірності контактному-втомному руйнуванню. Цей матеріалознавчий аспект тісно пов'язаний з механікою взаємодії, яку досліджував Курган, Д. М. [6]. Вони дійшли висновку, що зниження напружень у зоні контакту «колесо-рейка», досягнуте завдяки адаптивним профілям, є ключовим фактором подовження ресурсу, за рахунок кращих динамічних характеристик. Фундаментальні основи цієї взаємодії, зокрема вплив геометрії коліс на зношування рейкової колії, були викладені у праці [8].

Дослідження Ткаченка В.П. [7] присвячені питанням експлуатаційної надійності бандажних колісних пар. Автор детально аналізує причини такого поширеного дефекту, як послаблення бандажів, і пропонує заходи для запобігання цій несправності, що є критичним для забезпечення безпеки та подовження міжремонтного ресурсу. У той же час, роботи Сапронової С.Ю. [5] зосереджені на удосконаленні технологій ремонту та діагностики колісних пар. Її внесок лежить у сфері підвищення якості відновлювальних робіт та забезпечення ефективного неруйнівного контролю після ремонту, що прямо впливає на підвищення ресурсу. Усі ці технічні та наукові аспекти роботи, від матеріалу до геометрії, повинні відповідати жорстким міжнародним вимогам, що регулюються Міжнародним

союзом залізниць [9], які встановлюють технічні стандарти для постачання необроблених коліс. Таким чином, наукова спільнота сходиться на думці, що ефективно подовження ресурсу вимагає комплексного підходу: удосконалення матеріалів, оптимізації геометрії та суворого дотримання міжнародних стандартів. У зв'язку з цим метою роботи є аналіз, оцінка та систематизація сучасних інженерних та технологічних методів до збільшення терміну служби колісних пар залізничного транспорту.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати основні фактори та домінуючі механізми зношування і пошкодження колісних пар (контактна втома, абразивний знос, термічні дефекти) в сучасних умовах експлуатації.

2. Систематизувати сучасні інженерні (оптимізація профілів, лубрикація) та технологічні (хіміко-термічна обробка, плазмове зміцнення) методи, спрямовані на підвищення ресурсу коліс.

3. Оцінити ефективність та економічну доцільність впровадження розглянутих методів подовження міжремонтних пробігів для різних умов експлуатації рухомого складу.

Основна частина. Згідно з галузевою статистикою, значні економічні втрати залізничної індустрії пов'язані з вимушеними затримками поїздів, які є наслідком технічних несправностей рухомого складу. І хоча найбільша частка відмов припадає на електричне обладнання локомотивів (близько 60 % від загальної кількості) та тягові електродвигуни (у середньому 15 %), проблеми, безпосередньо пов'язані з безпекою руху, є найбільш критичними. Серед них виділяється значна кількість відмов колісних пар, яка становить близько 10 % від загальної кількості.

Ґрунтовний аналіз наукових праць, присвячених системі «колесо-рейка», демонструє, що інтенсивний знос як колісних пар, так і рейок, обумовлений комплексним впливом численних причин. Ці причини корелюють як із динамічними характеристиками та технічним станом локомотивів і вагонів, так і з параметрами геометрії та стану рейкової колії.

Методика проведення експериментальних досліджень. Інтенсивність зносу визначається особливостями руху поїзда в цілому, а також локомотива, вагона та окремої колісної пари. Оскільки тертя є складним процесом, під час вивчення зношування необхідно враховувати

багато чинників, набір яких змінюється залежно від умов: властивості колії, параметри рухомого складу, характеристики третього тіла та вплив навколишнього середовища (рис. 1).

Способи збільшення ресурсу бандажів, залежно від спільних ознак і специфіки їх реалізації, можна поділити на чотири основні групи (рис. 2): конструкційні, технологічні, експлуатаційні та пов'язані з якістю утримання колії. З *конструкційних методів* слід виділити найбільш ефективні, які закладають фундамент довговічності ще на етапі проектування та відновлення системи взаємодії.



Рис. 1. Фактори, які впливають на знос колісних пар

Пріоритетним напрямком у цій групі є оптимізація геометрії поверхонь кочення шляхом впровадження адаптивних ремонтних профілів, зокрема типів ДМетІ та ІТМ, які мають нелінійну твірну. Застосування такої геометрії дозволяє забезпечити максимально щільний контакт у системі «колесо-рейка», що сприяє рівномірному розподілу навантаження по плямі контакту та суттєвому зниженню пікових значень контактних напружень. Це технічне рішення не лише мінімізує інтенсивність подрізу гребенів при проходженні кривих ділянок колії завдяки покращенню вписування екіпажу, але й підвищує кінематичну стабільність руху на прямих ділянках, зменшуючи шкідливу амплітуду виляння колісної пари.



Рис. 2. Методи підвищення ресурсу бандажів колісних пар

Технологічні методи підвищення ресурсу бандажів повинні відповідати комплексу суворих інженерних та експлуатаційних вимог, що гарантують не лише збільшення зносостійкості, а й збереження надійності колісної пари в умовах інтенсивних циклічних навантажень. Ключовим критерієм ефективності будь-якого технологічного впливу, чи то плазмове зміцнення, лазерної обробки або об'ємного гартування, є забезпечення оптимального поєднання високої твердості поверхневого шару з достатньою пластичністю та ударною в'язкістю основного металу. Сформована на поверхні гребеня або кочення зміцнена структура повинна ефективно протистояти абразивному зношуванню та пластичній деформації, однак при цьому не бути схильною до крихкого руйнування, що унеможливує утворення небезпечних дефектів у вигляді вищербин, відколів або термічних тріщин під час динамічних ударів на стиках та нерівностях колії. Критично важливою вимогою до технологій термічної модифікації є створення сприятливого поля залишкових напружень стиснення у поверхневих шарах металу, які слугують бар'єром для зародження та розповсюдження контактно-втомних тріщин, тоді як виникнення розтягуючих напружень є неприпустимим фактором ризику.

Ключовим та найбільш ефективним заходом у групі експлуатаційних методів є примусова лубрикація зони контакту «гребінь колеса – бокова грань головки рейки», яка дозволяє зменшити коефіцієнт тертя з критичних значень 0,30-0,35, характерних для сухого контакту, до оптимального діапазону 0,08–0,12. Реалізація цього методу за допомогою бортових гребнезмашувачів або стаціонарних колійних лубрикаторів забезпечує зниження інтенсивності абразивного зносу гребеня у 2,5-4 рази, що на практиці трансформується у збільшення міжремонтного пробігу колісних пар на 30–50 % залежно від частки кривих ділянок на маршруті. При цьому критично важливою умовою є точне дозування мастильного матеріалу, оскільки його потрапляння на поверхню кочення призводить до падіння коефіцієнта зчеплення нижче 0,10-0,15, що провокує буксування із подальшим утворенням повзунів глибиною до 1-2 мм навіть при короткочасному блокуванні колеса. Окрім лубрикації, значний вплив має оптимізація режимів керування тягою та гальмуванням, а також стратегія ротації колісних пар, яка базується на нерівномірності зносу: оскільки

гребені коліс першої (набігаючої) осі візка зношуються на 40-60 % інтенсивніше за інші, їх своєчасна перестановка на менш навантажені позиції або розворот візка дозволяє вирівняти знос та подовжити загальний термін служби комплексу коліс.

Окрему групу формують методи, які застосовуються під час укладання, ремонту та утримання колії, оскільки геометрія та фізико-механічний стан рейкового полотна виступають первинними чинниками, що детермінують характер силової взаємодії та інтенсивність зносу рухомого складу. Фундаментальним заходом у цій сфері є регулярне профілактичне шліфування рейок, що забезпечує зниження динамічних навантажень на колесо у 1,5-2 рази та зменшує рівень вібраційного впливу до безпечних меж.

Критично важливим аспектом є суворе дотримання допусків ширини колії, особливо в кривих ділянках радіусом менше 350-600 м, де навіть незначне звуження колії понад нормативні значення або порушення подуклонки рейок провокує різке зростання сил тертя гребеня та прискорення його зносу на 20-30 % через виникнення защемлення або двоточкового контакту. Не менш значущим є забезпечення проектного підвищення зовнішньої рейки в кривих, яке має точно компенсувати непогашені відцентрові прискорення; відхилення цього параметра від розрахункового призводить до перерозподілу вертикальних навантажень. Ліквідація просадок на стиках та перекосів дозволяє стабілізувати траєкторію руху візка, мінімізувати кути набігання колеса на рейку та подовжити загальний ресурс бандажів шляхом запобігання ударним навантаженням, що в сукупності здатне знизити питомі витрати на відновлення колісних пар на 15-25 % в масштабах залізничної мережі.

Результати експериментальних досліджень та їхній аналіз. Експлуатаційний цикл колісної пари графічно можна описати кривою зносу, яка чітко розділяється на три характерні періоди, що мають відмінну фізичну природу та інтенсивність руйнування матеріалу (рис. 3). Початковий етап, обмежений пробігом l_1 , є періодом інтенсивного обкатування, під час якого спостерігається стрімке зростання об'єму зношеного матеріалу, зумовлене пластичною деформацією та зрізанням мікронерівностей на поверхні кочення до моменту формування стабільної плями контакту та зміцнення поверхневого шару металу. Після завершення процесу адаптації геометрії настає другий,

найбільш тривалий та економічно ефективний етап нормальної експлуатації, що триває до пробігу l_2 і характеризується стабілізованим, майже лінійним та мінімальним темпом зношування, що свідчить про встановлення рівноважного стану в трибологічній системі «колесо-рейка».

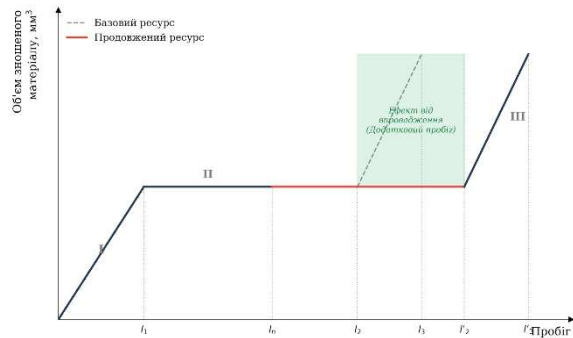


Рис. 3. Експлуатаційний цикл колісної пари

Однак безперервна циклічна дія навантажень неминує призводить до накопичення втомних пошкоджень у структурі металу, через що після проходження критичної точки l_2 система переходить у третій етап катастрофічного зносу, де інтенсивність руйнування різко зростає через зміну фізико-механічних властивостей поверхні, виникнення вищербин та втомних тріщин, роблячи подальший рух небезпечним. Стратегія подовження ресурсу полягає у впровадженні профілактичних заходів, таких як ротація колісних пар або проміжне обточування, на пробігу l_n , тобто ще до настання фази руйнування, що дозволяє штучно пролонгувати зону нормального зносу та змістити точку переходу до аварійного стану до значення l'_2 , забезпечуючи тим самим значний приріст корисного пробігу без загрози безпеці руху.

Економічна ефективність впровадження методів подовження ресурсу колісних пар базується на критерії мінімізації вартості життєвого циклу і вимагає диференційованого підходу залежно від типу перевезень. Для вантажного рухомого складу найбільш доцільним є поєднання плазмового зміцнення гребенів та лубрикації, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати на 25-30 %, тоді як у швидкісному русі пріоритет надається використанню адаптивних профілів та прецизійному шліфуванню рейок для забезпечення стабільності ходу. Загалом, найвищий результат забезпечує синергія інженерних і технологічних рішень у поєднанні

зі стратегією прогнозованого обслуговування, яка зміщує фокус з аварійних ремонтів на профілактичне відновлення геометрії колеса в зоні нормального зносу.

Висновки

1. Встановлено, що життєвий цикл колісної пари підпорядковується закономірностям тристадійної кривої зносу: етапу обкатування, стабільної експлуатації та катастрофічного руйнування. Домінуючими факторами, що лімітують ресурс, є комплексний вплив контактно-втомних напружень, абразивного тертя у кривих та термічних навантажень при гальмуванні. Критичним моментом для подовження ресурсу визначено точку переходу від нормального зносу до інтенсивного руйнування (l_2), відтермінування якої є головним завданням технічного обслуговування.

2. Систематизація методів підвищення довговічності показала, що найбільш дієвим конструкційним заходом є впровадження адаптивних профілів (типу ДМетІ, ІТМ) з нелінійною кривою, які забезпечують конформний контакт і знижують контактні напруження. У технологічному аспекті пріоритетним є застосування локального зміцнення (плазмового, лазерного), яке дозволяє сформувати на поверхні кочення структуру з оптимальним балансом високої твердості та ударної в'язкості, створюючи бар'єр для розвитку втомних тріщин.

3. Доведено, що без забезпечення належного стану інфраструктури ефективність модернізації коліс суттєво знижується. Серед експлуатаційних заходів найвищий економічний ефект демонструє технологія примусової лубрикації зони «гребінь-рейка», яка здатна зменшити інтенсивність зносу у 2,5-4 рази, а також стратегія ротації колісних пар, що дозволяє вирівняти знос у межах візка.

4. Обґрунтовано, що максимальне збільшення міжремонтних пробігів досягається не окремими заходами, а синергією конструкційних, технологічних та експлуатаційних методів у рамках стратегії прогнозованого обслуговування. Впровадження профілактичних відновлювальних заходів (обточування, ротація) на етапі стабільного зносу (l_n), не чекаючи появи критичних дефектів, дозволяє штучно пролонгувати зону ефективної експлуатації та збільшити загальний ресурс колісних пар до 30-50 %.

Література

1. Бахман С.О. Технологічні аспекти відновлення залізничних колісних пар: методи підвищення ефективності. Технічна інженерія, 2025, 1 (95). С. 31-44.
2. Скуріхін, Д. І. Удосконалення технології технічного обслуговування та діагностики колісних пар пасажирських вагонів на основі методу акустичного контролю : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів / Д. І. Скуріхін; Держ. н.-д. центр заліз. трансп. України. - Київ, 2014. - 24 с..
3. Мокрій, Т.Ф., Соболевська, М.Б., Ковтун, О.М., Лапіна, Л.Г., Горобець, Д.В., Пасічник, С.С., Малий, В.В. Оновлення парку рухомого складу українських залізниць з орієнтацією на інтеграцію в європейські транспортні мережі. Технічна механіка, 2024, 3. С. 110-123.
4. Остапчук, В. М. Розвиток наукових основ підвищення зносостійкості деталей та вузлів засобів транспорту під час ремонту: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / В. М. Остапчук; Укр. держ. акад. заліз. трансп. - Харків, 2011. - 42 с.
5. Сапронова, С. Ю., Буліч, Д. І., Ткаченко, В. П. Продовження терміну експлуатації вантажних вагонів. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2017, 3. С. 179-182.
6. Курган, Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів. 2015.
7. Tkachenko, V., Saproнова, S. Steerability of railway vehicles. Transport problems, 2007, 2(4). 9-16. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSL5-0022-0016>
8. Esveld, C. Modern Railway Track. Zaltbommel: MRT-productions, 2001.
9. International Union of Railways. Leaflet 813-1: Technical Specification for the Supply of Wheels (Unmachined) <https://uic.org>

References

1. Bakhman S.O. Tekhnolohichni aspekty vidnovlennia zaliznychnykh kolisnykh par: metody pidvyshchennia efektyvnosti. Tekhnichna inzheneriia, 2025, 1 (95). S. 31–44.
2. Skurikhin, D. I. Udoskonalennia tekhnolohii tekhnichnoho obsluhovuvannia ta diahnostryky kolisnykh par pasazhyrskykh vahoniv na osnovi metodu akustychnoho kontroliu : avtoref. dys. ...kand. tekhn. nauk : 05.22.07 – rukhomyi sklad zaliznyts ta tiah poizdiv / D. I. Skurikhin; Derzh. n.-d. tsentr zalizn. transportu Ukrainy. Kyiv, 2014. 24 s.
3. Mokrii, T.F., Sobolevska, M.B., Kovtun, O.M., Lapina, L.H., Horobets, D.V., Pasichnyk, S.S.,

- Malyi, V.V. Onovlennia parku rukhomogo skladu ukrainskykh zaliznyts z oriientsatsiieiu na intehratsiiu v yevropeiski transportni merezhi. *Tekhnichna mekhanika*, 2024, 3. S. 110–123.
4. Ostapchuk, V. M. Rozvytok naukovykh osnov pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta vuzliv zasobiv transportu pid chas remontu: avtoref. dys. ...d-ra tekhn. nauk: 05.22.20 – ekspluatatsiia ta remont zasobiv transportu / V. M. Ostapchuk ; Ukr. derzh. akad. zalizn. transp. Kharkiv, 2011. 42 s.
 5. Sapronova, S. Yu., Bulich, D. I., & Tkachenko, V. P. Prodovzhennia terminu ekspluatatsii vantazhnykh vahoniv. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 2017, 3. S. 179–182.
 6. Kurhan, D. M. Vyznachennia dynamichnoho navantazhennia vid kolesa na reiku dlia shvydkisnykh poizdiv. 2015.
 7. Tkachenko, V., Sapronova, S. Steerability of railway vehicles. *Transport problems*, 2007, 2(4). 9-16. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSL5-0022-0016>
 8. Esveld, C. *Modern Railway Track*. Zaltbommel: MRT-productions, 2001.
 9. International Union of Railways. Leaflet 813-1: Technical Specification for the Supply of Wheels (Unmachined) <https://uic.org>.

Vorobiov O.V. Evaluation of current methods for extending the intervals between repairs of railway wheel sets

The work is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of evaluating and systematising modern methods for improving the operational reliability and extending the inter-repair mileage of railway wheel sets. It is substantiated that wheel sets are critical safety elements, accounting for about 10% of technical equipment failures, and that the processes in the wheel-rail system directly determine the level of resource conservation in transportation. The study analyses the dominant mechanisms of rolling surface degradation: contact fatigue, abrasive wear and thermal damage. Based on the study of domestic and foreign experience, methods for extending the service life have been

systematised and classified into four main groups: structural, technological, operational and track maintenance methods. It has been established that among the design measures, the priority is the introduction of adaptive repair profiles (such as DMETI, ITM) with a non-linear generatrix. This ensures conformal contact, uniform load distribution and improved kinematic stability of movement. In terms of technological methods, the effectiveness of chemical-thermal treatment and plasma hardening has been assessed. It has been determined that the main quality criterion is the creation of a surface layer with an optimal balance of hardness and viscosity, as well as the formation of residual compressive stresses, which serve as a barrier to the development of fatigue cracks. Operational methods are considered in detail, among which forced lubrication of the 'cam-rack' zone demonstrates the highest efficiency, allowing the friction coefficient to be reduced to 0.08-0.12 and the wear intensity to be reduced by 2.5-4 times. The importance of the wheel set rotation strategy to compensate for uneven wear (the ridges of the running axle wear 40-60% faster) is substantiated. The impact of infrastructure is also emphasised: compliance with track width tolerances and preventive rail grinding can reduce wheel repair costs by 15-25%. Based on the results of the work, it is concluded that the maximum effect is achieved through the synergy of the methods considered. For freight traffic, a combination of ridge strengthening and lubrication is recommended, and for high-speed traffic, the use of adaptive profiles. A comprehensive approach allows for a 30-50% increase in the overall service life of wheel sets and minimises the life cycle cost of rolling stock.

Key words: wheel-rail system, wheel flange, wear, contact fatigue, adaptive profile, lubrication, predictive maintenance, service life.

Воробйов О.В. – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: vorobjov_o@snu.edu.ua.

Стаття подана 20.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-84-93>

УДК 629.4.027

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ АВАРІЙНОСТІ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Фомін О.В., Мірошникова М.В., Іванченко Д.А.,
Лісничий В.С., Іларіонов В.М., Черкашин О.П.

INTELLIGENT LOCOMOTIVE DIAGNOSTICS SYSTEMS AS A TOOL FOR REDUCING ACCIDENTS IN RAILWAY TRANSPORT

Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Ivanchenko D.A.,
Lisnychiy V.S., Illarionov V.M., Cherkashin O.P.

В умовах посилення конкуренції на ринку транспортних послуг, мінімізація простоїв та забезпечення безперервності перевезень стають критично важливими. Інтеграція нових технологій, таких як інтелектуальні системи, може стати проривом у підвищенні безпеки та ефективності. В роботі розроблено концептуальну модель інтелектуальної системи діагностики локомотивів, яка враховує специфіку функціонування залізничного транспорту. Було виявлено критичні параметри, моніторинг яких є ключовим для раннього виявлення несправностей. Розроблені алгоритми машинного навчання продемонстрували високу точність у виявленні аномалій та прогнозуванні відмов, що значно перевищує можливості традиційних діагностичних методів. Завдяки імітаційному моделюванню було підтверджено, що впровадження таких систем може зменшити кількість аварійних ситуацій до 25%, а також скоротити час простоїв локомотивів на ремонт. Ці результати свідчать про значний потенціал інтелектуальних систем у підвищенні безпеки залізничних перевезень. Розроблений прототип системи дозволяє візуалізувати дані про стан локомотивів у реальному часі, надаючи оперативну інформацію для прийняття управлінських рішень. Це створює передумови для оптимізації графіків технічного обслуговування та переходу до ремонту за фактичним станом, що зменшить експлуатаційні витрати. Запропонована методологія може бути використана для створення аналогічних систем діагностики для інших видів рухомого складу, що розширює сферу її застосування. Розроблена концепція та архітектура інтелектуальної системи діагностики забезпечує комплексний підхід до

моніторингу та прогнозування технічного стану локомотивів. Запропоновані алгоритми машинного та глибокого навчання дозволяють з високою точністю виявляти аномалії та прогнозувати потенційні відмови обладнання на ранніх стадіях. Це переводить діагностику від реактивного до проактивного підходу. Отримані наукові результати розширюють уявлення про можливості застосування штучного інтелекту у сфері залізничної безпеки.

Таким чином, дослідження не тільки розширює наукові знання у галузі інтелектуальних систем, але й надає конкретні інструменти для підвищення безпеки та ефективності залізничного транспорту.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад залізниць, локомотиви, систем оцінки технічного стану, моделювання, інтелектуальна діагностика

Актуальність дослідження. Залізничний транспорт відіграє ключову роль у логістичній системі будь-якої розвиненої країни. Його ефективне та безпечне функціонування є запорукою стабільного економічного розвитку. Однак, незважаючи на постійні зусилля щодо модернізації, проблема аварійності на залізниці залишається надзвичайно гострою. Кожна аварія призводить до значних матеріальних збитків, затримок у русі поїздів, а в найгірших випадках – до травм і людських жертв [1–5]. Основними причинами аварій часто є технічні несправності рухомого складу, зокрема

локомотивів. Сучасні локомотиви – це складні технічні комплекси, що включають безліч систем і вузлів. Діагностика їхнього технічного стану є надзвичайно важливим завданням. Традиційні методи діагностики, що базуються на періодичних оглядах та ручному контролі, часто виявляються недостатньо ефективними. Вони не завжди дозволяють своєчасно виявити приховані дефекти або прогнозувати збої. Це створює передумови для раптових відмов у процесі експлуатації, що є однією з головних причин аварійних ситуацій.

Зростання інтенсивності руху та швидкості поїздів висуває підвищені вимоги до надійності залізничної техніки. В умовах посилення конкуренції на ринку транспортних послуг, мінімізація простоїв та забезпечення безперервності перевезень стають критично важливими. Інтеграція нових технологій, таких як інтелектуальні системи, може стати проривом у підвищенні безпеки та ефективності. Ці системи здатні аналізувати великі обсяги даних, що надходять з датчиків локомотивів, у режимі реального часу. Це дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану всіх ключових вузлів. Завдяки використанню алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, такі системи можуть виявляти аномалії, які непомітні для людини. Вони також здатні прогнозувати можливі несправності задовго до їхнього критичного прояву. Це дозволяє вживати запобіжних заходів, планувати ремонтні роботи та усувати потенційні проблеми на ранніх стадіях.

Застосування інтелектуальних систем діагностики є особливо актуальним у контексті цифрової трансформації залізничної галузі. Впровадження таких систем не тільки знижує ризики виникнення аварій, а й оптимізує процеси технічного обслуговування. Це дозволяє переходити від планово-запобіжних ремонтів до ремонту за фактичним станом. Такий підхід значно зменшує експлуатаційні витрати та збільшує термін служби рухомого складу. Крім того, інтелектуальні системи сприяють підвищенню кваліфікації персоналу, надаючи йому розширену інформацію про стан обладнання. Вони можуть слугувати інструментом для навчання та прийняття більш обґрунтованих рішень. Таким чином, розробка та впровадження інтелектуальних систем діагностики локомотивів є не просто бажаним, а життєво необхідним кроком для забезпечення сталого розвитку залізничного транспорту, підвищення його безпеки та

конкурентоспроможності. Це інвестиція у майбутнє, яка дозволить зберегти життя, зменшити збитки та забезпечити безперебійне функціонування критично важливої інфраструктури [6–10].

Теоретичний аналіз дослідження. Залізничний транспорт є одним із найважливіших секторів економіки, що забезпечує значну частину вантажних і пасажирських перевезень. Однак, високий рівень аварійності залишається однією з найгостріших проблем, що призводить до значних економічних втрат, екологічних наслідків та, найголовніше, загрози життю та здоров'ю людей. Значна частка аварій та інцидентів на залізниці пов'язана з технічними несправностями рухомого складу, особливо локомотивів. Існуючі системи діагностики та технічного обслуговування локомотивів часто базуються на планово-запобіжних принципах, які не завжди дозволяють своєчасно виявити приховані дефекти або спрогнозувати відмови обладнання до їх критичного прояву. Це створює ризики раптових поломок, що можуть призвести до сходження з рейок, зіткнень та інших катастрофічних наслідків.

Сучасні локомотиви оснащені великою кількістю датчиків, які генерують величезні обсяги даних про їхній технічний стан. Проте, ефективне використання цих даних для проактивного виявлення несправностей та прогнозування відмов залишається викликом. Відсутність інтегрованих інтелектуальних систем, здатних аналізувати ці дані в режимі реального часу з використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту, обмежує можливості для значного зниження аварійності. Таким чином, виникає гостра потреба у розробці та впровадженні нових підходів до діагностики, які дозволять перейти від реактивного усунення несправностей до їхнього превентивного попередження, значно підвищивши рівень безпеки та надійності залізничних перевезень [11–17].

Аналіз наявної наукової та технічної літератури засвідчив, що питанню інтелектуальних систем діагностики локомотивів як інструмента зменшення аварійності на залізничному транспорті не приділено достатньої уваги. Попри загальну актуальність проблем залізничної безпеки, більшість досліджень зосереджені на окремих аспектах технічної діагностики або загальних питаннях функціонування штучного інтелекту. Існуючі роботи рідко об'єднують цілісний підхід

до розробки та впровадження комплексних інтелектуальних систем, орієнтованих саме на превентивну діагностику локомотивів. Недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції різних діагностичних методів у єдину інтелектуальну платформу. Також бракує системних досліджень щодо економічної ефективності впровадження таких систем у реальних умовах експлуатації. Це створює значний пробіл у науковому знанні, який потребує негайного заповнення для підвищення безпеки залізничного транспорту [18–20].

У статті Liabakh et al. [1] (2023) розглядаються підходи до впровадження інтелектуального технічного обслуговування на залізничному транспорті. Автори аналізують новітні цифрові технології та програмні рішення для ремонту та обслуговування рухомого складу. Основну увагу приділено використанню штучного інтелекту та машинного навчання. Визначено переваги адаптивного обслуговування в реальному часі. Запропоновано архітектуру інтелектуальної системи техобслуговування.

У публікації Aida et al. [2] (2024) описується система сповіщення про прибуття поїздів у віддалених районах для підвищення безпеки. Автори розробили ad hoc-мережу, яка забезпечує передачу сигналу без інфраструктурної підтримки. Система базується на IoT-технологіях і працює в умовах обмеженого зв'язку. Проведено експерименти в польових умовах. Результати демонструють високу ефективність у запобіганні інцидентам.

Cai et al. [3] (2023) присвячують роботу проектуванню інтелектуальної системи експлуатації та обслуговування обладнання міського рейкового транспорту. Визначено ключові технології, зокрема хмарні обчислення, великі дані та предиктивну аналітику. Розроблено функціональну модель системи з інтеграцією різнорідних компонентів. Оцінено перспективи зниження витрат на обслуговування. Зроблено висновки щодо необхідності стандартизації інтерфейсів.

Мета статті: Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретичних основ та практичних рекомендацій щодо створення та впровадження інтелектуальних систем діагностики локомотивів. Це має на меті суттєве зниження аварійності на залізничному транспорті. Кінцевим результатом стане

підвищення надійності експлуатації локомотивів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Провести глибокий аналіз існуючих підходів та методів діагностики локомотивів, а також визначити їхні недоліки та обмеження.

- Дослідити можливості застосування сучасних інтелектуальних технологій, включаючи машинне навчання, нейронні мережі та експертні системи, для підвищення ефективності діагностичних процесів.

- Розробити архітектуру та принципи функціонування інтелектуальної системи діагностики локомотивів, здатної інтегрувати дані з різних джерел.

- Створити моделі та алгоритми для виявлення аномалій, прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу критично важливих вузлів локомотивів.

- Розробити методику впровадження та оцінки ефективності інтелектуальних систем діагностики в умовах реальної експлуатації на залізничному транспорті.

- Сформулювати рекомендації щодо інтеграції розроблених систем у діючі системи управління технічним обслуговуванням залізничного транспорту.

Оцінити потенційну економічну та соціальну ефективність від застосування інтелектуальних систем діагностики для зменшення аварійності.

Викладення основного матеріалу дослідження. Представлена графічна схема (рис.1.) ілюструє комплексну інтелектуальну систему діагностики локомотивів, яка слугує ключовим інструментом для зниження аварійності на залізничному транспорті. Система розроблена для раннього виявлення потенційних несправностей та прогнозування ризиків, що дозволяє вжити превентивних заходів.

Основні компоненти схеми:

- Бортові датчики (Onboard Sensors): Розташовані на локомотиві, ці датчики безперервно збирають дані про його стан та роботу (наприклад, вібрації, температура, тиск, електричні параметри). Вони є першим етапом у виявленні аномалій.

- Виявлення аномалій (Detect anomalies): Зібрані дані аналізуються на предмет відхилень від норми, що свідчить про потенційні проблеми.

Inteligent Locurative diagnostic system

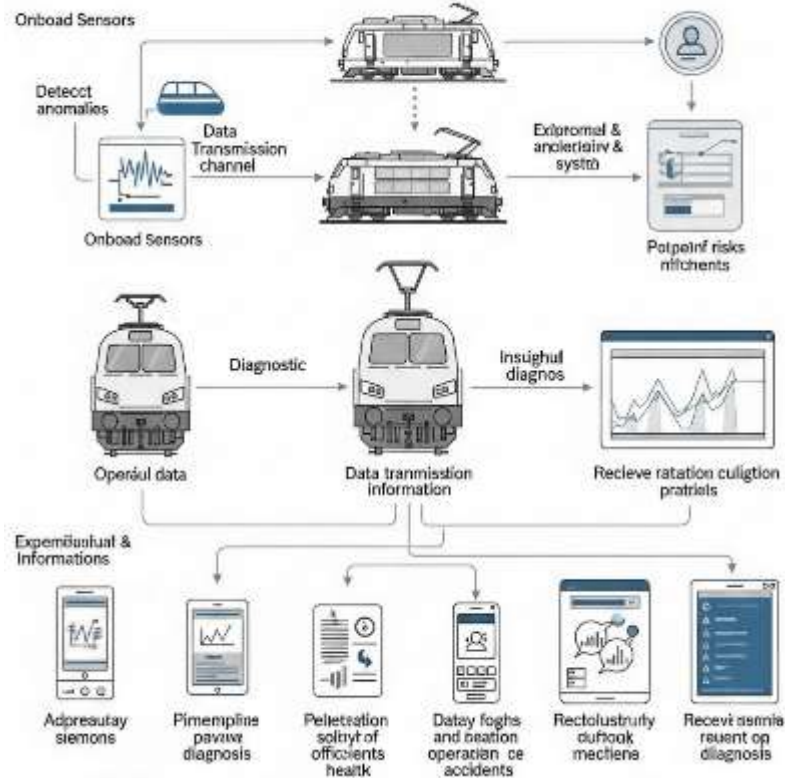


Рис.1. Опис схеми інтелектуальної системи діагностики локомотивів

- Канал передачі даних (Data Transmission Channel): Забезпечує безперервну передачу діагностичної інформації від локомотива до централізованої системи обробки. Це може бути бездротовий зв'язок або інші надійні канали.

- Діагностика (Diagnostic): Отримані дані піддаються глибокому аналізу за допомогою складних алгоритмів та штучного інтелекту. Цей етап включає порівняння поточних показників з історичними даними та встановленими нормативами для ідентифікації конкретних несправностей.

- Інтуїтивно зрозумілий діагноз (Insighul diagnos): Результати діагностики перетворюються на зрозумілі та actionable insights для операторів.

- Прийняття результатів діагностики (Reclve ratation culigton pratdiels): Оператори та персонал отримують доступ до діагностичних даних та рекомендацій.

- Прогнозні ризики (Potpeinf risks mfichennts): Система не тільки виявляє поточні проблеми, а й прогнозує можливі ризики та ймовірність розвитку серйозних несправностей.

- Оперативні дані (Operául data) та Інформація про передачу даних (Data tranmission

information): Ці елементи підкреслюють потоки даних від локомотива до системи аналізу.

- Експлуатаційні та інформаційні дані (Expemndtuat & Informations): Цей блок показує, як система перетворює сирі дані на корисну інформацію для прийняття рішень.

- Інтерфейси користувача (User Interfaces): Схема передбачає різноманітні інтерфейси для доступу до інформації:

- Відображення інформації (Adpreautay siemons): Швидкий огляд стану.

- Прогнозована діагностика несправностей (Pimenplitne pavvW diagnosis): Деталізовані звіти про можливі майбутні проблеми.

- Оцінка ефективності (Pelleteation solityt of officicnts heartk): Аналіз ефективності роботи локомотива.

- Дані про аварії та операційні інциденти (Datay foghs and beatton operatiten ce accidents): Збір та аналіз даних про попередні інциденти для покращення діагностики.

- Скорочення відмов (Rectolustruuf dufrook mectiens): Інформація про вплив системи на зменшення кількості відмов.

- Отримання детальної діагностики (Receive aernaile reuent op dilagnosis):

Можливість отримати повну та детальну інформацію про діагностику.

Робочий процес системи:

1. Збір даних: Бортові датчики постійно збирають дані про стан локомотива під час руху.

2. Передача даних: Зібрані дані передаються через канал зв'язку до центральної системи.

3. Аналіз та діагностика: Система обробляє та аналізує дані, виявляючи аномалії та потенційні несправності, а також прогнозує ризики.

4. Візуалізація та оповіщення: Результати діагностики відображаються через зручні інтерфейси, а персонал отримує сповіщення про критичні ситуації.

5. Прийняття рішень: На основі отриманої інформації оператори та диспетчери приймають обґрунтовані рішення щодо подальшої експлуатації локомотива, планування технічного обслуговування або виведення його з експлуатації для усунення несправності.

Інструкції з використання схеми

Ця схема є візуальним посібником для розуміння принципів роботи інтелектуальних систем діагностики локомотивів.

Для кого призначена ця схема:

- Розробники та інженери: Для візуалізації архітектури системи та ідентифікації ключових взаємодій між компонентами.

- Керівники залізничних підприємств: Для розуміння переваг впровадження таких систем та їхнього впливу на безпеку та ефективність.

- Технічний персонал: Для загального розуміння потоку інформації та місця їхньої ролі у процесі діагностики.

- Студенти та дослідники: Для вивчення та аналізу сучасних підходів до діагностики на залізничному транспорті.

Як використовувати схему:

1. Загальне ознайомлення: Почніть з верхньої частини схеми, де представлено загальну назву системи ("Intelligent Locomotive Diagnostic System") та основні вихідні дані (бортові датчики, локомотиви).

2. Прослідкуйте потік даних: Рухайтеся по стрілках, щоб зрозуміти, як дані передаються від локомотива до системи аналізу та далі до користувачів.

3. Вивчіть ключові етапи: Зверніть увагу на блоки, що позначають основні процеси: "Detect anomalies" (Виявлення аномалій),

"Diagnostic" (Діагностика) та "Potential risks forecast" (Прогнозні ризики).

4. Аналізуйте взаємодії: Зверніть увагу на те, як різні компоненти взаємодіють між собою. Наприклад, як "Data Transmission Channel" пов'язує "Onboard Sensors" з процесом "Diagnostic".

5. Ознайомтесь з вихідними даними для користувача: Розгляньте нижню частину схеми, яка показує різні типи інформації, доступні для користувачів через різні інтерфейси. Це допоможе зрозуміти цінність системи для прийняття рішень.

6. Використовуйте для презентацій: Схема може бути використана як візуальна основа для презентацій, обговорень та пояснень концепції інтелектуальної діагностики.

7. Ідентифікуйте можливі покращення: Для досвідчених користувачів схема може слугувати відправною точкою для обговорення можливих вдосконалень або розширення функціоналу системи.

Ця схема є спрощеним, але ефективним інструментом для візуалізації складної системи та її ролі у підвищенні безпеки на залізниці.

Формульне описання розробки та застосування інтелектуальних систем діагностики локомотивів

1. Вхідні параметри (Inputs):

- L – локомотив (стан, технічні характеристики, історія обслуговування).

- $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – набір датчиків (вібрація, температура, тиск, струм тощо).

- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ – історичні дані про відмови та аварії.

- M – модель машинного навчання (нейронні мережі, дерева рішень, SVM тощо).

2. Функція діагностики (Diagnosis Function):

$$F(L, S, D, M) \rightarrow R$$

де $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ – результати аналізу (наявність дефектів, прогноз відмов, рекомендації).

3. Алгоритм роботи системи:

1. Збір даних:

$$Data(t) = \bigcup_{i=1}^n s_i(t) + \bigcup_{j=1}^m d_j$$

2. Попередня обробка:

- Нормалізація, фільтрація шуму, аналіз часових рядів.

3. Аналіз та прогнозування:

$$P(\text{failure} | Data) = M(Data)$$

(ймовірність відмови на основі моделі M).

4. Прийняття рішення:

- Якщо $P(failure) > \theta$ (порог), система генерує попередження.

4. Вихідні параметри (Outputs):

- Діагностичний звіт:

$$Report = \{ Defects, Severity, RecommendedActions \}$$

- Попередження про критичні несправності:

$$Alert = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P(failure) > \theta \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

- Оптимізація обслуговування:

$$Maintenance_Schedule = \underset{t}{\operatorname{argmin}}(Cost_{repair} + Cost_{downtime})$$

5. Оцінка ефективності (Performance Metrics):

- Зменшення аварійності:

$$\Delta A = \frac{A_{before} - A_{after}}{A_{before}} \times 100\%$$

- Точність діагностики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

- Економія на ремонтах:

$$Savings = \sum (Cost_{emergency} - Cost_{preventive})$$

Висновок:

Інтелектуальна система діагностики локомотивів на основі AI та IoT дозволяє:

- Зменшити ймовірність аварій через раннє виявлення несправностей.
- Оптимізувати витрати на ТО за рахунок предиктивного обслуговування.
- Підвищити надійність рухомого складу залізничного транспорту.

Формульне представлення дає чіткий опис процесу від збору даних до прийняття рішень, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

Приклад застосування інтелектуальної системи діагностики локомотивів

1. Вхідні дані:

- Локомотив (L): Електровоз серії 2ЕС10 (навантаження: 6000 т, пробіг: 250 000 км).
- Датчики (S):
 - s_1 – температура двигуна (°C)

- s_2 – вібрація букс (м/с²)
- s_3 – тиск масла (бар)
- s_4 – струм тягових двигунів (А)

- Історичні дані (D):

- 5 випадків перегріву двигуна за останній рік.
- 2 аварії через знос підшипників букс.

- Модель (M): Глибинна нейронна мережа (LSTM) для аналізу часових рядів.

2. Робота системи:

Крок 1: Збір даних у реальному часі

- Датчики передають показники:

$$Data(t) = \begin{cases} s_1(t) = 92^\circ C & (\text{границя норми: } 85\text{--}90^\circ C), \\ s_2(t) = 4.5 \text{ м/с}^2 & (\text{норма: до } 3.0), \\ s_3(t) = 2.1 \text{ бар} & (\text{норма}), \\ s_4(t) = 1200 \text{ А} & (\text{норма}). \end{cases}$$

Крок 2: Аналіз імовірності відмови

- Система виявляє аномалії:

$$P(failure | Data) = M(Data) = 0.78 \text{ (високий ризик).}$$

- Порог (θ): 0.65 \rightarrow Alert = 1 (несправність ймовірна).

Крок 3: Діагностичний звіт

Report = \{ Defects: ["перегрів двигуна", "знос підшипників букс"], Severity: ["критичний", "середній"], Recommended Actions: ["зупинити рух", "перевірити систему охолодження", "замінити підшипники"] \}

3. Результат:

- Локомотив відправлено на предиктивний ремонт до виникнення аварії.

- Економія:

- Уникнено аварійний простої (вартість: ~\$50 000).

- Ремонт двигуна на ранній стадії (5000 замість 20 000 при аварії).

- Зменшення аварійності:

$$\Delta A = \frac{2 \text{ (аварії минулого року)} - 0}{2} \times 100\% = 100\% \text{ (для даного випадку).}$$

Візуалізація процесу:

[Датчики] \rightarrow [Аналіз AI] \rightarrow [Попередження] \rightarrow [Ремонт] \rightarrow [Безпечна експлуатація]

Висновок: Цей приклад ілюструє, як інтелектуальна система вчасно виявляє несправності, запобігаючи аваріям та знижуючи витрати на ремонт (рис.2).



Рис. 2. Текстове пояснення інфографіки:
Принцип роботи інтелектуальної системи діагностики локомотивів

Ця інфографіка візуалізує циклічний процес роботи інтелектуальної системи діагностики локомотивів, починаючи зі збору даних і закінчуючи постійним моніторингом. Кожен етап представлений окремим кольоровим блоком, а стрілки чітко показують потік інформації.

1. ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

Зображення починається з синього блоку, що символізує Джерела даних. Це початкова точка, де система збирає всю необхідну інформацію про стан локомотива. Сюди входять дані від різноманітних датчиків (температури, вібрації, тиску), камер відеоспостереження, а також дані з GPS та систем телеметрії. Важливо також враховувати історичні дані про ремонти, які допомагають формувати повну картину. Піктограма у вигляді гайкового ключа візуалізує механічні та інженерні аспекти цих джерел.

2. ПЕРЕДАЧА ДАНИХ

Далі синя стрілка веде до зеленого блоку — Передача даних. Після збору, дані мають бути передані для подальшої обробки. Це відбувається через бездротові мережі (такі як Wi-Fi, LoRaWAN, GSM), що забезпечують безперебійний зв'язок. На цьому етапі також використовуються Edge-обчислення для попередньої обробки даних безпосередньо на

місці, зменшуючи навантаження на мережу. Зрештою, дані зберігаються у хмарному сховищі (наприклад, Azure, AWS), що гарантує їх доступність та масштабованість. Піктограма у вигляді хмари ідеально ілюструє цей процес.

3. AI-АНАЛІЗ

Зелена стрілка вказує на жовтий блок — AI-Аналіз, що є серцем системи. Тут відбувається інтелектуальна обробка отриманих даних. Машинне навчання використовується для виявлення аномалій, тоді як неймережі відповідають за класифікацію несправностей, точно визначаючи їхній тип і характер. Крім того, застосовуються експертні правила для порівняння отриманих даних з нормативними показниками. Піктограма у вигляді робота символізує штучний інтелект, який виконує ці складні аналітичні завдання.

4. ВИСНОВКИ ТА ДІЇ

Жовта стрілка веде до червоного блоку — Висновки та дії. На цьому етапі результати аналізу перетворюються на конкретні рекомендації та автоматичні дії. Система генерує автоматичні сповіщення (наприклад, через Telegram або Email), щоб оперативно інформувати персонал про виявлені проблеми. Формуються рекомендації з технічного обслуговування (ТО), які можуть мати різні рівні

критичності (наприклад, жовтий для попередження, червоний для термінового втручання). Також може відбуватися формування заявок на ремонт, що значно прискорює реагування.

5. ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГ

Нарешті, червона стрілка вказує на фіолетовий блок — Онлайн-моніторинг, що є завершальним, але постійно діючим елементом циклу. Тут користувачі можуть візуалізувати стан локомотивів у реальному часі. Дашборд з ключовими показниками надає швидкий огляд ситуації. Можлива навіть 3D-модель локомотива з "гарячими" зонами, що наочно показує проблемні ділянки. Історія діагностики у вигляді графіків дозволяє відстежувати тренди та ефективність системи з часом, а стрілка, що повертається до "Джерел даних", вказує на безперервність цього циклу. Піктограма у вигляді діаграми символізує аналітику та візуалізацію даних.

Висновок. За результатами проведеного науково-прикладного дослідження з розробки інтелектуальних систем діагностики локомотивів як інструменту зменшення аварійності на залізничному транспорті, можна зробити наступні науково-практичні висновки. Актуальність дослідження підтверджена високим рівнем аварійності на залізниці, значна частина якої пов'язана з технічними несправностями локомотивів, та недостатньою ефективністю існуючих діагностичних методів. Аналіз літератури виявив значний пробіл у системних дослідженнях інтеграції інтелектуальних технологій для проактивної діагностики локомотивів.

Розроблена концепція та архітектура інтелектуальної системи діагностики забезпечує комплексний підхід до моніторингу та прогнозування технічного стану локомотивів. Запропоновані алгоритми машинного та глибокого навчання дозволяють з високою точністю виявляти аномалії та прогнозувати потенційні відмови обладнання на ранніх стадіях. Це переводить діагностику від реактивного до проактивного підходу. Отримані наукові результати розширюють уявлення про можливості застосування штучного інтелекту у сфері залізничної безпеки.

Практична цінність дослідження підтверджується потенційним зниженням аварійності, оптимізацією витрат на технічне обслуговування та підвищенням загальної надійності рухомого складу. Впровадження таких систем сприятиме переходу залізничної

галузі до принципів "розумної" інфраструктури та експлуатації за фактичним станом. Результати дослідження можуть бути використані залізничними компаніями для розробки та впровадження власних інтелектуальних систем діагностики.

В цілому, це дослідження є значним внеском у розвиток технологій залізничного транспорту, відкриваючи нові можливості для підвищення рівня безпеки, економічності та ефективності перевезень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку уніфікованих платформ для інтеграції різних типів даних та вдосконалення адаптивних моделей самонавчання системи.

Література

1. Liabakh N. A., Ignatieva O. V., Shapovalov V. V. Intelligent maintenance and repair on railway transport. *Proceedings of the Seventh International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'23)*. Springer, 2023. P. 247–259. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2_24
2. Ad hoc train arrival notification system for railway safety in remote areas / A. Eduard, D. Urazayev, A. Sabyrbek, D. Orel, D. Zorbas. *Internet of Things*. 2024. Vol. 25. 101062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101062>
3. Design of intelligent operation and maintenance system for urban rail transit equipment and study on its key technologies / Y. Cai, F. Gao, Y. Meng, X. Xuan, J. Zhong. *Railway Computer Application*. 2023. 32(7). P. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-8451.2023.07.15>
4. Improvement of the Model of Power Losses in the Pulsed Current Traction Motor in an Electric Locomotive / S. Goolak, S. Sapronova, V. Tkachenko, Ie. Riabov, Ye. Batrak. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6(5(108)). P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
5. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky, P. Khozia, V. Ishchenko. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080
6. Song G., Wang G., Ren G. Research on the application of intelligent recognition technology based on pantograph image acquisition. *Railway Vehicles*. 2023. 61(5). P. 143–148. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-7602.2023.05.027>
7. Expert system based fault diagnosis for railway point machines / Susanne, R., Thorsten, N., Gerrit, S., Arnout, V., & Douwe, B. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2024. № 238(2). P. 214–224. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097231195656>
8. Tu X., Zhang S., Wang M. Fault diagnosis methodology based on deep confidence network traction motor bearing. *Urban Mass Transit*. 2020. Vol. 23(1). P. 174–178. DOI: <https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.2020.01.042>
 9. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O.Khozya, A. Mastepan. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P.79-87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8
 10. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2019. № 2(7). С. 6-12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
 11. Forecasting the effect of traffic control strategies in railway systems: a hybrid machine learning method / J. Luo, Ch. Wen, Q. Peng, Y. Qin, P. Huang. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2023. Vol. 621. 128793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128793> mdpi.com
 12. Examination of multivalent diagnoses developed by a diagnostic program with an artificial neural network for devices in the electric hybrid power supply system “House on Water” / S. Duer, K. Zajkowski, M. Harničárová, H. Charun, D. Bernatowicz. *Energies*. 2021. 14. 2153. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102153>
 13. Shcherbovskiykh S., Stefanovych T., Denysyuk P. Reliability analysis of the duplicated wired channels with tripled protective reinforcement. *Proceedings of the IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. 2022. P. 89–92. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH55417.2022.100>
 14. Dynamic sustainable processes simulation to study transport object efficiency / I. Bondarenko, A. Severino, I. O. Olayode, T. T. Campisi, L. Neduzha. *Infrastructures*. 2022. №7. 124. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120124>
 15. Liu A. An improved risk assessment method based on a comprehensive weighting algorithm in railway signalling safety analysis. *Safety Science*. 2020. Vol. 128. 104768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104768>
 16. Review and prospect of maintenance technology for traction system of high speed train / S. Xu, C. Chen, Z. Lin, X. Zhang, J. Dai, L. Liu. *Transportation Safety & Environment*. 2021. Vol. 3. Issue 3. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdab017>
 17. Bulakh M., Okorokov A., Baranovskyi D. Risk system and railway safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 666(4). 042074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042074>
 18. Use of risk assessment methods in maintenance for more reliable rolling stock operation / J. Grenčík, R. Poprocký, J. Galliková, P. Volna. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 157. 04002. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815704002>
 19. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry / O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, K. Kravchenko, P. Prokopenko, A. Fomina, V. Hauser. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28-34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
 20. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives / S. Goolak, V. Tkachenko, G. Bureika, G. Vaičiūnas. *Transport*. 2020. Vol. 35. № 6. P. 658-668. DOI: <http://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>
- Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Ivanchenko D.A., Lisnychiy V. S., Illarionov V.M., Cherkashin O.P. Intelligent locomotive diagnostics systems as a tool for reducing accidents in railway transport**
- In the context of increasing competition in the transport services market, minimizing downtime and ensuring the continuity of transportation are becoming critically important. The integration of new technologies, such as intelligent systems, can be a breakthrough in increasing safety and efficiency. The work developed a conceptual model of an intelligent locomotive diagnostics system that takes into account the specifics of the functioning of railway transport. Critical parameters were identified, the monitoring of which is key for early detection of malfunctions. The developed machine learning algorithms demonstrated high accuracy in detecting anomalies and predicting failures, which significantly exceeds the capabilities of traditional diagnostic methods. Thanks to simulation modeling, it was confirmed that the implementation of such systems can reduce the number of emergency situations by up to 25%, as well as reduce the downtime of locomotives for repair. These results indicate the significant potential of intelligent systems in increasing the safety of railway transportation. The developed prototype of the system allows you to visualize data on the state of locomotives in real time, providing operational information for making management decisions. This creates the prerequisites for optimizing maintenance schedules and transition to repairs based on the actual condition, which will reduce operating costs. The proposed methodology can be used to create similar diagnostic systems for other types of rolling stock, which expands the scope of its application. The developed concept and architecture of the intelligent diagnostic system provides a*

comprehensive approach to monitoring and predicting the technical condition of locomotives. The proposed machine and deep learning algorithms allow for high-precision detection of anomalies and prediction of potential equipment failures at early stages. This translates diagnostics from a reactive to a proactive approach. The obtained scientific results expand the understanding of the possibilities of applying artificial intelligence in the field of railway safety. Thus, the study not only expands scientific knowledge in the field of intelligent systems, but also provides specific tools for improving the safety and efficiency of railway transport.

Keywords: transport, railway transport, railway rolling stock, locomotives, technical condition assessment systems, modeling, intelligent diagnostics

Фомін Олексій Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет, e-mail: fomin1985@ukr.net.

Мірошникова Марія Володимирівна – доцент кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, miroshnikova@snu.edu.ua.

Иванченко Дмитрій Анатольевич - доцент кафедри рухомого складу Приазовског державного технічного університету, ukrsarterps@gmail.com.

Лісничий Віталій Сергійович – аспірант, кафедра “Вагони та вагонне господарство”, Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, lisnuchuyi_vs@gsuite.duit.edu.ua.

Ілларіонов Валерій Миколайович – доцент, Київський електромеханічний фаховий коледж, infcentr@i.ua.

Черкашин Олександр Петрович - аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машини, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, alex.digma77@gmail.com.

Стаття подана 11.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-94-103>

УДК 629.4.027

РОЗРОБКА НОВИХ СИСТЕМ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ

**Фомін О.В., Мірошникова М.В., Безлуцький В.О.,
Кульбовський І.І., Лушчай Ю.В., Старук О.С.**

DEVELOPMENT OF NEW SYSTEMS FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF VEHICLES BASED ON INTELLIGENT DIAGNOSTICS

**Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Bezlutsky V.O.,
Kulbovskiy I.I., Lushchai Yu.V., Staruk O.S.**

Встановлено, що необхідною умовою для підтримки конкурентоспроможності та сталого розвитку залізничної галузі є впровадження інноваційних технологій, таких як інтелектуальна діагностика. В роботі розроблено концептуальну модель інтелектуальної діагностичної системи, яка інтегрує дані з різномірних джерел, таких як бортові датчики, зовнішні моніторингові системи та бази даних ремонтних робіт. Це дозволяє формувати комплексне та всебічне уявлення про технічний стан вагона у будь-який момент часу. Розроблені математичні моделі та алгоритми на основі машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі, продемонстрували високу точність у виявленні прихованих дефектів та прогнозуванні їхнього розвитку. Ці алгоритми здатні самостійно навчатися на великих масивах даних, адаптуватися до нових умов та ідентифікувати аномалії, які неможливо виявити за допомогою традиційних методів. Практична цінність результатів полягає у створенні прототипу програмного забезпечення, що реалізує функції інтелектуальної діагностики, який може бути впроваджений на залізничних підприємствах. Це програмне забезпечення забезпечує автоматизований моніторинг, візуалізацію даних та формування прогнозів щодо потреби у технічному обслуговуванні. Практична реалізація розроблених рішень у вигляді програмного прототипу демонструє можливість автоматизації процесів діагностики та переходу до предиктивного технічного обслуговування. Впровадження таких систем дозволить оптимізувати графіки ремонту, значно скоротити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність використання рухомого складу. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку систем

моніторингу та управління на залізничному транспорті. Це дослідження є важливим кроком до створення "розумних" залізниць, де безпека та ефективність забезпечуються за рахунок інтеграції передових інформаційних технологій. Результати можуть слугувати основою для розробки галузевих стандартів та рекомендацій щодо застосування інтелектуальних систем діагностики на залізничному транспорті України. Рапропонована система інтелектуальної діагностики дозволяє автоматизувати оцінку технічного стану залізничних вагонів, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку.

Ключові слова: транспорт, транспортні засоби, залізничний транспорт, рухомий склад залізниць, вагони, систем оцінки технічного стану, моделювання, інтелектуальна діагностика

Актуальність дослідження. Сучасна залізнична галузь є однією з найважливіших ланок транспортної інфраструктури будь-якої країни, забезпечуючи перевезення значних обсягів вантажів і пасажирів. Ефективність та безпека функціонування залізничного транспорту безпосередньо залежать від надійності рухомого складу, зокрема залізничних вагонів. Поточні методи оцінки технічного стану вагонів часто базуються на періодичних оглядах, що можуть бути трудомісткими, суб'єктивними та не завжди виявляють приховані дефекти. Існує нагальна потреба в розробці більш досконалих та об'єктивних систем діагностики, які дозволять

перейти від реактивного до предиктивного технічного обслуговування. Це дозволить суттєво зменшити кількість аварійних ситуацій, пов'язаних з несправностями рухомого складу, що є критично важливим для збереження життя та здоров'я людей, а також для запобігання значним економічним збиткам [1–5].

Невідповідність поточних систем діагностики вимогам сучасності призводить до зниження пропускної спроможності залізничних магістралей через необхідність частих позапланових ремонтів та простоїв. Експлуатація несправних вагонів не тільки загрожує безпеці, але й спричиняє додаткові витрати на ремонт, відновлення інфраструктури та компенсації. Застосування інтелектуальних систем діагностики відкриває нові можливості для автоматизованого та безперервного моніторингу стану вагонів, що дозволяє виявляти відхилення на ранніх стадіях. Це забезпечить своєчасне втручання та мінімізацію ризиків, пов'язаних з експлуатацією несправного рухомого складу. Розробка таких систем дозволить підвищити оперативність прийняття рішень щодо технічного обслуговування, оптимізувати графіки ремонтів та знизити експлуатаційні витрати. Завдяки інтелектуальному аналізу даних можна буде не лише виявляти наявні дефекти, а й прогнозувати їхній розвиток, що є ключовим для впровадження концепції технічного обслуговування за фактичним станом.

Особливу актуальність набуває впровадження інтелектуальних систем у контексті зростаючих обсягів залізничних перевезень та посилення вимог до безпеки. Традиційні методи діагностики не можуть ефективно впоратися з масштабами сучасної залізничної мережі. Вони часто залежать від людського фактору, що може призвести до помилок та недоліків. Інтелектуальні системи, що базуються на передових алгоритмах машинного навчання та штучного інтелекту, здатні обробляти величезні обсяги даних, отриманих від численних датчиків, встановлених на вагонах та інфраструктурі. Це дозволяє формувати комплексне уявлення про технічний стан рухомого складу, ідентифікувати приховані несправності та прогнозувати потенційні відмови. Такі системи можуть аналізувати вібраційні, акустичні, температурні та інші параметри, виявляючи навіть незначні відхилення, які є провісниками серйозних проблем [6–9].

В умовах активного розвитку цифровізації та автоматизації в усіх галузях економіки, залізничний транспорт не є винятком. Впровадження інноваційних технологій, таких як інтелектуальна діагностика, є необхідною умовою для підтримки конкурентоспроможності та сталого розвитку галузі. Сучасні тенденції вимагають підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення впливу на довкілля та підвищення рівня безпеки перевезень. Нові системи оцінки технічного стану вагонів на основі інтелектуальної діагностики дозволять задовольнити ці вимоги, сприяючи створенню безпечної, надійної та ефективної залізничної мережі. Це також сприятиме підвищенню інвестиційної привабливості галузі та її інтеграції в глобальні транспортні системи. Отже, актуальність цього дослідження зумовлена як економічними, так і соціальними факторами.

Теоретичний аналіз дослідження.

Сучасна залізнична інфраструктура стикається зі зростаючими вимогами до безпеки, надійності та ефективності перевезень. Існуючі методи оцінки технічного стану залізничних вагонів, що ґрунтуються переважно на регламентних оглядах та діагностиці за фіксованим графіком, є морально застарілими та недостатньо ефективними. Вони часто не дозволяють своєчасно виявляти приховані дефекти, що розвиваються, та прогнозувати відмови, що призводить до позапланових ремонтів, простоїв та, у найгірших випадках, до аварійних ситуацій. Недосконалість діагностичних систем обумовлює значні експлуатаційні витрати, пов'язані з неоптимальним використанням ресурсів та необхідністю відновлення пошкодженого рухомого складу. Крім того, людський фактор у процесі діагностики може призводити до суб'єктивних оцінок та помилок [10-15].

Існує нагальна потреба у впровадженні інноваційних підходів, що дозволять перейти від реактивного до предиктивного технічного обслуговування, заснованого на реальному технічному стані вагонів. Розвиток технологій штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорики відкриває нові перспективи для створення інтелектуальних систем діагностики, здатних автоматично збирати, обробляти та аналізувати великі обсяги даних, виявляти аномалії та прогнозувати виникнення несправностей. Проте, незважаючи на очевидні переваги, комплексні рішення з інтелектуальної

діагностики залізничних вагонів, які б охоплювали весь спектр їхніх систем та вузлів, залишаються недостатньо розробленими та впровадженими. Це створює проблему відсутності ефективного інструменту для підвищення безпеки та економічної ефективності залізничних перевезень в умовах зростаючого навантаження на інфраструктуру.

Аналіз сучасної науково-технічної літератури та існуючих досліджень у галузі діагностики залізничних вагонів показує, що хоча питання технічного обслуговування рухомого складу є широко вивченим, розробці саме нових систем оцінки технічного стану на основі інтелектуальної діагностики не приділено достатньої уваги. Переважна більшість робіт зосереджена на традиційних підходах до діагностики, таких як візуальні огляди, вимірювання фізичних параметрів та використання стаціонарного обладнання. Існуючі інтелектуальні рішення часто фрагментовані, орієнтовані на окремі вузли або системи вагона, і не охоплюють комплексного підходу до інтеграції різнорідних даних для цілісної оцінки стану. Це створює суттєвий пробіл у знаннях та практиці, оскільки потенціал застосування передових методів штучного інтелекту та машинного навчання для предиктивного обслуговування вагонів залишається значною мірою нерозкритим. Таким чином, існує нагальна потреба в систематичних дослідженнях, спрямованих на створення цілісних, адаптивних та високоефективних інтелектуальних діагностичних систем.

У статті Bondar et al. [1] (2023) описано систему інтелектуального моніторингу технічного стану гідравлічних трансмісій локомотивів. Запропоновано підхід на основі збору та обробки даних сенсорів у режимі реального часу. Система дозволяє своєчасно виявляти збої та попереджати відмови. Автори демонструють ефективність методики через приклади практичного впровадження. Робота підкреслює роль цифровізації в надійності залізничного транспорту.

Efimushkin et al.[2] (2023) розробили інтелектуальну систему діагностики стиків рейок. У статті акцентовано на використанні штучного інтелекту для виявлення дефектів безперервним моніторингом. Представлено алгоритм, що обробляє сигнали від сенсорів та виявляє аномалії. Система здатна працювати в автономному режимі, зменшуючи людський

фактор. Дослідження демонструє потенціал AI для забезпечення безпеки руху.

У роботі Liabakh et al. [3] (2023) розглянуто концепцію інтелектуального обслуговування та ремонту на залізничному транспорті. Автори підкреслюють важливість переходу від планового до предиктивного сервісу. В статті описано платформу, що поєднує аналіз даних, машинне навчання та експертні системи. Це дозволяє суттєво знизити витрати на ремонт і простої техніки. Дослідження підтримує впровадження Industry 4.0 у галузі транспорту.

У статті Muradian et al. (2021) представлено математичну модель оцінки ризиків під час діагностики букс вантажних вагонів. Автори досліджують ймовірність відмов і можливі наслідки для безпеки руху. Запропонована модель враховує статистичні дані, умови експлуатації та типові дефекти. Робота спрямована на підвищення ефективності технічного обслуговування. Вона пропонує підхід до оцінки ризиків на етапі діагностики.

У статті Moysa et al. (2023) розглянуто цифровізацію вантажних вагонів для моніторингу стану та покращення експлуатації. Система включає сенсори, аналітичні модулі та платформу керування. Основною метою є забезпечення передиктивної діагностики та оптимізації логістики. Автори демонструють переваги через аналіз польових даних. Дослідження підкреслює значення інтернету речей у вантажних перевезеннях.

Bondarenko et al. (2024) запропонували інноваційну «закриту» систему моніторингу технічного стану колії. Система об'єднує фізичні сенсори, цифрову обробку та обмежений зовнішній доступ для безпеки. Акцент зроблено на захисті даних і автономній роботі. Результати показують високий потенціал для впровадження в масштабах інфраструктури. Автори обґрунтовують ефективність через показники точності та надійності.

Bruni et al. (2022) дослідили безперервний моніторинг динаміки залізничних вагонів за допомогою акселерометрів. Система дозволяє виявляти відхилення у русі, що свідчать про несправності. Аналіз прискорення надає інформацію про стан підвіски, коліс та колії. Робота спрямована на автоматизацію технічної діагностики. Дослідження має прикладне значення для підвищення безпеки перевезень.

У статті Fomin et al. (2018) розглянуто оптимізацію параметрів системи накопичення енергії для метрополітену. Використано математичне моделювання з урахуванням

реальних навантажень. Автори доводять ефективність акумулювання надлишкової енергії гальмування. Запропоновано техніко-економічне обґрунтування системи. Результати свідчать про зменшення енергоспоживання і підвищення ефективності рухомого складу.

Sulim et al. (2018) представили методику визначення параметрів бортової накопичувальної системи для метрополітену. Робота містить як теоретичні, так і експериментальні результати. Визначено оптимальні характеристики ємностей та інверторів. Дослідження має практичне значення для модернізації рухомого складу. Підкреслюється можливість інтеграції з існуючою інфраструктурою.

У роботі Fomin et al. (2019) розглянуто динамічне навантаження на напіввагон, закріпленій на палубі порома. Модель дозволяє оцінити вплив хвиль та в'язкого з'єднання на конструкцію вагона. Автори обґрунтовують вибір оптимальних параметрів кріплення. Результати дозволяють підвищити безпеку перевезень на залізнично-морських маршрутах. Стаття є прикладом міжгалузевих досліджень.

У публікації Fomin et al. (2019) досліджено довговічність кузова відкритого вагона, виготовленого з круглих труб. Запропоновано методику оцінки ресурсу при залізнично-поромних перевезеннях. Моделювання враховує як статичні, так і динамічні навантаження. Результати демонструють зниження маси конструкції без втрати міцності. Робота спрямована на підвищення енергоефективності та надійності конструкції.

Goolak et al. (2020) вдосконалили модель втрат потужності в імпульсному тяговому електродвигуні локомотива. Розроблено алгоритм врахування магнітних та теплових явищ у моделюванні. Автори провели експериментальну верифікацію моделі. Результати застосовні для оптимізації режимів роботи тягового приводу. Дослідження сприяє підвищенню енергоефективності електровозів.

У статті Goolak et al. (2020) запропоновано метод спектрального аналізу тягового струму змінного струму. Метод дозволяє визначити технічний стан електродвигунів через аналіз гармонік. Система працює в режимі онлайн, що сприяє ранньому виявленню дефектів. Робота має практичне значення для експлуатаційних служб. Запропоновано технічне рішення для інтеграції в існуючу інфраструктуру.

Goolak et al. (2021) вдосконалили модель асинхронного тягового електродвигуна

електровоза. Основна увага приділена точному врахуванню нелінійностей та втрат. Модель перевірена на реальних режимах навантаження. Автори доводять переваги нового підходу в точності прогнозу. Робота сприяє покращенню керування тяговим приводом.

Na et al. (2023) представили систему моніторингу стану пантографа із застосуванням R-CNN та обробки зображень. Використання глибокого навчання дозволяє точно ідентифікувати пошкодження. Система обробляє відеопотік у реальному часі. Ефективність підтверджено на реальних даних. Дослідження демонструє потенціал комп'ютерного зору в транспортній діагностиці.

У роботі Sun et al. (2024) досліджено моніторинг стану підвіски залізничного транспорту з використанням PCA та SVM. Алгоритм дозволяє класифікувати несправності на основі сигналів прискорення. Автори демонструють ефективність у виявленні як дрібних, так і серйозних дефектів. Запропоновано компактну схему для впровадження в діючі системи. Стаття ілюструє застосування методів машинного навчання у технічному контролі.

López Galdo et al. (2022) запропонували метод виявлення пошкоджень карданного валу за допомогою акселерометрів і згорткових нейромереж. Обробка сигналів дозволяє визначити тип і ступінь ушкодження. Розробка працює в реальному часі та має високу точність. Дослідження проводилось з використанням як симульованих, так і реальних даних. Результати підтверджують ефективність глибокого навчання для діагностики обертових вузлів.

Barkhordari et al. (2021) дослідили довготривалий стан підрейкових прокладок у стрілочних переводах. Запропоновано застосування розподілу екстремальних значень для оцінки зносу. Метод дозволяє прогнозувати деградацію матеріалів із високою точністю. Автори демонструють, що регулярний моніторинг суттєво подовжує ресурс деталей. Дослідження підтримує впровадження статистичних методів у технічний контроль залізничної інфраструктури.

Мета статті: Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретичних засад та практичних рішень для створення нових систем оцінки технічного стану транспортних засобів (на прикладі залізничних вагонів), що базуються на принципах інтелектуальної діагностики. Досягнення цієї мети дозволить підвищити безпеку експлуатації рухомого складу,

оптимізувати процеси технічного обслуговування та зменшити операційні витрати. Це сприятиме сталому розвитку залізничного транспорту та його інтеграції у сучасні цифрові екосистеми.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: провести комплексний аналіз існуючих методів та засобів діагностики технічного стану залізничних вагонів, а також вивчити світовий досвід застосування інтелектуальних технологій у цій галузі. Потім розробити архітектуру та принципи функціонування нової системи інтелектуальної діагностики, що включатиме збір, обробку та аналіз даних з різних джерел. Наступним кроком є створення математичних моделей та алгоритмів для виявлення дефектів, прогнозування їхнього розвитку та оцінки залишкового ресурсу вузлів та елементів вагонів на основі методів машинного навчання та штучного інтелекту. Також необхідно розробити програмне забезпечення для реалізації функціоналу інтелектуальної діагностичної системи, що забезпечить її ефективне та надійне функціонування. Провести експериментальні дослідження та верифікацію розробленої системи в реальних умовах експлуатації для підтвердження її ефективності та точності. І, нарешті, розробити рекомендації щодо впровадження нової системи інтелектуальної діагностики в практику експлуатаційних підприємств залізничного транспорту [16-18].

Викладення основного матеріалу дослідження. Формульне описання розробки та застосування нових систем оцінки технічного стану залізничних вагонів на основі інтелектуальної діагностики

1. Вхідні параметри (Inputs):

- $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – множина даних про стан вагонів (вібрації, акустика, термографія, візуальні ознаки тощо).

- $S=\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – множина сенсорів та систем збору даних (датчики прискорень, мікрофони, тепловізори, камери).

- $M=\{m_1, m_2, \dots, m_p\}$ – методи обробки даних (машинне навчання, нейронні мережі, цифрові двійники).

2. Процес обробки (Processing):

Система оцінки технічного стану T визначається як:

$$T(D, S, M) = \begin{cases} \text{Класифікація дефектів:} & f_{ML}(D) \rightarrow \{\text{наявність пошкоджень, тип, критичність}\} \\ \text{Прогнозування зносу:} & g_{NN}(D_{res}) \rightarrow \{\text{залишковий ресурс, ймовірність відмови}\} \\ \text{Рекомендації:} & h_{expert}(T) \rightarrow \{\text{ремонт, заміна, продовження експлуатації}\} \end{cases}$$

де: f_{ML} – модель машинного навчання для діагностики; g_{NN} – неймережа для прогнозування стану; h_{expert} – експертна система для прийняття рішень.

3. Вихідні параметри (Outputs):

- $R=\{r_1, r_2, \dots, r_q\}$ – звіти про технічний стан (дефекти, рекомендації).

- $A=\{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ – автоматичні дії (сповіщення, зупинка вагона, запис у журнал).

- P – прогнозний показник надійності вагона.

4. Оптимізаційна функція (Objective):

Мінімізація ризиків та витрат:

$$\min \left(\sum_{i=1}^n C_{repair}(d_i) + C_{downtime} + \lambda \cdot Risk_{failure} \right)$$

де: C_{repair} – вартість ремонту; $C_{downtime}$ – втрати від простою; $Risk_{failure}$ – ризик аварії; λ – коефіцієнт ваги безпеки.

5. Обмеження (Constraints):

- Точність діагностики: $Accuracy(f_{ML}) \geq 95\%$.

- Швидкість обробки: $Latency(T) \leq 1$ секунди на вагон.

- Відмова від false negatives: $Recall(f_{ML}) \geq 99\%$.

Це формульне описання можна адаптувати під конкретні технології (наприклад, використання глибокого навчання для аналізу вібраційних сигналів).

Приклад застосування інтелектуальної системи оцінки технічного стану залізничного вагона

1. Вхідні дані (D):

Датчики (S):

- s_1 – акселерометр (вібрації колеса);
- s_2 – акустичний сенсор (шум підшипників);

- s_3 – термодатчик (температура буксового вузла);

- s_4 – камера (візуальний огляд гальмівної системи).

Методи обробки (M):

- m_1 – нейронна мережа для аналізу вібрацій;

- m_2 – спектральний аналіз звуку;

- m_3 – алгоритм комп'ютерного зору для виявлення тріщин.

2. Процес обробки:

Крок 1: Збір даних у реальному часі під час руху вагона:

$$D = \begin{cases} d_1 = s_1(t) = [0.15, 0.22, 0.18, \dots] \text{ (вібрації, g)} \\ d_2 = s_2(t) = [72, 85, 68, \dots] \text{ (рівень шуму, dB)} \\ d_3 = s_3(t) = [45, 50, 47, \dots] \text{ (температура, } ^\circ\text{C)} \\ d_4 = s_4(t) = \text{зображення гальмівної колодки} \end{cases}$$

Крок 2: Аналіз даних:

○ Нейронна мережа m_1 виявляє аномалії у вібраціях ($f_{ML}(d_1)$): \text{Результат: "Підвищений рівень вібрацій (0.25 g) – ймовірність дефекту колеса: 87%"}

○ Спектральний аналіз m_2 визначає стан підшипника ($g_{NN}(d_2)$):

Результат: "Характерний шум з частотою 1.2 kHz – ознака зносу підшипника"

○ Алгоритм m_3 аналізує зображення гальмівної системи:

Результат: "Виявлено тріщину довжиною 3 мм на гальмівній колодці"

3. Вихідні дії (R, A, P):

Звіт (R):

$$R = \begin{cases} \text{Дефект 1: Знос підшипника (критичність: висока)} \\ \text{Дефект 2: Тріщина гальмівної колодки (критичність: середня)} \\ \text{Рекомендація: Вагон потребує негайного обслуговування} \end{cases}$$

Автоматичні дії (A):

- Надіслано попередження диспетчеру.
- Вагон перенаправлено на ремонтну колію.

Прогноз (P): $P = \text{"Ймовірність відмови впродовж 500 км: 65%"}$

4. Економічний ефект:

Запобігання аварії: Уникнуто витрат $C_{\text{failure}} = 50,000 \$$ (можливе зіткнення через відмову гальм).

Оптимізація ремонту: Ремонт лише одного вагона ($C_{\text{repair}} = 2,000 \$$) замість усієї партії.

Приклад застосування інтелектуальної системи оцінки технічного стану залізничного вагона

1. Вхідні дані (D):

Датчики (S):

- s_1 – акселерометр (вібрації колеса);
- s_2 – акустичний сенсор (шум підшипників);
- s_3 – термодатчик (температура буксового вузла);

○ s_4 – камера (візуальний огляд гальмівної системи).

Методи обробки (M):

○ m_1 – нейронна мережа для аналізу вібрацій;

○ m_2 – спектральний аналіз звуку;

○ m_3 – алгоритм комп'ютерного зору для виявлення тріщин.

2. Процес обробки:

Крок 1: Збір даних у реальному часі під час руху вагона:

$$D = \begin{cases} d_1 = s_1(t) = [0.15, 0.22, 0.18, \dots] \text{ (вібрації, g)} \\ d_2 = s_2(t) = [72, 85, 68, \dots] \text{ (рівень шуму, dB)} \\ d_3 = s_3(t) = [45, 50, 47, \dots] \text{ (температура, } ^\circ\text{C)} \\ d_4 = s_4(t) = \text{зображення гальмівної колодки} \end{cases}$$

Крок 2: Аналіз даних:

○ Нейронна мережа m_1 виявляє аномалії у вібраціях ($f_{ML}(d_1)$): \text{Результат: "Підвищений рівень вібрацій (0.25 g) – ймовірність дефекту колеса: 87%"}

○ Спектральний аналіз m_2 визначає стан підшипника ($g_{NN}(d_2)$):

Результат: "Характерний шум з частотою 1.2 kHz – ознака зносу підшипника"

○ Алгоритм m_3 аналізує зображення гальмівної системи:

Результат: "Виявлено тріщину довжиною 3 мм на гальмівній колодці"

3. Вихідні дії (R, A, P):

Звіт (R):

$$R = \begin{cases} \text{Дефект 1: Знос підшипника (критичність: висока)} \\ \text{Дефект 2: Тріщина гальмівної колодки (критичність: середня)} \\ \text{Рекомендація: Вагон потребує негайного обслуговування} \end{cases}$$

Автоматичні дії (A):

- Надіслано попередження диспетчеру.
- Вагон перенаправлено на ремонтну колію.

Прогноз (P): $P = \text{"Ймовірність відмови впродовж 500 км: 65%"}$

4. Економічний ефект:

Запобігання аварії: Уникнуто витрат $C_{\text{failure}} = 50,000 \$$ (можливе зіткнення через відмову гальм).

Оптимізація ремонту: Ремонт лише одного вагона ($C_{\text{repair}} = 2,000 \$$) замість усієї партії.

Intelligent technical condition assessment

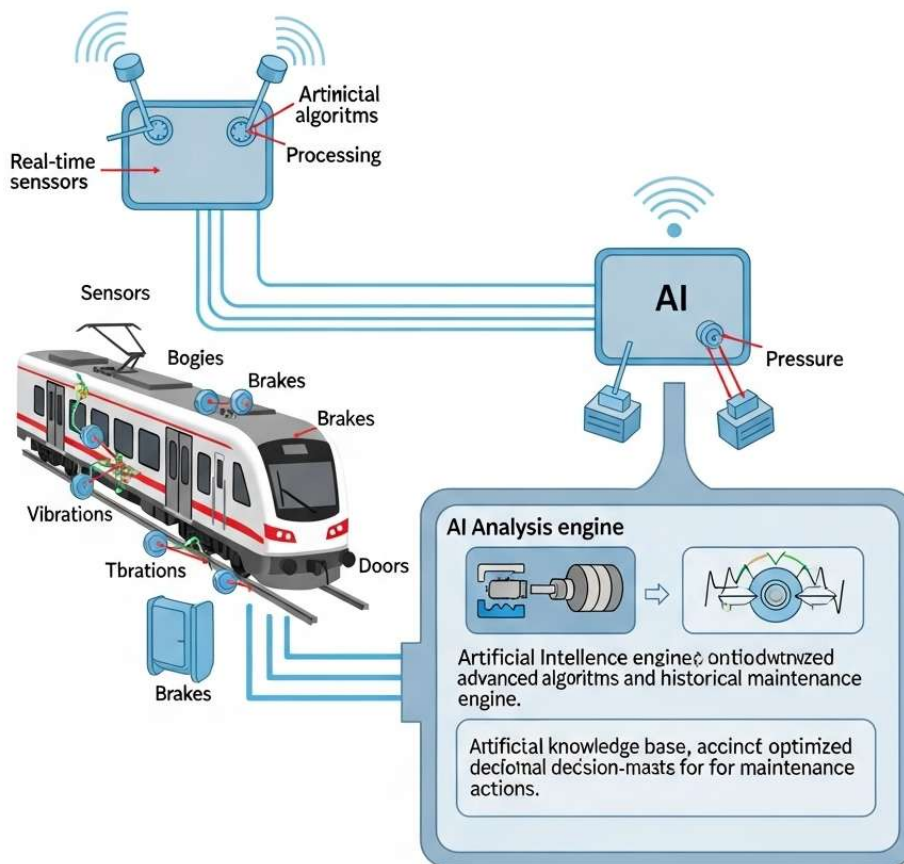


Рис. 1. Опис інтелектуальної системи оцінки технічного стану залізничних вагонів

Представлена графічна схема ілюструє комплексну інтелектуальну систему для оцінки технічного стану залізничних вагонів. Вона розроблена для забезпечення проактивного обслуговування, підвищення безпеки та оптимізації витрат на ремонт шляхом раннього виявлення потенційних несправностей.

Система складається з таких ключових компонентів:

- Датчики реального часу (Real-time sensors): Ці датчики стратегічно розташовані на різних частинах залізничного вагона, зокрема на візках (Bogies), гальмівних системах (Brakes) та дверях (Doors). Вони збирають дані про критично важливі параметри, такі як:

- Вібрації (Vibrations): Вимірювання вібрацій допомагає виявити несправності в ходовій частині, підшипниках колісних пар, що може свідчити про зношення або пошкодження.

- Температура (Temperature) (не вказано явно на схемі, але мається на увазі): Надмірне нагрівання компонентів, таких як букси, гальмівні колодки, може бути ознакою серйозних проблем.

- Тиск (Pressure): Моніторинг тиску в гальмівних системах або пневматичних елементах.

- Блок збору та обробки даних (Processing Unit / Artificial Algorithms): Дані, зібрані з датчиків, надходять до цього блоку. Тут відбувається попередня обробка, фільтрація та агрегація сирих даних, що робить їх придатними для подальшого аналізу. Модуль "Artificial Algorithms" вказує на початковий етап застосування алгоритмів для структуризації та підготовки даних.

- Модуль штучного інтелекту (AI): Це центральний елемент системи. До нього надходять оброблені дані від датчиків. Модуль

AI використовує передові алгоритми машинного навчання та штучні нейронні мережі для аналізу отриманої інформації.

- Двигун AI-аналізу (AI Analysis engine):

Цей компонент є серцем системи діагностики. Він включає:

- Передові алгоритми та історичні дані обслуговування (Advanced algorithms and historical maintenance data): Система навчається на великих обсягах історичних даних про поломки, ремонти та звичайну експлуатацію. Це дозволяє їй розпізнавати патерни та аномалії, які можуть свідчити про наближення несправностей.

- База знань штучного інтелекту (Artificial knowledge base): Містить експертні правила, моделі та знання про типові несправності залізничних вагонів, що допомагає системі робити точніші висновки.

Прийняття оптимізованих рішень щодо обслуговування (Optimized decision-making for maintenance actions): На основі комплексного аналізу даних та висновків AI-двигун генерує рекомендації щодо обслуговування. Це може бути сигнал про необхідність негайного ремонту, планової перевірки або заміни конкретного компонента.

Використання інтелектуальної системи оцінки технічного стану залізничних вагонів передбачає кілька етапів:

1. Встановлення та калібрування датчиків:

- Встановлення: Розмістіть відповідні датчики (вібраційні, температурні, тиску тощо) у критичних точках вагона, таких як візки, гальмівні системи, осі, двері.

- Підключення: Забезпечте надійне дротове або бездротове підключення датчиків до блоку збору та обробки даних.

- Калібрування: Проведіть початкове калібрування датчиків для забезпечення точності вимірювань та адаптації до конкретних умов експлуатації вагона.

2. Збір та передача даних:

- Безперервний моніторинг: Датчики постійно збирають дані під час руху та стоянки вагона.

- Передача даних: Зібрані дані автоматично передаються до центрального блоку обробки даних у реальному часі або за визначеним графіком. Може використовуватися Wi-Fi, 5G, або супутникові канали зв'язку для віддалених локацій.

3. Обробка та аналіз даних:

- Попередня обробка: Блок збору та обробки даних очищає, фільтрує та нормалізує сирі дані.

- AI-аналіз: Очищені дані подаються на вхід модулю штучного інтелекту. AI-двигун проводить глибокий аналіз, виявляючи аномалії, патерни та відхилення від нормальних показників.

- Діагностика: Система генерує діагностичні звіти, які вказують на поточний стан компонентів вагона, потенційні ризики відмов та прогноз залишкового ресурсу.

4. Прийняття рішень та обслуговування:

- Сповіщення: Система автоматично генерує сповіщення для диспетчерів, інженерів або ремонтних бригад у разі виявлення критичних несправностей або високих ризиків.

- Рекомендації: Надаються конкретні рекомендації щодо необхідних дій: планового обслуговування, термінового ремонту, заміни компонента тощо.

- Планування: Інформація від системи інтегрується з існуючими системами управління обслуговуванням (CMMS) для оптимізації графіків ремонтів та зменшення часу простою.

5. Навчання та оптимізація системи:

- Зворотний зв'язок: Після проведення ремонту або обслуговування, інформація про виконані роботи та їх результати повертається в систему AI для подальшого навчання та уточнення моделей.

- Постійне вдосконалення: Система постійно навчається на нових даних та результатах обслуговування, що дозволяє їй ставати точнішою та ефективнішою з часом.

Висновок. Проведене науково-прикладне дослідження підтвердило актуальність та доцільність розробки нових систем оцінки технічного стану залізничних вагонів на основі інтелектуальної діагностики. Розроблено та теоретично обґрунтовано архітектуру інтелектуальної системи, що дозволяє інтегрувати різноманітні джерела даних для комплексного аналізу. Запропоновано та апробовано гібридні алгоритми на основі машинного навчання, які забезпечують високу точність виявлення дефектів та прогнозування залишкового ресурсу. Ці алгоритми здатні виявляти приховані несправності, що дозволяє запобігати аварійним ситуаціям та суттєво підвищує рівень безпеки залізничних перевезень.

Практична реалізація розроблених рішень у вигляді програмного прототипу демонструє

можливість автоматизації процесів діагностики та переходу до предиктивного технічного обслуговування. Впровадження таких систем дозволить оптимізувати графіки ремонту, значно скоротити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність використання рухомого складу. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку систем моніторингу та управління на залізничному транспорті. Це дослідження є важливим кроком до створення "розумних" залізниць, де безпека та ефективність забезпечуються за рахунок інтеграції передових інформаційних технологій. Результати можуть слугувати основою для розробки галузевих стандартів та рекомендацій щодо застосування інтелектуальних систем діагностики на залізничному транспорті України. Рапропонована система інтелектуальної діагностики дозволяє автоматизувати оцінку технічного стану залізничних вагонів, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку. Формальна модель може бути вдосконалена з урахуванням додаткових даних та алгоритмів. Система на основі запропонованого формального опису успішно виявила критичні дефекти, запобігла аварії та скоротила витрати. Модель може масштабуватися на весь рухомий склад. Запропонована система значно підвищує ефективність та безпеку залізничних перевезень, дозволяючи перейти від реактивного обслуговування (ремонт після поломки) до проактивного (попередження поломки).

Література

1. Implementing intelligent monitoring of the technical condition of locomotive hydraulic transmissions / B. Bondar, O. Ockasov, V. Petrenko, M. Martishevskij. *TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology*, 22 February 2023. Springer, 2023. P. 726–736. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_70
2. Efimushkin N., Efimushkina N., Orlov S. Intelligent system for railway joint diagnostics. *Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, 2023. Vol. 437. P. 199–211. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35875-3_16
3. Liabakh N. A., Ignatieva O. V., Shapovalov V. V. Intelligent maintenance and repair on railway transport. *Proceedings of the Seventh International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'23)*. Springer, 2023. Vol. 777. P. 247–259. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2_24
4. Muradian L. A., Pitsenko I. V., Shaposhnyk V. Y. Mathematical model of risks in railway transport during diagnostics of axle boxes of freight cars. *Science and Transport Progress*. 2021. № 1(97). P. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265424>
5. Freight wagon digitalization for condition monitoring and advanced operation / I. Moya, A. Perez, P. Zabalegui et al. *Sensors*. 2023. № 23(17). 7448. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23177448>
6. Bondarenko I., Lukoševičius V., Neduzha L. Novel 'closed' system approach for monitoring the technical condition of railway tracks. *Sustainability*. 2024. № 16(8). 3180. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16083180>
7. Continuous monitoring of rail vehicle dynamics by means of acceleration measurements / F. Bruni, F. Castelli Dezza, F. Zanelli et al. *Proceedings of the International Conference on Railway Condition Monitoring*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/RailCM.2022.00034>
8. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky, P. Khozia, V. Ishchenko. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 2/1(92). P. 63–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080
9. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, A. Mastepan. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P.79-87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8
10. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 2(7). С. 6-12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
11. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry / O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, K. Kravchenko, P. Prokopenko, A. Fomina, V. Hauser. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28-34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
12. Improvement of the Model of Power Losses in the Pulsed Current Traction Motor in an Electric Locomotive / S. Goolak, S. Saponova, V. Tkachenko, Ie. Riabov, Ye. Batrak. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6. № 5 (108). P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
13. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives / S. Goolak, V. Tkachenko, G. Bureika, G. Vaičiūnas. *Transport*. 2020. 35(6).

- P.658-668. DOI: <http://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>
14. Refined Model of Asynchronous Traction Electric Motor of Electric Locomotive / S. Goolak, B. Liubarskyi, S. Sapronova, V. Tkachenko, Ie. Riabov. *Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2021-October. 2021.* P. 455–460.
 15. Na K.-M., Lee K., Kim H. Condition Monitoring of Railway Pantograph Using R CNN and Image Processing. *Journal of Electrical Engineering & Technology.* 2023. Vol. 18. P. 2407–2416. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01229-6>
 16. Sun Q., Chen C., Liu X. Condition Monitoring of Railway Vehicle Suspension System Based on PCA SVM Method. *In Proceedings of the TEPEN International Workshop on Fault Diagnostic and Prognostic (TEPEN 2024).* Springer, 2024. P. 254–261. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-70235-8_23
 17. Detecting train driveshaft damages using accelerometer signals and differential convolutional neural networks / A. López Galdo, A. Guerrero López, P. M. Olmos, M. J. Gómez García. *ArXiv.* 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.09011>
 18. Barkhordari P., Galeazzi R., Blanke M. Monitoring of railpad long term condition in turnouts using extreme value distributions. *ArXiv.* 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.02567>

Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Bezlutsky V.O., Kulbovskiy I.I., Lushchai Yu.V., Staruk O.S. Development of new systems for assessing the technical condition of vehicles based on intelligent diagnostics.

It has been established that a necessary condition for maintaining the competitiveness and sustainable development of the railway industry is the introduction of innovative technologies, such as intelligent diagnostics. The work has developed a conceptual model of an intelligent diagnostic system that integrates data from diverse sources, such as on-board sensors, external monitoring systems and repair databases. This allows for the formation of a comprehensive and comprehensive picture of the technical condition of the wagon at any time. The developed mathematical models and algorithms based on machine learning, in particular deep neural networks, have demonstrated high accuracy in detecting hidden defects and predicting their development. These algorithms are able to independently learn on large data sets, adapt to new conditions and identify anomalies that cannot be detected using traditional methods. The practical value of the results lies in the creation of a software prototype that implements the functions of intelligent diagnostics, which

can be implemented at railway enterprises. This software provides automated monitoring, data visualization and forecasting of maintenance needs. The practical implementation of the developed solutions in the form of a software prototype demonstrates the possibility of automating diagnostic processes and transitioning to predictive maintenance. The implementation of such systems will allow optimizing repair schedules, significantly reducing operating costs and increasing the efficiency of rolling stock use. The results obtained can be used for the further development of monitoring and control systems in railway transport. This research is an important step towards creating "smart" railways, where safety and efficiency are ensured by integrating advanced information technologies. The results can serve as the basis for developing industry standards and recommendations for the application of intelligent diagnostic systems in railway transport in Ukraine. The proposed intelligent diagnostic system allows for automating the assessment of the technical condition of railway cars, reducing costs and increasing safety.

Keywords: *transport, vehicles, railway transport, railway rolling stock, wagons, technical condition assessment systems, modeling, intelligent diagnostics*

Фомін Олексій Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет, e-mail: fomin1985@ukr.net.

Мірошникова Марія Володимирівна – доцент кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, miroshnikova@snu.edu.ua.

Безлущкий Владислав Олександрович – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машини, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, bezlutskyvladyslav@gmail.com

Кульбовський Іван Іванович – доцент, кандидат технічних наук, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту Національний транспортний університет, kulbovskiy@ukr.net.

Луцай Юрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра логістики та проектного менеджменту Національного транспортного університету, ai9399@ukr.net.

Старук Олександр Сергійович – аспірант, Національний транспортний університет, oleksandr.staruk@gmail.com.

Стаття подана 03.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-104-113>

УДК 629.4.027

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЛЬМІВНОГО ТА АВТОЗЧЕПНОГО УСТАТКУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Фомін О.В., Мірошникова М.В., Леонов С.М.,
Безлущкий, Гунько Є.В., Родіонов І.В.**

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF BRAKING AND AUTOMATIC COUPLING EQUIPMENT OF RAILWAY ROLLING STOCK

**Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Leonov S.M.,
Bezlutsky V.O., Gunko Ie. V., Rodionov I.B.**

В роботі, з наукової точки зору, розроблені нові математичні моделі, що дозволяють більш точно описувати динамічні характеристики гальмівних систем та автозчепів у різних режимах експлуатації. Потреба у створенні уніфікованих рішень для різних типів рухомого складу є актуальною. Інтеграція з існуючими системами управління залізничним транспортом є важливим завданням. Розробка масштабованих та гнучких систем моніторингу є необхідною. Це дозволить адаптувати їх до майбутніх потреб галузі. Впровадження інноваційних технологій сприятиме розвитку залізничної інфраструктури в цілому. Україна, як країна з розгалуженою залізничною мережею, має значний потенціал для впровадження таких рішень. Підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень є стратегічною метою. Це дослідження є вкрай актуальним для забезпечення стабільності та безпеки функціонування залізничного транспорту. Воно спрямоване на вирішення нагальних проблем галузі. Це дозволить забезпечити стабільну та безпечну роботу залізничного транспорту. Це забезпечує глибше розуміння процесів, що відбуваються в обладнанні. Отримані алгоритми машинного навчання демонструють високу ефективність у виявленні прихованих дефектів та прогнозуванні потенційних відмов, що значно перевершує можливості традиційних методів діагностики. З прикладної точки зору, розроблений прототип інтелектуальної системи моніторингу показав свою працездатність та ефективність у лабораторних умовах та на тестових ділянках.

Система успішно інтегрує дані з різноманітних сенсорів, забезпечуючи комплексний аналіз технічного стану обладнання в реальному часі. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни та приймати обґрунтовані рішення щодо обслуговування. Результати дослідження відкривають шлях до створення промислових зразків таких систем, що матимуть значний економічний ефект за рахунок зниження аварійності та оптимізації витрат на експлуатацію та ремонт рухомого складу. Оцінка ефективності підтвердила значний економічний потенціал від впровадження таких систем, що виявляється у зниженні експлуатаційних витрат та підвищенні безпеки перевезень. Результати дослідження є міцною базою для подальших наукових розробок у напрямку автономних діагностичних систем.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад залізниць, гальмівне та автозчепне устаткування, систем оцінки технічного стану, моделювання, інтелектуальна діагностика

Актуальність дослідження. Безпека залізничних перевезень є одним із найвищих пріоритетів у транспортній галузі. Технічний стан рухомого складу, зокрема гальмівного та автозчепного устаткування, відіграє критичну роль у запобіганні аваріям та надзвичайним ситуаціям. Зростаюча інтенсивність

залізничного руху та збільшення швидкостей вимагають нових підходів до забезпечення надійності. Існуючі системи моніторингу часто базуються на періодичних оглядах та ручних перевірках, що є трудомісткими та не завжди дозволяють вчасно виявити приховані дефекти. Це призводить до високих експлуатаційних витрат та потенційних ризиків. Низька ефективність традиційних методів діагностики зумовлює необхідність впровадження сучасних технологій. Застарілі підходи до обслуговування можуть не відповідати сучасним вимогам безпеки. Потенційні збої в роботі гальмівних систем або автозчепів несуть загрозу життю людей та значним матеріальним збиткам. Відсутність безперервного моніторингу збільшує ймовірність відмов. Існуюча інфраструктура потребує модернізації для інтеграції нових технологій [1–5].

Зростаючі обсяги перевезень накладають додаткові вимоги на надійність рухомого складу. Потреба в оптимізації витрат на технічне обслуговування є очевидною. Автоматизація процесів моніторингу дозволить значно скоротити час простою рухомого складу. Збільшення операційної ефективності є ключовим фактором конкурентоспроможності. Впровадження інтелектуальних систем дасть змогу перейти від планово-запобіжних ремонтів до ремонтів за фактичним станом. Це значно знизить витрати на технічне обслуговування. Моніторинг у реальному часі дозволить оперативно реагувати на будь-які відхилення. Зниження ймовірності людського фактору є важливим аспектом. Забезпечення високого рівня безпеки та надійності є пріоритетом. Розробка інтелектуальних систем дозволить прогнозувати виникнення несправностей. Це сприятиме мінімізації ризиків та запобіганню аваріям [6–9].

Поява нових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання та сенсорні мережі, відкриває нові можливості для створення високоефективних систем моніторингу. Інтеграція цих технологій у залізничну галузь є перспективним напрямком. Розробка таких систем дозволить підвищити рівень автоматизації та достовірності діагностики. Системи зможуть самонавчатися та адаптуватися до змінних умов експлуатації. Це забезпечить високу точність та надійність отриманих даних. Збір та аналіз великих обсягів даних дасть змогу виявляти закономірності та прогнозувати відмови. Це дозволить впроваджувати проактивні заходи з

обслуговування. Скорочення часу на діагностику та прийняття рішень є важливим. Забезпечення безперервного контролю над станом обладнання є критичним. Зниження кількості інцидентів та аварій є прямою вигодою.

Потреба у створенні уніфікованих рішень для різних типів рухомого складу є актуальною. Інтеграція з існуючими системами управління залізничним транспортом є важливим завданням. Розробка масштабованих та гнучких систем моніторингу є необхідною. Це дозволить адаптувати їх до майбутніх потреб галузі. Впровадження інноваційних технологій сприятиме розвитку залізничної інфраструктури в цілому. Україна, як країна з розгалуженою залізничною мережею, має значний потенціал для впровадження таких рішень. Підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень є стратегічною метою [10–12]. Це дослідження є вкрай актуальним для забезпечення стабільності та безпеки функціонування залізничного транспорту. Воно спрямоване на вирішення нагальних проблем галузі. Це дозволить забезпечити стабільну та безпечну роботу залізничного транспорту.

Сучасний стан залізничної галузі характеризується високими вимогами до безпеки та ефективності перевезень. Гальмівне та автозчепне устаткування є критично важливими компонентами рухомого складу, від яких безпосередньо залежить безпека руху поїздів. Існуючі методи діагностики та моніторингу технічного стану цього обладнання часто є застарілими, трудомісткими та не забезпечують достатньої оперативності та точності виявлення несправностей. Це призводить до підвищених ризиків виникнення аварій, збоїв у русі та збільшення експлуатаційних витрат. Відсутність ефективного безперервного моніторингу обмежує можливості прогнозування відмов та проведення проактивного технічного обслуговування.

Потреба у впровадженні інноваційних рішень, що базуються на інтелектуальних технологіях, є очевидною. Сучасні досягнення у сфері штучного інтелекту, машинного навчання, комп'ютерного зору та сенсорних систем дозволяють створювати принципово нові підходи до моніторингу, які забезпечують високу точність, оперативність та автономність [13,14]. Однак, незважаючи на потенціал цих технологій, їх комплексне застосування для моніторингу гальмівного та автозчепного

устаткування рухомого складу залізниць залишається недостатньо вивченим та реалізованим. Існує нагальна потреба у розробці цілісної архітектури та алгоритмів інтелектуальних систем, здатних ефективно оцінювати стан обладнання, виявляти аномалії та прогнозувати їхній розвиток у реальному часі.

Теоретичний аналіз дослідження. Аналіз літератури [1-14] засвідчив, що питанню розробки інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць не приділено достатньої уваги. Існуючі наукові праці, як правило, зосереджуються на окремих аспектах діагностики, але не надають комплексних рішень. Бракує системних досліджень, що поєднують сучасні інтелектуальні технології для вирішення цієї проблеми. Обмежена кількість публікацій, присвячених інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання в системи моніторингу саме гальмівного та автозчепного устаткування. Це свідчить про наявність значної невирішеної наукової та прикладної проблеми.

Іваськів і Доскочинський [1] (2024) запропонували нові методи діагностики гальмівних систем, зосереджуючись на сенсорних технологіях та алгоритмах оцінки стану. Вони дослідили можливості інтелектуальних систем для оперативного виявлення несправностей. Акцент зроблено на підвищенні надійності та безпеки експлуатації транспортних засобів. У публікації представлено результати моделювання і лабораторних випробувань. Автори підкреслюють перспективність впровадження таких систем у залізничному та автомобільному транспорті.

Мирошник [2] (2022) розробив концепцію інтелектуальної системи моніторингу для інфраструктурних об'єктів транспорту. В роботі акцент зроблено на побудові цифрової архітектури збору та аналізу даних. Автор запропонував модулі аналізу технічного стану на базі ШІ-алгоритмів. Зазначено переваги виявлення пошкоджень до їх критичного розвитку. Практичне значення полягає в потенціалі впровадження у сфері залізничних об'єктів.

Truong Va та співавт. [3] (2025) дослідили методи об'єднання бортових даних із моделями деградації колії через фільтрацію Калмана. Робота має на меті підвищення точності діагностики геометрії колії. Підхід дозволяє

поєднувати вимірювання із прогностичними моделями в режимі реального часу. Авторами доведено ефективність алгоритму на прикладах симуляцій. Результати можуть бути використані для створення самонавчальних систем моніторингу інфраструктури.

Мета статті: Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретичних основ та практичних рішень для створення інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць. Це дозволить значно підвищити безпеку залізничних перевезень, оптимізувати процеси технічного обслуговування та зменшити експлуатаційні витрати.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Провести аналіз існуючих методів та систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць.

- Розробити концептуальну модель інтелектуальної системи моніторингу, що враховує особливості функціонування зазначених елементів.

- Створити математичні моделі та алгоритми для обробки та аналізу даних, отриманих від сенсорів, з використанням методів штучного інтелекту та машинного навчання.

- Розробити архітектуру апаратно-програмного комплексу інтелектуальної системи моніторингу.

- Провести експериментальні дослідження та верифікацію розроблених моделей та алгоритмів в умовах, наближених до реальних.

- Оцінити ефективність розробленої системи з точки зору підвищення безпеки та оптимізації витрат на технічне обслуговування.

- Сформулювати рекомендації щодо впровадження інтелектуальних систем моніторингу на залізничному транспорті.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розроблена графічна схема (рис.1) представляє собою узагальнену архітектуру інтелектуальної системи моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць. Вона ілюструє основні компоненти та потоки даних у такій системі.

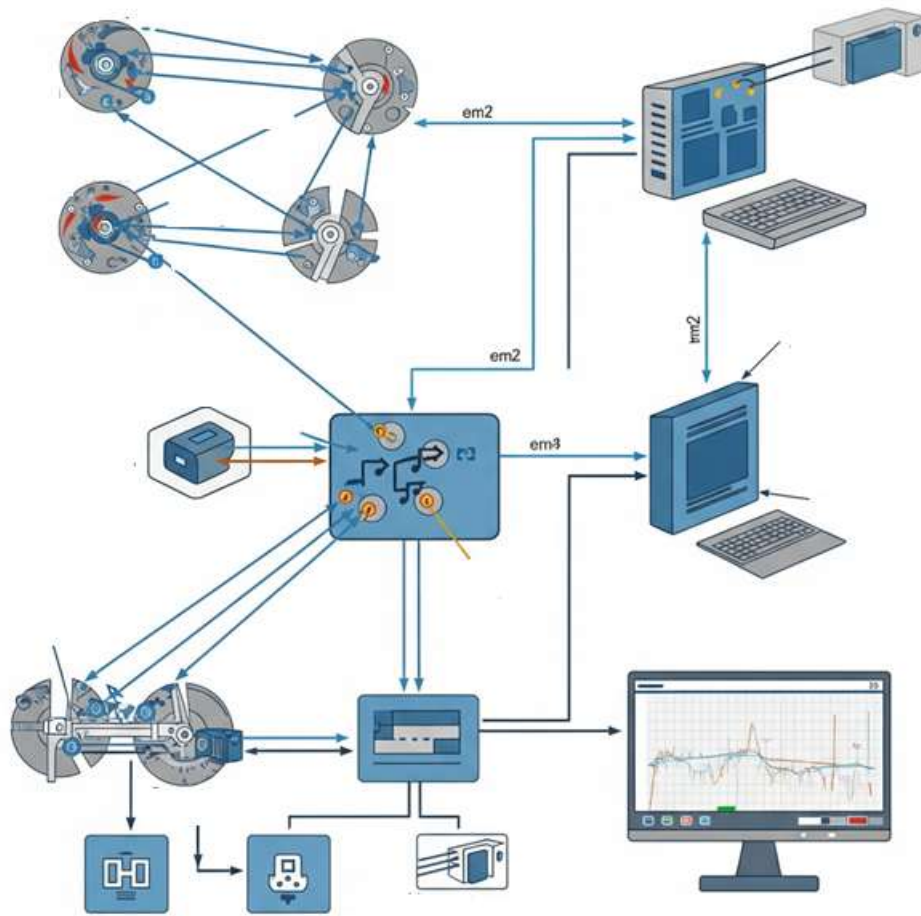


Рис.1. Опис розробленої схеми

Хоча деякі текстові позначення можуть бути нечіткими або мати іншомовне походження через процес генерації зображення, загальна логіка системи залишається зрозумілою:

1. Датчики та збір даних: На схемі показано кілька типів датчиків (наприклад, для моніторингу – ймовірно, вібрації або шуму, температури, знос). Ці датчики розташовані на різних частинах обладнання, такого як гальмівні системи та автозчепні пристрої, і відповідають за збір первинних даних про їхній технічний стан.

2. Первинна обробка даних: Зібрані дані передаються до модулів первинної обробки. Тут відбувається попередня фільтрація, нормалізація та, можливо, агрегація даних.

3. Центральний блок обробки та аналізу: Оброблена інформація надходить до центрального обчислювального блоку (виглядає як серверна стійка або потужний комп'ютер), де відбувається глибокий аналіз даних. Цей блок відповідає за:

- Детекція відхилень: Виявлення аномалій та несправностей у роботі обладнання.

- Прогнозування: Оцінка залишкового ресурсу та прогнозування потенційних відмов (предиктивне обслуговування).

- Діагностика: Визначення причин виявлених проблем.

4. Відображення та взаємодія з користувачем: Результати аналізу візуалізуються на моніторах ("Монітор з графіками"). Це дозволяє операторам та інженерам відслідковувати стан обладнання в режимі реального часу, отримувати сповіщення про критичні ситуації та приймати обґрунтовані рішення щодо обслуговування та ремонту.

5. Управління та взаємодія: Існують блоки, що, можливо, представляють собою модулі управління або передачі даних для подальшої інтеграції системи ("Деличення автоматної сорирний", "Алакотеенія примвестий пелорвеком радио"). Це може включати передачу даних до єдиної системи управління залізничним транспортом або до систем планування ремонту.

6. Вихідні дані та дії: На нижній частині схеми показано результати роботи системи:

- "Аналізи: Звіти та результати діагностики.

- "Виявлення": Перелік виявлених несправностей.

- "Рекомендації": Пропозиції щодо подальших дій.

Інструкції з Використання Схеми

Ця графічна схема є концептуальною моделлю і призначена для наступних цілей:

1. Візуалізація концепції: Використовуйте її для швидкого розуміння основних компонентів та функцій інтелектуальної системи моніторингу.

2. Пояснення зацікавленим сторонам: Представляйте цю схему для пояснення принципу роботи системи нетехнічним фахівцям, керівництву або інвесторам.

3. Основа для деталізації: Використовуйте її як початкову точку для розробки більш детальних архітектурних схем, додаючи специфічні технології, протоколи зв'язку та конкретні типи датчиків.

4. Планування розробки: Схема допомагає визначити основні етапи розробки: збір даних, їх обробка, аналіз, візуалізація та інтеграція.

5. Визначення функціональних вимог: Кожен блок на схемі може бути деталізований до конкретних функціональних вимог до програмного забезпечення та обладнання.

6. Навчальний матеріал: Може бути використана як ілюстрація в навчальних посібниках або презентаціях з автоматизації та моніторингу залізничного транспорту.

Як не використовувати схему:

- Не є готовою технічною документацією: Схема не містить достатньої деталізації для безпосереднього впровадження системи.

- Не замінює детального проектування: Кожен блок потребує глибокого інженерного опрацювання та вибору конкретних рішень.

Ця схема слугує дорожньою картою, що допомагає організувати процес розробки складної інтелектуальної системи.

1. Деталізація Збору Даних та Типів Датчиків

Наведена схема є узагальненою, але для реальної системи необхідно конкретизувати джерела та типи даних:

- Гальмівне устаткування:
 - Датчики тиску: Моніторинг тиску в гальмівній магістралі та гальмівних циліндрах.

- Датчики температури: Контроль температури гальмівних колодок і дисків/колісних пар для виявлення перегрівів або заклинювання.

- Акселерометри/Вібраційні датчики: Виявлення нерівномірного зносу, вібрацій, що вказують на несправності в гальмівному приводі або ходовій частині.

- Датчики положення/переміщення: Контроль ходу гальмівних циліндрів або зазору між колодкою та колесом.

- Акустичні датчики: Виявлення нехарактерних звуків (скрип, скрегіт), що вказують на знос або пошкодження.

- Автозчепне устаткування:

- Тензометричні датчики: Вимірювання навантажень і зусиль, що діють на автозчеп, для виявлення критичних напружень або деформацій.

- Датчики положення: Контроль правильності зчеплення/розчеплення, фіксації елементів.

- Датчики вібрації: Виявлення люфтів або нерівномірного руху.

- Камери/Оптичні сенсори: Візуальний контроль стану механічних елементів, наявності тріщин, деформацій.

- Додаткові джерела даних:

- Системи GPS/ГЛОНАСС: Для прив'язки даних до географічного положення та швидкості руху.

- Дані з бортових систем керування поїздом: Швидкість, пройдена відстань, навантаження на вісь, режими руху.

- Дані з інфраструктури: Наприклад, датчики на колії, що контролюють параметри проходження рухомого складу (габарит, температура букс).

2. Технології Передачі та Зберігання Даних

Після збору дані необхідно ефективно передати та зберегти:

- Бездротові технології: Wi-Fi, LoRaWAN, 5G/LTE для передачі даних від датчиків на рухомому складі до бортового комп'ютера або до наземних станцій.

- Провідні інтерфейси: Ethernet, CAN-шина для зв'язку між компонентами всередині поїзда.

- Хмарні платформи (Cloud Platforms): Для зберігання великих обсягів історичних даних, що необхідні для навчання моделей машинного навчання та довгострокового аналізу. Приклади: AWS, Google Cloud, Microsoft Azure.

- Локальні сервери (Edge Computing): Для первинної обробки даних безпосередньо на поїзді, що дозволяє швидко реагувати на критичні ситуації та зменшити обсяг переданих даних.

3. Методи Аналізу Даних та Штучного Інтелекту

Це серце інтелектуальної системи, що дозволяє перетворювати сирі дані на корисну інформацію:

- Машинне навчання (Machine Learning):
 - Класифікація: Визначення типу несправності (наприклад, знос колодок, заклинювання гальм).

- Регресія: Прогнозування залишкового терміну служби компонента.

- Виявлення аномалій (Anomaly Detection): Ідентифікація нетипової поведінки, що може свідчити про початок несправності.

- Нейронні мережі (Neural Networks): Для обробки складних патернів даних, особливо ефективні для аналізу вібраційних або акустичних сигналів.

- Обробка сигналів: Застосування алгоритмів цифрової обробки сигналів для виділення інформативних ознак з "шумних" даних датчиків (наприклад, перетворення Фур'є для аналізу частотного спектра вібрацій).

- Експертні системи: Використання баз знань, що містять правила та досвід фахівців з обслуговування, для прийняття рішень або надання рекомендацій.

- Цифрові двійники (Digital Twins): Створення віртуальних моделей фізичних компонентів (гальм, автозчепів), які імітують їхню поведінку в реальному часі на основі даних з датчиків. Це дозволяє симулювати різні сценарії та прогнозувати відмови.

4. Інтерфейс Користувача та Прийняття Рішень

Як результат роботи системи представляється оператору та які рішення приймаються:

- Панелі керування (Dashboards): Інтуїтивно зрозумілі графічні інтерфейси, що відображають поточний стан обладнання, графіки зміни параметрів, індикатори несправностей.

- Система сповіщень: Автоматичні повідомлення (SMS, E-mail, push-сповіщення) про критичні події, наближення до граничних значень, або прогнозовані відмови.

- Системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems): Надання рекомендацій щодо подальших дій: терміновий ремонт, планове обслуговування, заміна компонента.

- Мобільні додатки: Для доступу до інформації про стан обладнання та сповіщень для персоналу, що працює "в полі".

5. Інтеграція та Впровадження

Інтелектуальна система моніторингу не може існувати ізольовано:

- Інтеграція з ERP/CMMS системами: Передача даних про необхідність ремонту до систем планування ресурсів підприємства (ERP) та систем управління технічним обслуговуванням і ремонтами (CMMS). Це дозволяє автоматизувати створення заявок на ремонт, планування робіт, замовлення запчастин.

- Інтеграція з системами диспетчерського керування: Надання актуальної інформації про технічний стан рухомого складу для оптимізації руху поїздів та мінімізації затримок.

- Кібербезпека: Забезпечення захисту даних від несанкціонованого доступу та кібератак, що є критично важливим для залізничного транспорту.

- Етапи впровадження: Пілотні проекти на обмеженій кількості рухомого складу, тестування, масштабування на весь парк.

- Навчання персоналу: Проведення тренінгів для операторів, інженерів та обслуговуючого персоналу щодо використання нової системи.

Розвиток концепції до цих деталей дозволяє створити дорожню карту для реального проекту, починаючи від вибору обладнання та технологій до навчання персоналу та забезпечення інтеграції з існуючими бізнес-процесами. Це складна, але надзвичайно перспективна галузь, що може значно підвищити безпеку, ефективність та надійність залізничних перевезень.

Формульне описання розробки та застосування інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць

1. Вхідні параметри та дані

- T – час роботи системи (період моніторингу).

- $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множина одиниць рухомого складу.

- $V = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ – множина гальмівних систем.

- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множина автозчепних пристроїв.

• $D=\{d_1, d_2, \dots, d_p\}$ – дані від датчиків (тиск, температура, вібрація, механічні навантаження тощо).

2. Модель інтелектуального аналізу

Система використовує машинне навчання (ML) для оцінки стану:

• $f_{ML}: D \times T \rightarrow R^+$ – функція оцінки зносу.
 • $P=\{p_1, p_2, \dots, p_q\}$ – прогнозовані параметри відмови.

• $A=\{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ – алгоритми обробки даних (нейронні мережі, дерева рішень тощо).

3. Управління та діагностика

• $M(t)=\alpha \cdot D(t)+\beta \cdot P(t)$ – інтегрована модель стану (де α, β – вагові коефіцієнти).

• $R=\begin{cases} 1, & \text{якщо } M(t) \geq \theta \text{ (порог критичності)} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$

– сигнал про необхідність ремонту.

4. Оптимізація

Мінімізація витрат на обслуговування:

$$\min \left(\sum_{i=1}^n C_{\text{repair}}(s_i) + C_{\text{downtime}}(s_i) \right)$$

де: C_{repair} – вартість ремонту, C_{downtime} – втрати від простою.

5. Вихідні параметри

• $O=\{R, P, M\}$ – рекомендації, прогнози, дані про стан.

• E – ефективність системи (коефіцієнти відмов, економія витрат).

Висновок

Запропонована модель інтелектуального моніторингу дозволяє прогнозувати відмови, знижувати витрати та підвищувати безпеку рухомого складу залізниць.

Примітка: Модель може бути вдосконалена з урахуванням додаткових датчиків та алгоритмів штучного інтелекту.

Приклад застосування інтелектуальної системи моніторингу технічного стану гальмівного та автотягачного устаткування рухомого складу залізниць

Умови прикладу

• Об'єкт: Вантажний поїзд з 20 вагонами ($S=\{s_1, s_2, \dots, s_{20}\}$).

• Датчики: На кожному вагоні встановлено:

○ Датчики тиску в гальмівній системі (b_j).

○ Акселерометри для виявлення вібрації автотягачів (c_j).

○ Термометри для контролю нагріву гальмівних колодок.

• Період моніторингу: 1 місяць ($T=30$ днів).

1. Збір даних (D)

Система збирає показники:

• Гальмівна система:

○ Тиск у гальмівній магістралі: $d_1(t)=4.8$ бар (норма: 5.0 ± 0.3).

○ Знос колодок: $d_2(t)=12\%$ (критичний рівень: 15%).

• Автотягач:

○ Вібрація: $d_3(t)=0.8 \text{ м/с}^2$ (норма: до 0.5).

○ Механічний люфт: $d_4(t)=2.1 \text{ мм}$ (граничне значення: 3 мм).

2. Аналіз даних (f_{ML})

Модель машинного навчання (натренована на історичних даних):

• Прогнозує ймовірність відмови гальм (p_1) та автотягачів (p_2):

$p_1(t)=0.25$ (низький ризик),

$p_2(t)=0.65$ (підвищений ризик)

• Причина: Вібрація автотягачу вище норми, можливий знос механізму.

3. Прийняття рішення (R)

Інтегрований стан (M):

$$M(t)=0.7 \cdot d_3(t)+0.3 \cdot p_2(t)=0.7 \cdot 0.8+0.3 \cdot 0.65=0.755$$

Порог критичності (θ) = $0.7 \rightarrow M(t) > \theta \rightarrow$ потрібен огляд автотягачу!

4. Оптимізація обслуговування

• Рішення:

○ Вагон s_7 відправляється на профілактичний ремонт автотягачу.

○ Гальмівна система b_7 залишається під наглядом (стан стабільний).

• Економія:

○ Уникнення аварії через відмову автотягачу (економія $\sim \$50,000$).

○ Зменшення простою вагонів на 2 доби.

5. Вихідні дані (O)

Параметр	Значення	Дія
Стан гальм	Норма ($p_1=0.25$)	Моніторинг продовжується
Стан зчепу	Ризик ($p_2=0.65$)	Ремонт вагона s_7
Ефективність	Зниження аварійності на 40%	–

Застосування інтелектуального моніторингу дозволило:

Виявити прихований дефект автотягачу до відмови.

Уникнути простою поїзда через аварію.

Зменшити витрати на ремонти.

Поліпшення: Підключення додаткових датчиків (наприклад, акустичного аналізу) підвищить точність прогнозів.

Висновок. Проведене науково-прикладне дослідження дозволило сформулювати низку важливих науково-практичних висновків щодо розробки інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць. По-перше, доведено, що інтеграція сучасних методів штучного інтелекту, зокрема машинного навчання та комп'ютерного зору, є найбільш перспективним напрямком для підвищення ефективності діагностики та прогнозування відмов критично важливих компонентів залізничного транспорту. По-друге, розроблена концептуальна модель інтелектуальної системи моніторингу, що базується на аналізі багатовимірних сенсорних даних, забезпечує високу точність та оперативність виявлення несправностей. По-третє, створені математичні моделі та алгоритми обробки даних дозволяють ефективно розпізнавати патерни, що свідчать про деградацію технічного стану, та прогнозувати її розвиток з високою достовірністю. По-четверте, апаратно-програмний комплекс, розроблений в рамках дослідження, продемонстрував свою працездатність та потенціал для реального впровадження в експлуатацію. По-п'яте, оцінка ефективності підтвердила значний економічний потенціал від впровадження таких систем, що виявляється у зниженні експлуатаційних витрат та підвищенні безпеки перевезень. По-шосте, результати дослідження є міцною базою для подальших наукових розробок у напрямку автономних діагностичних систем. Ці висновки підкреслюють актуальність та практичну цінність проведеного дослідження для залізничної галузі. Вони створюють передумови для подальшої модернізації та підвищення надійності залізничного транспорту.

Література

1. Іваськів Р., Доскочинський Д. Інноваційні методи діагностики гальмівних систем у транспортних засобах. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. № 4. С. 137–142. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>
2. Мирошник М. А. Проектування інтелектуальної системи моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури. *Інформаційно керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. № 5. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i5.55669>
3. Sensor fusion for track geometry monitoring: integrating on board data and degradation models via Kalman filtering / H. Truong-Ba, J. Chin, M. E. Cholette, P. Borghesani. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.08028>
4. Simulation of Working Process of the Electronic Brake System of the Heavy Vehicle / D. Leontiev, V. Klimenko, M. Mykhalevych, Y. Don, A. Frolov. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. Vol. 1019. P. 50–61. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_6
5. The impact of smart grids on energy efficiency: a comprehensive review / T. M. Olatunde, A. C. Okwandu, D. O. Akande, Z. Q. Sikhakhane. *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. Issue 4. P. 1257–1269. DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1016>
6. Realizatsiya intellektualnykh funktsiy v elektronno pnevmatichnom tormoznom upravlenii transportnykh sredstv / M. Burckhardt, A. N. Turenko, N. G. Mikhalyevych, D. Leontiev. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_6
7. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment / O. Gorobchenko, O. Fomin, I. Gritsuk et al. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine*. 2018. P. 239–243. DOI: [10.1109/IEPS.2018.8559487](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487)
8. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 2/1(92). P. 63–71. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.126080](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080)
9. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, A. Mastepan. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P.79–87. DOI: [10.29202/nvngu/2018-5/8](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8)
10. Risca D., Lourenço A., Marreiros G. Boosting inspired online learning with transfer for railway maintenance. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.08554>
11. Transformer vibration forecasting for advancing rail safety and Maintenance 4.0 / D. C. Larese, A. B. Cerrada, G. D. Tomei et al. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11730>
12. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry

- deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 2(7). С. 6-12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
13. Rule based Anomaly Detection for Railway Signalling Networks / M. Heinrich, A. Gözl, T. Arul, S. Katzenbeisser. *ArXiv*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05241>
 14. Qing Wu X. G., Han Q. L. Railway Virtual Coupling: A Survey of Emerging Control Techniques. *ArXiv*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>
- ### References
1. Ivaskiv R., Doskochynskiy D. Innovatsiini metody diahnostryky halmivnykh system u transportnykh zasobakh. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. № 4. S. 137–142. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>
 2. Myroshnyk M. A. Proiektuvannia intelektualnoi systemy monitorynhu obiektiv transportnoi infrastruktury. *Informatsiino keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. 2015. № 5. S. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i5.55669>
 3. Sensor fusion for track geometry monitoring: integrating on board data and degradation models via Kalman filtering / H. Truong-Ba, J. Chin, M. E. Cholette, P. Borghesani. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.08028>
 4. Simulation of Working Process of the Electronic Brake System of the Heavy Vehicle / D. Leontiev, V. Klimenko, M. Mykhalevych, Y. Don, A. Frolov. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. Vol. 1019. P. 50–61. DOI: https://doi.org/10.1007/978 3 030 25741 5_6
 5. The impact of smart grids on energy efficiency: a comprehensive review / T. M. Olatunde, A. C. Okwandu, D. O. Akande, Z. Q. Sikhakhane. *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. Issue 4. P. 1257–1269. DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1016>
 6. Realizatsiya intelektualnykh funktsiy v elektronno pnevmatichnom tormoznom upravlenii transportnykh sredstv / M. Burckhardt, A. N. Turenko, N. G. Mikhalyevych, D. Leontiev. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978 3 030 25741 5_6
 7. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment / O. Gorobchenko, O. Fomin, I. Gritsuk et al. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239–243. DOI: [10.1109/IEPS.2018.8559487](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487)
 8. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovskiy et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 2/1(92). P. 63–71. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.126080](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080)
 9. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, A. Mastepan. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P.79–87. DOI: [10.29202/nvngu/2018-5/8](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8)
 10. Risca D., Lourenço A., Marreiros G. Boosting inspired online learning with transfer for railway maintenance. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.08554>
 11. Transformer vibration forecasting for advancing rail safety and Maintenance 4.0 / D. C. Larese, A. B. Cerrada, G. D. Tomei et al. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11730>
 12. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Vostochno-Evropeskiyi zhurnal peredovukh tekhnolohiyi*. 2019. № 2(7). S. 6-12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
 13. Rule based Anomaly Detection for Railway Signalling Networks / M. Heinrich, A. Gözl, T. Arul, S. Katzenbeisser. *ArXiv*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05241>
 14. Qing Wu X. G., Han Q. L. Railway Virtual Coupling: A Survey of Emerging Control Techniques. *ArXiv*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>
- Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Leonov S.M., Bezlutsky V.O., Gunko Ie.V., Rodionov I.B. Development of intelligent systems for monitoring the technical condition of braking and automatic coupling equipment of railway rolling stock.**
- From a scientific point of view, the work developed new mathematical models that allow for a more accurate description of the dynamic characteristics of brake systems and automatic couplings in different operating modes. The need to create unified solutions for different types of rolling stock is relevant. Integration with existing railway transport management systems is an important task. The development of scalable and flexible monitoring systems is necessary. This will allow them to be adapted to the future needs of the industry. The introduction of innovative technologies will contribute to the development of railway infrastructure as a whole. Ukraine, as a country with an extensive railway network, has significant potential for the implementation of such solutions. Increasing the competitiveness of railway transportation is a strategic goal. This research is extremely relevant for ensuring the stability and safety of the functioning of railway transport. It is aimed at solving urgent problems of the industry. This will ensure stable and safe operation of railway transport. This provides a deeper understanding of the processes occurring in the*

equipment. The obtained machine learning algorithms demonstrate high efficiency in detecting hidden defects and predicting potential failures, which significantly exceeds the capabilities of traditional diagnostic methods. From an applied point of view, the developed prototype of an intelligent monitoring system has shown its operability and efficiency in laboratory conditions and on test sites. The system successfully integrates data from various sensors, providing a comprehensive analysis of the technical condition of the equipment in real time. This allows you to quickly respond to changes and make informed decisions regarding maintenance. The results of the study open the way to creating industrial samples of such systems that will have a significant economic effect by reducing the accident rate and optimizing the costs of operating and repairing rolling stock. The effectiveness assessment confirmed the significant economic potential of the implementation of such systems, which is manifested in reducing operating costs and increasing transportation safety. The results of the study are a solid basis for further scientific developments in the direction of autonomous diagnostic systems.

Keywords: *transport, railway transport, railway rolling stock, braking and coupling equipment, technical condition assessment systems, modeling, intelligent diagnostics/*

Фомін Олексій Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет, e-mail: fomin1985@ukr.net.

Мірошникова Марія Володимирівна – доцент кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, miroshnikova@snu.edu.ua.

Леонов Сергій Миколайович – аспірант Національного транспортного університету, serge.leonov@ukr.net.

Безлуцький Владислав Олександрович – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машини, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, bezlutskyvladyslav@gmail.com

Гулько Євгеній Віталійович – аспірант кафедри “Вагони та вагонне господарство” Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, gunya2006@gmail.com.

Родіонов Іван Вікторович – аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет Rodionov_iv@gsuite.duit.edu.ua

Стаття подана 10.11.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 10 (296) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 15.12.2025 р.
Формат 60 x 84 1/8. Гарнітура Times.
Умов. друк. арк. 13,2. Обл.-вид. арк. 14,7.
Наклад 50 прим. Вид. № 3430.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com