



ISSN 1681-4886 (Print)
ISSN 2413-3833 (Online)

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ**

№3 2025 р.

3 (162)' 2025

ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ
ТРАНСПОРТІ

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

INFORMACIJNO-KERUJUCHI
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU
TRANSPORTI

Зміст – Contents

Видання

Українського державного
університету залізничного
транспорту



ЗМІЙ С.О., ПРИЛИПКО А.А., СОСУНОВ О.О.,
ЩЕБЛИКІНА О.В.

Діагностика асинхронного двигуна з
використанням зняття зубцевих характеристик та
обробки даних з використанням штучного
інтелекту

.....3

ПУЗИР В.Г., ОБОЗНИЙ О.М., ЗАЛАТА А.С.

Інтелектуальна система керування дизель-
генераторною установкою автономного рухомого
складу на основі нейронно-нечітких моделей та
еволюційної оптимізації

.....14

ЛОМОТЬКО Д. В., АБОЛОНІН А. І., КОФАНОВ
О.В., КАЛИНИЧ М. В., ПРОКОФ'ЄВ А. І.

Про моделювання взаємодії залізничного та
автомобільного транспорту у мультимодальних
логістичних ланцюгах

.....19

ВОРОНІН С.В., МАЗЕПА В.О., АФАНАСОВ Г.М.,
ОРЛЮК Ю.К., ТРИФОНОВ Т.В.

Критеріальний підхід для оцінки зміни
властивостей моторних оли в процесі експлуатації
та визначення строків їх заміни

.....25

ПОДРИГАЛО М.А., АБРАМОВ Д.В., КОРОБКО А.І. Цифрова трансформація міжнародних автомобільних вантажних перевезень, сучасні виклики, бар'єри та перспективи розвитку	32
BARKOVSKA O.Y., NECHTAYLO O.V., SERDECHNYI V.S., BATURIN O.O. Software Application for Assisting Visually Impaired Persons at Public Transport Stops	38
БІРЮКОВ С. В., ІЛЄНКО К. В., ГОРБАЧ С. Д., ГОВОРУН В. В., КЛИМЕНКО В. М. Аналіз конструкцій тягових муфт, що експлуатовані на електропоїздах вітчизняних залізниць і метрополітенів	49
ПРИМАЧЕНКО Г. О., ПАЩЕНКО Г. С. Дослідження пропозицій і логістичних рішень у сфері міжнародних і внутрішніх контейнерних перевезень в Україні	57

621.313.333.004.5:004.85

DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i3.351250>

ЗМІЙ С.О., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту.

ПРИЛИПКО А.А., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту.

СОСУНОВ О.О., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту.

ЩЕБЛИКІНА О.В., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, PhD, Український державний університет залізничного транспорту.



Діагностика асинхронного двигуна з використанням зняття зубцевих характеристик та обробки даних з використанням штучного інтелекту

Анотація. У статті розглядається інноваційний підхід до діагностики асинхронних двигунів, які є ключовими компонентами в промисловості та на залізничному транспорті, зокрема в системах автоматики та телекерування рухом поїздів. Запропонований метод базується на глибокому аналізі зубцевих гармонік у спектрі струму статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA), що дозволяє проводити моніторинг стану двигуна в реальному часі без необхідності його зупинки.

В роботі детально описано методологію, що починається зі збору даних струму статора за допомогою високочастотної дискретизації, продовжується виділенням та нормуванням зубцевих гармонік, частоти яких залежать від параметрів двигуна (кількості пазів статора та ротора, числа пар полюсів та частоти мережі). Особлива увага приділяється ідентифікації характерних частот, пов'язаних з різними видами несправностей, таких як ексцентриситет повітряного зазору (статичний та динамічний), а також пошкодження обмоток або механічні дефекти.

Центральним елементом запропонованої системи є інтеграція штучного інтелекту, а саме багатоваріованої нейронної мережі прямого поширення (MLP), для автоматизованої обробки та класифікації отриманих спектральних даних. Вхідний шар мережі приймає вектор ознак, що включає нормовані амплітуди зубцевих та бічних гармонік. Для навчання мережі використовується метод зворотного поширення помилки з функцією втрат крос-ентропії та функцією активації ReLU у прихованих шарах, а вихідний шар використовує Softmax для класифікації чотирьох основних станів: нормальна робота, статичний ексцентриситет, динамічний ексцентриситет, та пошкодження обмоток.

Наведені результати моделювання, проведені на асинхронному двигуні потужністю 5,5 кВт, підтверджують ефективність підходу. Експерименти включали симуляцію нормального стану, статичного та динамічного ексцентриситету, демонструючи значне зростання амплітуд характерних гармонік при наявності дефектів. Нейромережа, навчена на 1000 спектрах, досягла точності класифікації 94% на тестовій вибірці.

Запропонований метод дозволяє не лише значно підвищити точність діагностики, але й забезпечити її оперативність, що є критично важливим для запобіжного обслуговування, зменшення експлуатаційних витрат та збільшення терміну служби обладнання в умовах безперервної роботи транспортних систем.

© ЗМІЙ С. О., ПРИЛИПКО А.А., СОСУНОВ О.О., ЩЕБЛИКІНА О. В., 2025

Хоча метод чутливий до точного визначення параметрів двигуна та шумів, його подальший розвиток передбачає інтеграцію додаткових діагностичних ознак, таких як вібрація та температура, для подальшого підвищення надійності системи.

Ключові слова: Асинхронний двигун, діагностика, зубцеві гармоніки, спектральний аналіз, Motor Current Signature Analysis (MCSA), штучний інтелект, нейронна мережа, ексцентриситет повітряного зазору, пошкодження обмоток, прогностичне обслуговування

Вступ

Асинхронні двигуни (АД) є фундаментальною складовою сучасної промисловості, а їхня роль на залізничному транспорті набуває особливого значення. Вони широко використовуються в різноманітних системах, включаючи приводи стрілочних переводів, вентиляцію тунелів, системи енергопостачання та допоміжні механізми рухомого складу. Зокрема, надійність роботи АД у приводах стрілочних переводів є критичною для забезпечення безперебійного та безпечного руху поїздів. Незважаючи на притаманну їм міцність та простоту конструкції, АД піддаються зношенню, зазнають механічних дефектів та можуть виходити з ладу внаслідок експлуатаційних впливів. Будь-яка несправність такого двигуна у системі керування стрілкою може призвести до затримок руху, порушення графіку перевезень та, найважливіше, до створення аварійних ситуацій, що безпосередньо загрожують безпеці пасажирів та вантажів.

Традиційні методи діагностики, такі як візуальний огляд або вимірювання опору обмоток, часто є інвазивними та вимагають зупинки обладнання. У контексті залізничного транспорту, де безперервність руху є пріоритетом, планове виведення з експлуатації стрілочного переводу для діагностики є вкрай небажаним і призводить до суттєвих операційних втрат. Це створює нагальну потребу у розробці та впровадженні неінвазивних методів моніторингу, які дозволяють проводити діагностику стану АД у реальному часі, без переривання їхньої роботи.

Аналіз зубцевих гармонік у спектрі струму статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA) є одним з найбільш перспективних напрямків для вирішення цієї проблеми. Цей метод ґрунтується на принципі, що будь-які відхилення у фізичному стані двигуна – такі як ексцентриситет повітряного зазору, пошкодження обмоток або інші механічні

несправності – викликають появу або зміну характерних гармонік у спектрі споживаного струму. Виявлення цих "сигнатур" на ранніх стадіях дозволяє своєчасно вжити запобіжних заходів, запобігаючи серйозним поломкам та їхнім негативним наслідкам.

Сучасні досягнення у сфері штучного інтелекту (ШІ), зокрема розвиток нейронних мереж, відкривають нові можливості для автоматизації та значного підвищення точності аналізу діагностичних даних. Інтеграція алгоритмів машинного навчання дозволяє створити інтелектуальні системи, здатні самостійно розпізнавати складні патерни в спектральних даних, що робить процес діагностики більш об'єктивним та швидким. Застосування ШІ мінімізує вплив людського фактора та дозволяє оперативно виявляти несправності, що є ключовим для забезпечення високого рівня безпеки та ефективності перевізного процесу.

Метою цієї роботи є розробка та обґрунтування методу діагностики асинхронних двигунів для залізничного транспорту, який базується на комплексному використанні аналізу зубцевих характеристик струму статора та нейромережевої обробки даних із застосуванням штучного інтелекту.

Діагностика асинхронного двигуна з використанням зняття зубцевих характеристик та обробки даних нейромережею з використанням штучного інтелекту

Аналіз сигнатури струму двигуна (MCSA) є потужною, неінвазивною технікою моніторингу стану, яка аналізує спектр струму статора для ідентифікації специфічних гармонічних компонентів, пов'язаних з несправностями. Цей підхід дозволяє проводити діагностику в реальному часі без переривання роботи двигуна. MCSA є особливо ефективним для діагностики несправностей, що викликають коливання крутного моменту або швидкості, що робить його ідеальним для аналізу різноманітних несправностей двигунів. [1]

Сучасні досягнення в галузі штучного інтелекту, зокрема в нейронних мережах, відкривають нові можливості для автоматизації та значного підвищення точності діагностичних процесів на основі MCSA. Глибокі моделі навчання, такі як багатосаровий перцептрон (MLP), використаний у цій методології, можуть ефективно класифікувати складні стани двигуна, мінімізуючи втручання людини та підвищуючи точність діагностики. [2]

Поєднання MCSA та ШІ створює потужний синергетичний ефект для прогностичного обслуговування. MCSA надає багаті, але часто

складні та тонкі дані про сигнатури несправностей. III, особливо глибоке навчання, чудово розпізнає закономірності у багатовимірних, зашумлених даних. Таким чином, ця комбінація виходить за рамки традиційної інтерпретації MCSA людськими експертами, дозволяючи створити більш надійну, автономну та потенційно більш чутливу систему виявлення несправностей. Це означає перехід від реактивного або планового обслуговування до справжнього прогностичного обслуговування, де тонкі зміни можуть бути виявлені на ранніх стадіях, запобігаючи катастрофічним збоям та оптимізуючи графіки технічного обслуговування. [3]

Зубцеві гармоніки виникають унаслідок природної взаємодії магнітних полів статора і ротора, які залежать від геометричних особливостей двигуна. Характеристики залежать від кількості пазів статора (N_s) та ротора (N_r). Частоти цих гармонік (f_{zh}) можуть бути розраховані за формулою

$$f_{zh} = f_1 \cdot \left(k \cdot \frac{N_r}{p} \pm 1 \right), \quad (1)$$

де f_1 – частота живильної мережі;

k – порядковий номер гармоніки ($k=0,1,2,\dots$);

p – число пар полюсів;

N_r – число пазів ротора.

При ексцентриситеті повітряного зазору (статичному або динамічному) амплітуда гармонік зростає. Для динамічного ексцентриситету з'являються додаткові бічні частоти (f_{de}), які розраховуються як

$$f_{de} = f_1 \pm m \cdot f_r \quad (2)$$

де $f_r = n/60$ – частота обертання ротора (в Гц);

n – швидкість обертання (об/хв);

m – ціле число.

Загальний сигнал струму статора $I(t)$ може бути представлений як сума його гармонійних складових

$$I(t) = I_1 \sin(2\pi f_1 t) + \sum_k I_{zh,k} \sin(2\pi f_{zh,k} t + \phi_k)$$

де I_1 – амплітуда основної гармоніки;

$I_{zh,k}$ – амплітуда зубцевої гармоніки порядку k ;

ϕ_k – фазовий зсув.

Умови несправності, такі як статичний або динамічний ексцентриситет повітряного зазору,

ідентифікуються за помітним зростанням амплітуди специфічних гармонік у спектрі струму статора. Наприклад, в експериментальному дослідженні ексцентриситет призвів до збільшення амплітуд гармонік на частотах $f_{zh}=350$ Гц та $f_{zh}=650$ Гц. Експериментальна установка включає асинхронний двигун потужністю 5,5 кВт з $p=2$ парами полюсів, $N_r=28$ пазами ротора та частотою живильної мережі $f_1=50$ Гц.

Цей підхід підкреслює важливість простору ознак, заснованого на фізичних принципах. Вирази (1) та (2) не є довільними частотами, а безпосередньо виводяться з фізичних параметрів двигуна. Це означає, що процес вилучення ознак полягає не просто у застосуванні загального швидкого перетворення Фур'є (FFT), а у виявленні *специфічних, фізично значущих* частот. Такий підхід до інженерії ознак, заснований на фізиці, є вирішальним. Він зменшує розмірність задачі, робить ознаки більш інтерпретованими та, ймовірно, покращує здатність нейронної мережі до узагальнення, оскільки вона навчається на сигналах, безпосередньо пов'язаних з основними механізмами несправностей, а не на довільних спектральних компонентах. Це ключова відмінність від чисто керованих даними моделей "чорної скриньки".

Також важливо враховувати чутливість MCSA до параметрів двигуна та умов експлуатації. Точність діагностичної системи сильно залежить від точного знання конструктивних параметрів двигуна та його робочої швидкості. Якщо ці параметри невідомі або значно змінюються під час роботи (наприклад, для двигунів зі змінною швидкістю), фіксовані частотні діапазони для виявлення несправностей будуть неточними. Це вказує на необхідність або надійного модуля оцінки параметрів, або адаптивного відстеження частотних діапазонів для реального розгортання, що є значним викликом, який виходить за рамки цієї конкретної роботи, але є вирішальним для практичного застосування. [4]

Початковий крок у діагностичній методології передбачає вимірювання сигналу струму статора за допомогою відповідних датчиків струму. Важливо, що частота дискретизації (f_s) системи збору даних повинна відповідати критерію Найквіста, тобто бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну очікувану частоту зубцевих гармонік ($f_s > 2f_{zh,max}$). Якщо найвища очікувана частота несправності не

буде адекватно захоплена, виникне аліасинг, що призведе до неправильної діагностики. Це означає, що проектування системи збору даних (вибір датчиків, АЦП та частоти дискретизації) має бути ретельно узгоджене з теоретичними частотами несправностей. Глибший наслідок полягає в тому, що для двигунів з більшою кількістю полюсів або вищими швидкостями $f_{zh,max}$ буде вищою, що вимагає вищих частот дискретизації, що, своєю чергою, впливає на вимоги до зберігання та обробки даних. Це створює практичне обмеження на проектування системи.

Основні етапи діагностування.

Етап виділення зубцевих характеристик діагностичної моделі зосереджений на перетворенні "сирого" сигналу струму статора в набір кількісних ознак, які є чутливими до певних несправностей асинхронного двигуна. Суть процесу полягає у виявленні та кількісній оцінці специфічних частотних складових, які виникають у струмі двигуна при наявності дефектів.

Перетворення сигналу в частотну область полягає у використанні спектрального аналізу. Сигнал струму статора, який є часовою функцією $I(t)$, перетворюється з часової області в частотну. Це дозволяє розкласти складний сигнал на його складові гармоніки, виявивши основні та додаткові частоти, а також їхні амплітуди. Для цього застосовується швидке перетворення Фур'є (FFT). Результатом є спектр, який відображає амплітуду кожної частотної складової. [10]

Перед виконанням спектрального аналізу до сигналу застосовується віконна функція (наприклад, вікно Хеммінга). Це робиться для покращення "роздільної здатності" отриманого спектра та зменшення ефекту "витоку спектра" (spectral leakage). Витік спектра може призвести до розмиття піків та утруднення точного визначення амплітуд гармонік, особливо тих, що мають низьку амплітуду або знаходяться близько до інших, сильніших складових. Віконна функція "згладжує" краї тимчасового сегменту, який аналізується, зменшуючи штучні артефакти в спектрі. [11]

Ідентифікація та кількісна оцінка гармонік несправностей. При наявності дефектів, таких як ексцентриситет повітряного зазору, амплітуди цих гармонік зростають. Їхні частоти можна розрахувати за (1).

Окрім зубцевих гармонік, при деяких типах несправностей, зокрема при динамічному ексцентриситеті повітряного зазору, у спектрі струму з'являються додаткові бокові частоти (f_{de}). Ці частоти

пов'язані з частотою обертання ротора (f_r). Зростання амплітуд цих складових є прямим індикатором динамічного ексцентриситету.

Для отримання уніфікованих ознак, які менш чутливі до змін навантаження або напруги живлення, амплітуди виявлених зубцевих та бічних гармонік нормуються. Це зазвичай виконується шляхом ділення амплітуди гармоніки несправності на амплітуду основної гармоніки струму (I_1)

$$A_{zh,k} = \frac{|X(f_{zh,k})|}{I_1},$$

де $X(f_{zh,k})$ — амплітуда зубцевої гармоніки порядку k .

На завершення етапу формування вектора ознак всі виділені та нормовані амплітуди характерних гармонік, а також відповідні частоти бокових складових, об'єднуються в єдиний вектор ознак. Цей вектор є кількісним представленням стану двигуна і служить вхідними даними для наступного етапу – нейромережевої обробки. Таким чином, складний часовий сигнал трансформується в компактний числовий формат, який може бути ефективно оброблений алгоритмами штучного інтелекту.

Етап нейромережевої обробки є інтелектуальним ядром розробленої діагностичної моделі, що забезпечує автоматичну класифікацію стану асинхронних двигунів на основі виділених спектральних ознак. Він ґрунтується на принципах штучного інтелекту, зокрема на використанні нейронних мереж.

Для реалізації класифікації несправностей використовується багатошарова нейронна мережа прямого поширення (MLP). Цей тип мереж складається з послідовно розташованих шарів нейронів, де інформація рухається лише в одному напрямку – від вхідного шару до вихідного. [12]

На вхідний шар мережі подається вектор ознак (F). Цей вектор містить кількісні дані, отримані на попередньому етапі виділення зубцевих характеристик: нормовані амплітуди зубцевих гармонік ($A_{zh,k}$) та частоти додаткових бічних гармонік (f_{de}). Кількість елементів у цьому векторі відповідає кількості проаналізованих гармонік та бічних частот.

Між вхідним та вихідним шарами розташовані приховані шари.

Вихідний шар мережі призначений для класифікації стану двигуна.

Навчання мережі є ключовим етапом, під час якого вона вчиться розпізнавати патерни, що відповідають різним несправностям.

Розроблення моделі та дослідження результатів з використанням MATLAB

Запропонована нейронна мережа є програмною моделлю, реалізованою в середовищі MATLAB за допомогою функцій Deep Learning Toolbox. Вона складається з послідовності шарів, кожен з яких виконує певні математичні операції над вхідними даними, щоб навчитися розпізнавати патерни, пов'язані з різними станами двигуна. [13] Вибір архітектури MLP та функцій активації відображає баланс між простотою та складністю задачі. Ця архітектура, хоча і ефективна, свідчить про те, що вилучені ознаки (вектор F) є достатньо дискримінаційними, і складна архітектура глибокого навчання (як-от CNN або LSTM, згадані в [13] для інших застосувань) не є абсолютно необхідною. Це означає, що етапи MCSA та інженерії ознак виконують значну частину "важкої роботи" з перетворення сирих сигналів у лінійно розділюваний простір ознак. Якби ознаки були складнішими або мали притаманні просторові/часові залежності, знадобилася б інша, більш спеціалізована архітектура мережі. Це підкреслює, що "модель" – це не лише нейронна мережа, а весь конвеєр, де інженерія ознак відіграє вирішальну роль у спрощенні завдання класифікації для MLP.

У розробленій моделі використовується три прихованих шари, кожен з яких містить 64 нейрони. Нейрони в цих шарах застосовують функцію активації ReLU ($f(x)=\max(0, x)$). ReLU обрано за його обчислювальну ефективність та здатність зменшувати проблему зникаючих градієнтів. Ця функція допомагає мережі вивчати складні нелінійні залежності у вхідних даних, що є критично важливим для точного розпізнавання різноманітних станів двигуна.

Таблиця 1. Архітектура багатшарового перцептрона та параметри навчання

Параметр / Компонент	Опис	Значення / Конфігурація	Функція / Інструментарій MATLAB
Тип мережі	Багатшаровий перцептрон	-	Deep Learning Toolbox
Вхідний шар	Приймає вектор ознак F	$F=[A_{zh,l}, \dots, A_{zh,m}, f_{de,l}, \dots]$	-

Вихідний шар використовує функцію активації Softmax, яка є стандартною для задач багатокласової класифікації, перетворюючи сирі вихідні дані в ймовірності для кожного класу. Мережа класифікує стани двигуна на: нормальну роботу, статичний ексцентриситет, динамічний ексцентриситет та пошкодження обмоток.

Deep Learning Toolbox MATLAB надає комплексне середовище для проектування, впровадження та симуляції глибоких нейронних мереж. Він пропонує різні функції та інструменти для визначення шарів мережі, включаючи інтерактивне проектування за допомогою програми Deep Network Designer. Інструментарій також сприяє взаємодії, дозволяючи імпорт/експорт моделей з/до інших фреймворків, таких як PyTorch, TensorFlow та ONNX. [13]

Нейронна мережа навчається за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки (backpropagation), стандартного методу оновлення ваг мережі для мінімізації помилок прогнозування. Метою навчання є мінімізація функції втрат крос-ентропії, яка зазвичай використовується для завдань класифікації

$$L = - \sum_i y_i \log(\hat{y}_i),$$

де y_i — справжня мітка класу;

$\hat{y}_i$ — передбачена ймовірність.

У проведеному дослідженні нейромережа навчалася на 1000 спектрах струму, що охоплювали різні стани двигуна. Кожен приклад у навчальній вибірці складається з вектора ознак (вхід) та відповідної "правильної" мітки класу (бажаний вихід). Параметри нейромережі зведені до таблиці 1.

Приховані шари	Кількість та нейрони на шар	3 шари, по 64 нейрони кожен	-
Функція активації прихованих шарів	Нелінійна функція	ReLU ($f(x)=\max(0, x)$)	-
Вихідний шар	Функція активації для класифікації	Softmax	-
Класи вихідних даних	Класифікація станів двигуна	Нормальна робота, статичний ексцентриситет, динамічний ексцентриситет, пошкодження обмоток	-
Метод навчання	Алгоритм оптимізації ваг	Зворотне поширення помилки (Backpropagation)	Trainnet [14]
Функція втрат	Метрика для мінімізації помилок	Крос-ентропія	trainnet, trainingOptions [14]
Оптимізатор	Алгоритм оновлення ваг	Наприклад, Adam (типово в trainingOptions)	trainingOptions [14]
Розмір навчального набору даних	Кількість спектрів для навчання	1000 спектрів	-

Дослідження проводилося на асинхронному двигуні з параметрами: потужність 5,5 кВт, число пар полюсів $p=2$, число пазів ротора $N_r=28$, а частота живильної мережі $f_l=50$ Гц. Були змодельовані три основні стани:

- нормальна робота – еталонний стан без дефектів.
- статичний ексцентриситет імітувався зміщенням 0,3 мм.
- динамічний ексцентриситет імітувався вигином вала на 0,2 мм.

Збір даних струму статора виконувався з частотою дискретизації $f_s=10$ кГц, а тривалість запису становила 10 секунд для кожного стану.

Проведена MATLAB-симуляція генерує два основні типи візуалізацій: графіки струму статора в часовій області та його спектри в частотній області. Ці візуалізації дозволяють покроково аналізувати

діагностичний процес, від сирого сигналу до виявлення прихованих несправностей.

Графіки струму статора (рисунок 1) в часовій області (Current Waveforms in Time Domain) відображають миттєве значення струму статора у функції часу для кожного змодельованого стану асинхронного двигуна.

Візуально оцінити наявність та тип несправності дуже складно. Це зумовлено тим, що основна гармоніка струму, що відповідає частоті живильної мережі (50 Гц), має значно більшу амплітуду порівняно з гармоніками, що виникають через несправності. Зубцеві гармоніки та бічні смуги, які є індикаторами дефектів, зазвичай мають амплітуди, що становлять лише невеликий відсоток (зазвичай менше 1%) від амплітуди основної гармоніки. Ці малі спотворення майже непомітні на загальному синусоїдальному сигналі. Крім того,

людське око не здатне розрізняти такі незначні зміни форми сигналу, особливо у присутності незначних шумів або операційних флуктуацій.

Графік нормальної роботи показує практично ідеальний, чистий синусоїдальний сигнал, що відповідає стабільній та бездефектній роботі двигуна.

При статичному ексцентриситеті сигнал залишатиметься переважно синусоїдальним. Можуть бути присутні дуже легкі та ледь помітні модуляції амплітуди, які викликані нерівномірністю повітряного зазору, але вони зазвичай не помітні без ретельного аналізу.

Динамічний ексцентриситет може з'явитися дуже тонка амплітудна модуляція основного сигналу, що повторюється з частотою обертання ротора. Ця модуляція, хоч і існує, але, як правило, настільки мала, що її візуальна ідентифікація в часовій області є ненадійною.

Залежно від ступеня та типу пошкодження, можуть спостерігатися незначні спотворення синусоїдальної форми, такі як легка асиметрія або поява "шуму" на вершинах/западах. Однак, знову ж таки, для більшості реальних випадків ці спотворення є візуально незначними.

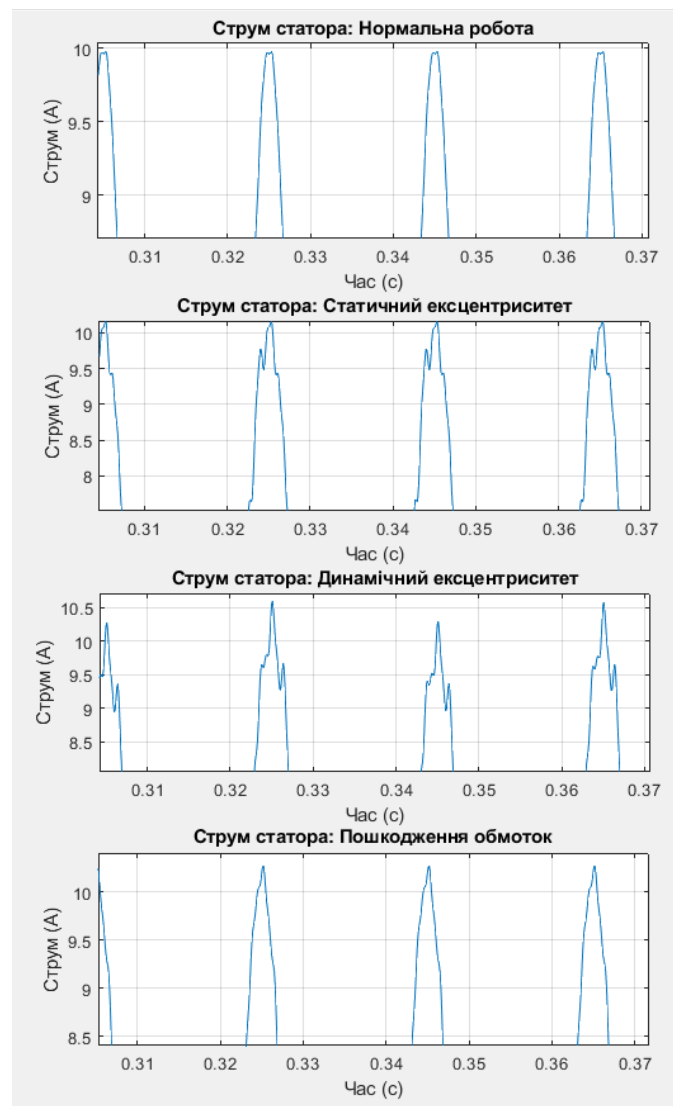


Рисунок 1. Графіки струму статора

Таким чином графіки в часовій області наочно демонструють ключову причину застосування спектрального аналізу – неможливість точної та надійної діагностики несправностей асинхронних двигунів лише на основі візуального спостереження за формою струму.

Спектри струму статора (Current Spectra in Frequency Domain) є результатом швидкого перетворення Фур'є сигналу струму статора і відображає амплітуди різних частотних складових. Вісь X представляє частоту (в Герцах), а вісь Y – амплітуду (в Амперах), часто в логарифмічному

масштабі (semilogy) для кращого виділення низькоамплітудних гармонік.

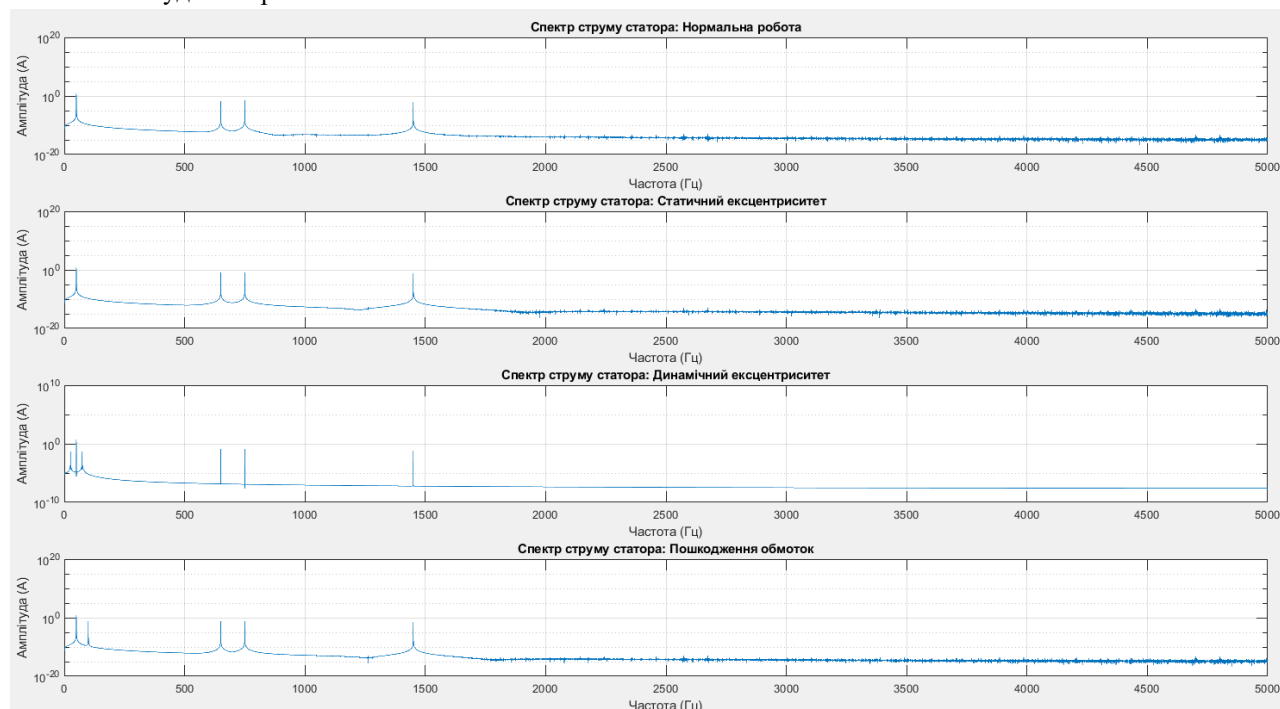


Рисунок 2. Спектри струму статора

Спектральний аналіз є фундаментальним для виявлення прихованих несправностей, оскільки він дозволяє виділити характерні частоти. Несправності генерують специфічні частотні складові (гармоніки), які розраховуються на основі параметрів двигуна, зростання амплітуд цих характерних гармонік є прямим індикатором розвитку дефекту.

На спектрі при нормальній роботі буде домінувати один яскраво виражений пік на частоті живильної мережі ($f_i = 50$ Гц). Амплітуди зубцевих гармонік (f_{zh}) будуть присутні, але на мінімальному, "фоновому" рівні, відображаючи нормальну електромагнітну взаємодію ротора і статора. Бічні частоти (f_{de}) будуть відсутні або матимуть вкрай низькі амплітуди.

Ключовою ознакою статичного ексцентриситета буде значне зростання амплітуд певних зубцевих гармонік. У результатах моделювання це проявляється зростанням амплітуд гармонік на частотах, наприклад, 350 Гц та 650 Гц. Ці збільшення амплітуд свідчать про нерівномірність повітряного зазору, спричинену статичним зміщенням ротора.

Динамічний ексцентриситет на додаток до зростання амплітуд зубцевих гармонік, найбільш характерною ознакою є поява або значне збільшення амплітуд додаткових бокових частот. Ці бічні смуги

розташовуються навколо основної гармоніки та/або зубцевих гармонік і є прямим індикатором динамічних дефектів ротора, таких як вигин вала або його дисбаланс.

Спектр при пошкодженні обмоток може показати зростання амплітуд на інших характерних частотах, які не завжди є зубцевими гармоніками, але пов'язані з асиметрією обмоток або іншими електричними дефектами. Наприклад, можуть з'явитися або значно збільшитися амплітуди гармонік, кратних основній частоті ($2f_i$, $3f_i$, тощо), або інших характерних частот, що виникають при міжвиткових замиканнях або обривах фаз.

Дані, отримані на етапі нейромережевої обробки, відображають ефективність та точність навченої моделі ІІІ. Ці дані критично важливі для оцінки надійності та придатності моделі для використання в реальних системах автоматики. Для візуалізації процесу навчання та результатів використано графічний інструмент nntaintool MATLAB.

Ефективність розробленої діагностичної моделі була підтверджена шляхом її тестування на даних, отриманих у процесі симуляції. Основною метою було переконатися, що нейронна мережа здатна коректно класифікувати стани асинхронного двигуна, використовуючи лише спектральні ознаки, виділені зі струму статора. Для навчання нейронної

мережі було сформовано навчальний набір, що включав 1000 спектрів, згенерованих для різних станів. Кожен спектр був перетворений у вектор ознак, що містив нормовані амплітуди діагностичних гармонік, які подавалися на вхід нейромережі.

Ключовим результатом є оцінка ефективності навченої мережі на тестовій вибірці, яка складалася з даних, що не використовувалися під час навчання. Точність класифікації, досягнута моделлю, склала 94%. Цей показник свідчить про високу здатність нейронної мережі до узагальнення та правильного розпізнавання несправностей на основі аналізу спектральних ознак.

Висновок

Запропонований у роботі метод діагностики асинхронних двигунів, що базується на комплексному аналізі спектральних характеристик струму статора та застосуванні нейромереж, демонструє високу ефективність і є перспективним для впровадження у критично важливих системах, зокрема на залізничному транспорті.

Аналіз сигнатури струму двигуна є потужною неінвазивною технікою, яка дозволяє виявляти несправності АД на ранніх стадіях без зупинки обладнання. Він ґрунтується на фізичних принципах, що пов'язують геометричні та електричні параметри двигуна з характерними гармоніками у спектрі струму, такими як зубцеві гармоніки та бічні частоти. Інтеграція багатошарової нейронної мережі для класифікації станів двигуна дозволила досягти високої точності. В ході симуляцій, нейромережа, навчена на 1000 спектрах, показала точність класифікації 94% на тестовій вибірці. Це підтверджує, що модель здатна ефективно розпізнавати складні патерни несправностей на основі векторів ознак, сформованих з спектральних даних.

Розроблений метод дозволяє перейти від планового чи реактивного обслуговування до справжнього прогностичного обслуговування. Оперативне та точне виявлення дефектів, таких як ексцентриситет повітряного зазору чи пошкодження обмоток, є критично важливим для мінімізації ризиків аварій, скорочення часу простоїв стрілочних переводів, зменшення експлуатаційних витрат та підвищення загального рівня безпеки руху.

Визначено, що точність діагностики залежить від точного знання конструктивних параметрів двигуна. У подальшому розвитку моделі планується інтеграція додаткових діагностичних ознак, таких як

дані вібрації та температури, що дозволить підвищити надійність системи та зробити її більш стійкою до змін умов експлуатації та шумів.

Розроблений метод є подальшим розвитком існуючих діагностичних підходів [15, 16]. Запропонований підхід є значним кроком у напрямку створення автономних та інтелектуальних систем моніторингу, які є запорукою ефективного та безпечного функціонування залізничного транспорту.

Список використаних джерел

1. Motor Current Signature Analysis for Gear Train Fault Detection [Електронний ресурс] // MATLAB & Simulink. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/motor-current-signature-analysis-for-gear-train-fault-detection.html>. – Дата звернення: 20.07.2025.
2. Jawad Faiz, Farbod Parvin. Recent Advances in Fault Diagnosis Methods for Electrical Motors- A Comprehensive Review with Emphasis on Deep Learning // AUT Journal of Electrical Engineering AUT J. Electr. Eng., 56(1) (Special Issue) (2024) 79-94 2024. Vol. 20, No. 1. P.79-91. DOI: 10.22060/ej.2023.22675.5558.
3. Majid Hussain, Tayab Din Memon, Imtiaz Hussain, Zubair Ahmed Memon, Dileep Kumar. Fault Detection and Identification Using Deep Learning Algorithms in Induction Motors // Computer Modeling in Engineering & Sciences. CMES, 2022, vol.133, no.2. P.435-470. <http://dx.doi.org/10.32604/cmes.2022.020583>
4. de las Morenas, J.; Moya-Fernández, F.; López-Gómez, J.A. The Edge Application of Machine Learning Techniques for Fault Diagnosis in Electrical Machines. *Sensors* 2023, 23, 2649. <https://doi.org/10.3390/s23052649>
5. Rohullah Rahmatullah1, Necibe Fusun Oyman Serteller, Vedat Topuz Modeling and Simulation of Faulty Induction Motor in DQ Reference Frame Using MATLAB/SIMULINK with MATLAB/GUIDE for Educational Purpose March 2023 International Journal of Education and Information Technologies 17:7-20 DOI:10.46300/9109.2023.17.2
6. Mohammed M. A., Khaleel S. A., Al-Tameemi H. A. A. Fault Diagnosis on Induction Motor using Machine Learning and Signal Processing [Електронний ресурс] // arXiv. 2024. – Режим доступу: <https://arxiv.org/html/2401.15417v1>. – Дата звернення: 20.07.2025.
7. synthesizeTabularData - Synthesize tabular data [Електронний ресурс] // MATLAB - MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/stats/synthesizeTabularData.html>. – Дата звернення: 29.07.2025.

8. Generate Synthetic Signals Using Conditional GAN [Електронний ресурс] // MATLAB & Simulink - MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/generate-synthetic-pump-signals-using-conditional-generative-adversarial-network.html>. – Дата звернення: 29.07.2025.

9. Saraa Ali, Aleksandr Khizhik, Stepan Svirin, Artem Ryzhikov, Denis Derkach. Learning to Hear Broken Motors: Signature-Guided Data Augmentation for Induction-Motor Diagnostics // arXiv. June 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.08412>

10. Hamming window [Електронний ресурс] // MATLAB - MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/hamming.html>. – Дата звернення: 29.07.2025.

11. How to apply Hamming Window and compute FFT? [Електронний ресурс] // Signal Processing Stack Exchange. 2018. – Режим доступу: <https://dsp.stackexchange.com/questions/47702/how-to-apply-hamming-window-and-compute-fft>. – Дата звернення: 29.07.2025.

12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2016. 800 с.

13. Example Deep Learning Networks Architectures [Електронний ресурс] // MATLAB & Simulink - MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/example-deep-learning-networks.html>. – Дата звернення: 29.07.2025.

14. Deep Learning Toolbox Documentation [Електронний ресурс] // MathWorks. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/index.html>. – Дата звернення: 29.07.2025.

15. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 4. С. 28-37.

16. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зондуючого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2024. № 2. С. 52-60.

Прилипко Андрій Андрійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6126-1085>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Сосунів Олександр Олексійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування

рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2175-7363>. Тел.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Змій Сергій Олексійович, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. e-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181> Scopus Author ID: 57192821601

Щебликіна Олена Вікторівна, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, PhD, Український державний університет залізничного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. e-mail: sov@kart.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921> Scopus Author ID: 57203618885

Prylypko Andrii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6126-1085>. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkooa@kart.edu.ua.

Sosunov Aleksandr, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2175-7363>. Tel.: +38(068) 607-88-13. E-mail: sosunov63@kart.edu.ua.

Serhii Zmii, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. e-mail: zmii.sergii@kart.edu.ua <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181> Scopus Author ID: 57192821601

Olena Shcheblykina, Associate Professor, Department of Automation and Computerized Train Control, PhD, Ukrainian State University of Railway Transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. e-mail: sov@kart.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8304-2921> Scopus Author ID: 57203618885

Prylypko A., Sosunov A., Serhii Z, Shcheblykina O

Diagnostics of an asynchronous motor using tooth characteristic removal and data processing with

artificial intelligence

Abstract. This article presents an innovative approach to the diagnostics of asynchronous motors (AMs), which are pivotal components in industrial applications and railway transport systems, particularly in automation and train remote control systems. The proposed method is grounded in a comprehensive analysis of tooth ripple harmonics within the stator current spectrum, utilizing Motor Current Signature Analysis (MCSA). This technique facilitates real-time condition monitoring of the motor without requiring its operational shutdown, thereby ensuring continuous system functionality.

The paper meticulously details the methodology, commencing with the acquisition of stator current signals at a high sampling frequency, which must exceed twice the maximum tooth ripple harmonic frequency. This is followed by the extraction and normalization of tooth ripple harmonics, whose frequencies are inherently dependent on specific motor parameters, including the number of stator and rotor slots, the number of pole pairs, and the supply frequency. A significant emphasis is placed on the precise identification of characteristic frequencies associated with various fault types, such as static and dynamic air-gap eccentricity, winding faults, and general mechanical defects.

A central tenet of the proposed diagnostic system is the integration of Artificial Intelligence (AI), specifically a multi-layer perceptron (MLP) feedforward neural network, for the automated processing and classification of the derived spectral data. The input layer of this neural network is designed to receive a comprehensive feature vector, comprising the normalized amplitudes of relevant tooth ripple harmonics and sideband frequencies. The network undergoes training using the backpropagation algorithm, coupled with a cross-entropy loss function to optimize its performance. Hidden layers employ the ReLU activation function, ensuring efficient learning and non-linearity, while the

output layer utilizes a Softmax function to classify the motor's operational state into four primary categories: normal operation, static eccentricity, dynamic eccentricity, and winding faults.

The presented simulation results, conducted on a 5.5 kW asynchronous motor with specific parameters ($p=2$, $N_r=28$, $f_1=50$ Hz), decisively corroborate the efficacy of the proposed methodology. Experiments encompassed the simulation of normal operating conditions, static eccentricity (simulated as a 0.3 mm displacement), and dynamic eccentricity (simulated as a 0.2 mm shaft bend). These simulations robustly demonstrated a significant increase in the amplitudes of characteristic harmonics at specific frequencies (e.g., 350 Hz and 650 Hz) when faults were introduced, thereby providing clear diagnostic indicators. The neural network, rigorously trained on a dataset of 1000 spectral samples, achieved a commendable classification accuracy of 94% on the unseen test set, validating its robust diagnostic capabilities.

The advocated diagnostic method not only substantially enhances diagnostic precision but also ensures operational efficiency, which is paramount for predictive maintenance, reducing operational costs, and extending the service life of critical equipment within the demanding environment of continuous railway transport system operations. While acknowledging the method's sensitivity to precise motor parameter definition and signal noise, future work is planned to integrate additional diagnostic features, such as vibration and temperature data, to further augment the system's accuracy and reliability, ensuring a more comprehensive diagnostic solution.

Keywords: Asynchronous motor, diagnostics, tooth ripple harmonics, spectral analysis, Motor Current Signature Analysis (MCSA), artificial intelligence, neural network, air-gap eccentricity, winding faults, predictive maintenance.

ПУЗИР В. Г., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),

ОБОЗНИЙ О. М., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту),

ЗАЛАТА А. С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)



Інтелектуальна система керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей та еволюційної оптимізації

Анотація. У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та адаптивності керування дизель-генераторними установками (ДГУ) автономного рухомого складу. Запропоновано інтелектуальну систему керування на основі нейронно-нечітких моделей із підтримкою онлайн-адаптації та еволюційної оптимізації. Розроблена система має модульну структуру, включаючи прогностичний блок, локальні регулятори та централізований координатор. Вона демонструє високу стійкість до змін умов експлуатації, здатна до самонавчання та мінімізації витрат. Запропоновано перспективи розвитку на основі глибших нейромережових архітектур.

Ключові слова: дизель-генераторна установка, інтелектуальне керування, нейронно-нечіткі системи, еволюційна оптимізація, онлайн-адаптація, автономний рухомий склад.

Постановка проблеми.

У сучасних умовах підвищених вимог щодо ефективності та екологічності енергетичних систем особливого значення набуває проблема вдосконалення систем керування дизель-генераторними установками (ДГУ), що забезпечують енергопостачання автономного рухомого складу на залізничному транспорті. ДГУ виконують критичні функції з генерації електроенергії в умовах обмеженої або відсутньої інфраструктури електропостачання, при цьому вони мають гарантувати високу надійність, мінімальні витрати палива та відповідність екологічним нормам.

Особливістю експлуатації ДГУ автономного рухомого складу є необхідність забезпечення стабільної роботи системи в умовах різко змінних зовнішніх факторів, широкого діапазону навантажень і старіння агрегатів. Структурна особливість системи, наявність нелінійних динамічних зв'язків і невизначеності у фізичних процесах значно ускладнюють завдання побудови ефективної системи автоматичного керування. Традиційні підходи, зокрема регулятори з фіксованими коефіцієнтами, виявляються недостатніми для забезпечення оптимальної роботи ДГУ в усьому спектрі режимів експлуатації.

В умовах підвищених вимог щодо екологічної безпеки транспорту актуальним стає завдання розроблення інтелектуальної системи керування, здатної адаптивно реагувати на зміну умов роботи, забезпечувати енергетичну ефективність і знижувати викиди шкідливих речовин.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останнього десятиліття спостерігають інтенсивний розвиток інтелектуальних методів керування складними технічними об'єктами. Використання нейронних мереж, нечіткої логіки, гібридних нейронно-нечітких систем (ANFIS), а також еволюційних алгоритмів оптимізації демонструє високі результати в задачах нелінійного керування та адаптації систем до змінних умов [1-3].

У галузі енергетичних установок значну увагу приділяють застосуванню нейронних мереж для апроксимації складних залежностей між технологічними параметрами. Дослідження [4] показують ефективність використання глибоких нейронних мереж для оптимізації режимів роботи теплових машин. У той же час роботи [5, 6] демонструють, що поєднання нейронних мереж із нечіткою логікою дає змогу підвищити інтерпретованість і стійкість керуючих алгоритмів.

У контексті дизель-генераторних установок застосування інтелектуальних систем керування розглянуто у працях [7, 8]. Проте більшість існуючих рішень зосереджено на статичних або слабо адаптивних системах, що обмежує їхню ефективність в умовах динамічної експлуатації рухомого складу.

©ПУЗИР В. Г.,ОБОЗНИЙ О. М.,ЗАЛАТА А.С.,2025

Недостатньо дослідженою залишається проблема онлайн-адаптації параметрів нейронно-нечітких моделей у реальному часі з урахуванням змін у технічному стані агрегатів і зовнішніх умов [9, 10]. Крім того, мало дослідженим є питання інтеграції модулів прогнозування технічного стану до загальної архітектури системи керування ДГУ.

Виділення невирішених питань. **Попри значний прогрес у розвитку інтелектуальних систем керування, залишається низка важливих наукових завдань, вирішення яких є критичним для підвищення ефективності та надійності ДГУ автономного рухомого складу.**

По-перше, існуючі підходи щодо побудови нейронно-нечітких систем переважно передбачають стаціонарне навчання, що не дає змогу враховувати зміну характеристик агрегатів у процесі експлуатації. В умовах старіння компонентів і непередбачуваних змін навантаження необхідним є розроблення механізмів онлайн-адаптації моделей.

По-друге, актуальним є завдання розроблення архітектури інтелектуальної системи з модульною структурою, що дасть змогу забезпечити узгоджену взаємодію локальних регуляторів і централізованого координуючого блока. Потрібно забезпечити мінімальні часові затримки і стійкість системи навіть за раптових змін умов експлуатації.

По-третє, недостатньо опрацьованими залишаються питання активного моніторингу технічного стану агрегатів ДГУ із використанням рекурентних нейронних мереж і їх інтеграції до процесу ухвалення керуючих рішень у реальному часі.

Вирішення зазначених завдань становить актуальну наукову проблему, що визначає необхідність проведення комплексного дослідження, присвяченого створенню нової архітектури інтелектуальної системи керування ДГУ з підвищеними адаптивними властивостями.

Постановка задачі дослідження. **Метою дослідження є розроблення інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу на основі нейронно-нечітких моделей із можливістю онлайн-адаптації та використанням еволюційних алгоритмів оптимізації.**

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку науково-технічних завдань: сформулювати математичні моделі основних підсистем ДГУ, забезпечити можливість адаптивного прогнозування оптимальних режимів роботи на основі поточних технологічних параметрів, розробити механізми онлайн-навчання нейронно-нечітких регуляторів, забезпечити інтеграцію модулів моніторингу технічного стану агрегатів у загальну архітектуру системи керування, а також реалізувати модуль глобальної оптимізації параметрів системи за багатокритеріальною цільовою функцією.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У процесі аналізу підходів щодо побудови інтелектуальних систем керування ДГУ було встановлено, що використання класичних регуляторів із фіксованими параметрами не забезпечує необхідного рівня адаптивності в умовах змінних режимів експлуатації. Навіть застосування адаптивних регуляторів із заздалегідь визначеними законами корекції виявляється недостатньо ефективним у випадку структурної зміни об'єкта або появи нових експлуатаційних факторів.

Методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, демонструють високу здатність до апроксимації складних нелінійних залежностей між вхідними та вихідними параметрами системи. Відповідно до теореми універсальної апроксимації, багат шарова нейронна мережа здатна апроксимувати довільну неперервну функцію в компактній області. Формально така апроксимація може бути подана у вигляді

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx \sum_{i=1}^q g_i \left(\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j \right), \quad (1)$$

де g_i – нелінійні функції активації;

ω_{ij} – вагові коефіцієнти;

x_j – вхідні сигнали.

Проте нейронні мережі мають суттєві обмеження, пов'язані з необхідністю наявності великої кількості навчальних даних і недостатньою інтерпретованістю моделі.

З іншого боку, нечітка логіка дає змогу ефективно працювати з неточними та неповними даними, формулюючи правила керування у вигляді лінгвістичних конструкцій. Формально нечітке правило можна подати як

$$R_i: \text{Якщо } x_1 \in A_1^i \text{ і } x_2 \in A_2^i, \text{ тоді } u \in B^i, \quad (2)$$

де A_1^i, A_2^i, B^i – нечіткі множини.

З урахуванням зазначених особливостей було ухвалено рішення реалізувати комбіновану нейронно-нечітку систему керування. Архітектура такого типу дає змогу об'єднати переваги обох підходів: здатність нейронної мережі до навчання та апроксимації з інтерпретованістю нечітких правил.

Гібридна система, подана як адаптивна нейронно-нечітка система виведення (ANFIS), має п'ятирівневу структуру обробки даних. Математично модель ANFIS можна подати як

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i},$$

(3)

де ω_i – вагові коефіцієнти;
 z_i – вхідні сигнали.

Процес навчання такої системи передбачає використання методів еволюційної оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів, що забезпечують глобальний пошук оптимальних параметрів нечітких множин і нейронної архітектури.

Розроблена інтелектуальна система керування ДГУ побудована за модульним принципом, що дає змогу забезпечити високу гнучкість, масштабованість і стійкість. Загальна структура системи включає чотири основні модулі: блок прогнозування режимів роботи дизельного двигуна, блок регулювання генератора, блок керування системою наддуву та централізований координуючий блок.

На нижньому рівні системи функціонують сенсори та виконавчі механізми, що збирають дані і реалізують керуючі впливи. Середній рівень поданий як нейронно-нечіткі модулі локального регулювання. Верхній рівень — координуючий блок, який оптимізує та синхронізує роботу всієї системи.

Формально взаємодія модулів системи описана рівняннями

$$U_D(t) = F_D(X(t), \Theta_D(t)),$$

(4)

$$U_G(t) = F_G(X(t), \Theta_G(t)),$$

(5)

$$U_T(t) = F_T(X(t), \Theta_T(t)),$$

(6)

$$Y(t) = H(U_D(t), U_G(t), U_T(t)),$$

(7)

де $X(t)$ – вектор вхідних параметрів;

$\Theta_D(t), \Theta_G(t), \Theta_T(t)$ – параметри адаптації;

H – функція системної відповіді.

Координуючий блок здійснює глобальну оптимізацію параметрів за багатокритеріальною функцією втрат, що враховує економічність, стабільність і екологічність роботи системи.

Кожен із нейронно-нечітких модулів локального регулювання у складі інтелектуальної системи має ієрархічну структуру обробки інформації, що включає вхідний рівень нормалізації даних, рівень фузифікації, рівень активації правил

нечіткої бази знань, рівень дефузифікації та рівень формування вихідного керуючого впливу.

На рівні фузифікації кожна вхідна змінна x_i перетворюється у ступінь належності до відповідних нечітких множин за допомогою функцій належності. Використовують, зокрема, гаусові функції

$$\mu_A(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - c)^2}{2\sigma^2}\right),$$

(8)

де c – центр нечіткої множини;

σ – її ширина.

На рівні активації обчислюють вагу кожного правила:

$$\omega_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j),$$

(9)

де $\mu_{A_j^i}(x_j)$ – ступінь належності x_j до відповідної нечіткої множини у правилі i .

Вихідна дія системи формується шляхом нормалізованого зваженого середнього всіх активних правил.

Ця архітектура забезпечує високу точність і стійкість регулювання навіть у випадках наявності шумів або неточних вимірювань.

Для забезпечення стійкості інтелектуальної системи керування в умовах нештатних ситуацій було розроблено механізм перемикання між інтелектуальним і резервним режимами керування. Формально логіка перемикання задана як

$$Mode(t) = \begin{cases} IntelligentControl, & \text{if } \forall i, x_i(t) \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \\ BackupControl, & \text{if } \exists i, x_i(t) \notin [x_i^{\min}, x_i^{\max}] \end{cases}$$

(10)

Для активного моніторингу технічного стану агрегатів системи було впроваджено модуль прогнозування на основі рекурентної нейронної мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM). Математична модель такого блока описана такими рівняннями:

$$\omega_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^i}(x_j),$$

(11)

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i),$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C),$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t,$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), \quad h_t = o_t * \tanh(C_t).$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1),$$

(13)

Застосування LSTM дає змогу виявляти на ранніх стадіях деградацію агрегатів і прогнозувати їхній технічний стан на горизонті кількох циклів експлуатації.

Основним елементом інтелектуальної системи є модуль багатокритеріальної оптимізації параметрів керування в реальному часі. Для реалізації цього модуля було застосовано метод рою частинок (PSO), адаптований для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Оновлення швидкості та позиції кожної частинки в оптимізаційному просторі описано системою рівнянь

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (p_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (g - x_i(t)),$$

(12)

$$J(x) = \omega_1 \cdot SFC(x) + \omega_2 \cdot NO_x(x) + \omega_3 \cdot PM(x) + \omega_4 \cdot \Delta U(x),$$

(14)

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – вагові коефіцієнти, визначені з урахуванням експлуатаційних пріоритетів.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження було розроблено нову архітектуру інтелектуальної системи керування дизель-генераторною установкою автономного рухомого складу. Система поєднує нейронно-нечіткі модулі локального регулювання, модуль прогнозування технічного стану агрегатів і координуючий блок багатокритеріальної оптимізації.

Використання гібридної нейронно-нечіткої архітектури забезпечило високу адаптивність і стійкість системи в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Реалізація механізмів онлайн-адаптації дала змогу враховувати структурні зміни об'єкта і забезпечити безперервне самонавчання системи у процесі її експлуатації.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення функціоналу системи за рахунок інтеграції додаткових каналів інформації про зовнішнє середовище, удосконалення методів інкрементального навчання нейронних мереж, а також підвищення ефективності модулів прогнозування технічного стану шляхом використання більш глибоких рекурентних архітектур.

Список використаних джерел

де $v_i(t)$ – швидкість i -ї частинки на ітерації t ;

$x_i(t)$ – позиція частинки на ітерації t ;

p_i – найкраща індивідуальна позиція;

g – глобально найкраща позиція рою;

ω – коефіцієнт інерції;

c_1, c_2 – коефіцієнти навчання;

r_1, r_2 – випадкові числа.

Цей модуль адаптивно налаштовує параметри нейронно-нечітких регуляторів у реальному часі для забезпечення мінімізації багатокритеріальної функції втрат

1. Jurado F. & Saenz J.R. Neuro-fuzzy control for autonomous wind-diesel systems using biomass. *Renewable Energy*. 2002. 27(1). 39–56. DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00170-7.

2. Conteh F., Tobaru S., Lotfy M.E., Yona A. & Senjyu T. An effective Load shedding technique for micro-grids using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *AIMS Energy*. 2017. 5(5). 814–837. DOI: 10.3934/energy.2017.5.814.

3. Sun J., Yan Z., Han Y. & Yang C. Advancing predictive maintenance for gas turbines: an intelligent monitoring approach with ANFIS, LSTM and reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023.

4. Abdolrasol M. G. M. et al. Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review. *Electronics*. 2021. 10(21). 2689. DOI: 10.3390/electronics10212689.

5. Mohayedi H. et al. Optimization of ANFIS with GA and PSO estimating α ratio in driven piles. *Engineering Computations*. 2020.

6. Fu J., Gu S., Wu L., Wang N., Lin L. & Chen Z. Research on Optimization of Diesel Engine Speed Control Based on UKF-Filtered Data and PSO Fuzzy PID Control. *Processes*. 2025. 13(3). 777. DOI: 10.3390/pr13030777.

7. Hosoz M., Isik D. & Cevik M. ANFIS modelling of the performance and emissions of a diesel engine using diesel fuel and biodiesel blends. *Fuel*. 2013. 104. 140–148. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.075.

8. Cheng Y., Zhang J., Al Shurafa M., Liu D., Zhao Y., Ding C. & Niu J. An improved multiple adaptive

neuro-fuzzy inference system based on genetic algorithm for energy management system of island microgrid. *Scientific Reports*. 2024. DOI: 10.1038/s41598-025-98665-x.

9. Shamshirband S., Hadipoor M., Baghban A., Mosavi A., Bukor J. & Varkonyi-Koczy A. Developing an ANFIS PSO Model to Estimate Mercury Emission in Combustion Flue Gases. arXiv preprint. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1910.05118.

10. Sekhar D. C., Pokanati V. V. R. R. & Kiranmayi R. A novel efficient adaptive-neuro fuzzy inference system control based smart grid to enhance power quality. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. 12(4). 3375–3387. DOI: 10.11591/ijece.v12i4.pp3375-3387.

Пузир Володимир Григорович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6096-9049. Тел.: +38 (050) 401-61-91. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com.

Обозний Олександр Миколайович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

PuzyrVolodymyr, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6096-9049.

Tel.: +38 (050) 401-61-91. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com.

OboznyiOleksandr, PhD (Tech.), senior lecturer, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023.

Tel.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

ZalataAndrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X.

Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

Intelligent Control System for Diesel Generator Unit of Autonomous Rolling Stock Based on Neuro-Fuzzy Models and Evolutionary Optimization

This article addresses the critical challenge of improving the efficiency and adaptability of control systems for diesel generator units (DGUs) used in

autonomous rail transport. The study introduces an intelligent control architecture based on hybrid neuro-fuzzy models capable of real-time adaptation and evolutionary optimization. The system is designed with a modular structure, incorporating four main components: a diesel engine operation forecasting module, a generator regulation block, a turbocharging control unit, and a centralized coordination module.

The developed neuro-fuzzy system employs an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) structure, combining the learning ability of neural networks with the interpretability of fuzzy logic. Evolutionary algorithms, specifically genetic algorithms and particle swarm optimization (PSO), are used for global parameter tuning to minimize a multi-objective loss function that considers fuel efficiency, stability, and environmental compliance.

A key feature of the system is its online self-learning mechanism, allowing dynamic adaptation to component aging, operational uncertainty, and shifting load conditions. Furthermore, a Long Short-Term Memory (LSTM)-based module is integrated for technical state forecasting, enabling early detection of degradation and proactive maintenance planning.

Simulation results demonstrate the robustness and responsiveness of the proposed control system across various operational scenarios. The architecture ensures sustained energy efficiency, reduced emissions, and resilience under sudden environmental or mechanical shifts.

Future work includes enhancing the prediction accuracy of the LSTM module, integrating external environmental data, and expanding the system's capabilities through incremental neural network learning methods. The presented research contributes to the development of smart energy systems in autonomous transport and provides a foundation for scalable, adaptive control technologies.

Keywords: diesel generator unit, intelligent control, neuro-fuzzy systems, evolutionary optimization, online adaptation, autonomous rolling stock.

Проф. ЛОМОТЬКО Д. В.,
асп. АБОЛОНІН А. І., КОФАНОВ О.В.,
магістранти КАЛИНИЧ М. В., ПРОКОФ'ЄВ А. І.
(Український державний університет залізничного транспорту)

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ У МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГАХ



Анотація. У статті з метою визначення ефективності надання логістичних послуг у мультимодальних логістичних ланцюгах розглянуто питання моделювання взаємодії залізничного та автомобільного транспорту. Запропонована модель взаємодії автомобільного та залізничного транспорту заснована на ринково-орієнтованому критерії оптимізації процесу функціонування вантажного терміналу, як частини логістичного ланцюга. За результатами моделювання взаємодії визначено верхню межу кількості вагонів (контейнерів), які може опрацювати термінал, а також оптимальну кількість автотранспортних засобів, залучених у логістичний ланцюг. На підставі цих даних сформульовано висновок щодо допустимості конкретного технологічного варіанту взаємодії залізничного та автомобільного транспорту на терміналі, з урахуванням його вигідності для мультимодального оператора.

Ключові слова: залізничний транспорт, автотранспорт, контейнерні перевезення, мультимодальні перевезення, ефективність перевезень, логістичний ланцюг.

Вступ.

Сучасні тренди розвитку залізничних перевезень пов'язано із введенням військового стану в країні, а також змінами обсягів і напрямків транспортування вантажів. Одним із найважливіших напрямів підвищення конкурентоспроможності залізниць є комплексне транспортне обслуговування клієнтури, тобто створення мультимодального логістичного ланцюга із наданням сервісних послуг у «єдине вікно» та з доставкою вантажів «від дверей до дверей». Формування логістичного ланцюга, який забезпечуватиме ці вимоги, передбачає комплексне логістичне обслуговування клієнтури із використанням залізниці та власного або орендованого автотранспорту.

Формування складних логістичних ланцюгів з використанням декількох видів транспорту дедалі активніше здобувають позиції на ринку перевезень, що свідчить про глобальний тренд як в країнах ЄС, так й в Україні, особливо при перевезенні контейнерних, небезпечних та гуманітарних вантажів. Більше того, в умовах повномасштабної збройної агресії проти країни, при частковому блокуванні морських шляхів та інших логістичних викликів, мультимодальні залізнично-автомобільні перевезення виступають важливим засобом підтримки експортно-імпортних операцій та забезпечення економічної стійкості нашої держави. Враховуючи це, дослідження методів та підходів до оптимізації ефективності шляхом моделювання взаємодії

залізничного та автомобільного транспорту у мультимодальних логістичних ланцюгах набуває надзвичайної актуальності як з наукової, так і з практичної точки зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вирішення питання удосконалення системи доставки за участю залізниці та автотранспорту має базуватися на формуванні логістичних каналів, що закріплено на нормативному рівні [1]. Одним із ключових аспектів їх ефективного функціонування є використання мультимодальних перевезень [2] та автоматизація цієї діяльності [3]. Теоретичні дослідження та напрямки практичних напрацювань стосовно перевезень вантажів у мультимодальних логістичних ланцюгах спираються на моделюванні та побудові дієвих класичних логістичних каналів від відправника до отримувача, що вимагає формалізації усіх логістичних процесів [4, 5]. Деякі автори пропонують проектування транспортно-логістичної системи з урахуванням ризиків, що виникають при міжнародних мультимодальних перевезеннях [6, 7].

Технологія індустрії 4.0 для логістичних процесів здобула назву Logistics 4.0. Дослідження [8] спрямовані на створення концепту моделі логістичного ланцюга на основі архітектури її побудови на елементах концепції Logistics 4.0, має забезпечувати їх мобільність та функціональність шляхом взаємодії з терміналами збору даних у режимі реального часу на базі сучасних інтерфейсів передачі

©ЛОМОТЬКО Д. В., АБОЛОНІН А. І., КОФАНОВ О.В., КАЛИНИЧ М. В., ПРОКОФ'ЄВ А. І., 2025

даних (Wi-Fi, Bluetooth, RFID, Ethernet, GSM тощо) із можливістю застосування елементів штучного інтелекту [9].

Визначення мети та завдання дослідження.

З метою визначення ефективності надання логістичних послуг у мультимодальних логістичних ланцюгах розглянуто деякі питання щодо моделювання взаємодії залізничного та автомобільного транспорту.

Основна частина дослідження.

При необхідності доставки вантажу «від двері до двері» значна увага приділяється вибору транспортного засобу (або декількох видів транспорту) з раціональним розподілом за ними відповідних ділянок логістичного ланцюга доставки. При цьому, за експертною оцінкою беруть до уваги наступні фактори, що притаманні кожному виду транспорту, зокрема: вартість перевезення; надійність дотримання графіка доставки; тривалість доставки; здатність доставки вантажу в будь-яку точку тощо. Останньому фактору найбільше повно відповідає автомобільний транспорт. Колісний транспортний засіб може поступатися залізниці в одноразових обсягах перевезеного вантажу, вартості перевезення, однак за маневреністю саме автомобіль не має конкурентів серед інших видів транспорту.

Мультимодальні транспортні оператори є ключовими гравцями на ринку перевезень, беручи на

себе організацію та координацію всього процесу доставки вантажу. Вони виконують широкий спектр функцій, включаючи вибір оптимального маршруту та видів транспорту, укладання договорів з перевізниками, оформлення транспортної документації, страхування вантажу, інформування вантажовласника про хід перевезення, а також управління ризиками та забезпечення безпеки. Існують різні моделі організації мультимодальних перевезень, за яких мультимодальні транспортні оператори можуть виступати в ролі експедиторів, логістичних провайдерів або операторів терміналів, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Важливу роль у роботі мультимодальних операторів відіграють інформаційні технології, що забезпечують обмін даними між усіма учасниками транспортного процесу, відстеження вантажу в режимі реального часу та ефективне управління ланцюгами поставок. Діяльність мультимодальних операторів регулюється як законом України [10], так й міжнародним законодавством, спрямованим на забезпечення безпеки перевезень та захист інтересів вантажовласників. Аналіз деяких найбільших логістичних компаній котрі виступають в ролі мультимодальних транспортних операторів в Україні (таблиця 1), дає зрозуміти що більша частина компаній є дочірніми підприємствами великих міжнародних компаній.

Таблиця 1 – Найбільші логістичні компанії України що надають послуги мультимодальних перевезень

№	Назва	Характеристика
1.	ZAMMLER GROUP	Компанії групи ZAMMLER надають послуги у сфері автомобільних, морських, авіаперевезень, митно-брокерського оформлення, а також – повний спектр складських послуг. До групи ZAMMLER входить 5 компаній, які представлені 17 офісами. Компанії розташовані в Європі та Азії. Компанія співпрацює з логістичними партнерами по всьому світу. ZAMMLER надає всі види логістичних послуг, застосовуючи єдиний стандарт якості та технологій обслуговування клієнтів.
2.	Raben Ukraine	Міжнародна логістична компанія з представництвом в Україні. Логістичний оператор, який пропонує комплексні послуги: контрактної логістики, автомобільних перевезень (міжнародні та внутрішні), фреш логістики, митного терміналу, FTL та інтермодального транспорту, морських та авіаперевезень.
3.	DB Schenker в Україні	Одна з провідних світових логістичних компаній, яка також активно працює в Україні. Міжнародна логістика DB Schenker поєднує у собі комплексні рішення транспортування та обробки вантажів (міжнародне відправлення вантажів автомобільним транспортом FTL/LTL, вантажоперевезення з температурним режимом та ADR, DB SCHENKER System-перевезення збірних вантажів Україна-Європа-Україна, авіаперевезення вантажів, міжнародні морські перевезення вантажів FCL, DB SCHENKER LCL - контейнерні перевезення збірних вантажів LCL, перевезення по Україні, складська логістика)
4.	Kuehne+Nagel в Україні	Міжнародна транспортно-логістична компанія зі штаб-квартирою в місті Шенделег (Швейцарія), також надає послуги перевезень в Україні. Компанія надає послуги з морських, повітряних та авто вантажоперевезень, складської, контрактної та проектної логістики з акцентом на надання IT-рішень, митно-брокерський супровід.
5.	Cargo Support	Українська компанія заснована у 2017 році, що спеціалізується на міжнародних вантажних перевезеннях, включаючи мультимодальні схеми.

Укрупнену схему для побудови моделі взаємодії залізничного та автомобільного транспорту при перевезенні вантажів у контейнерах наведено на рис. 1.

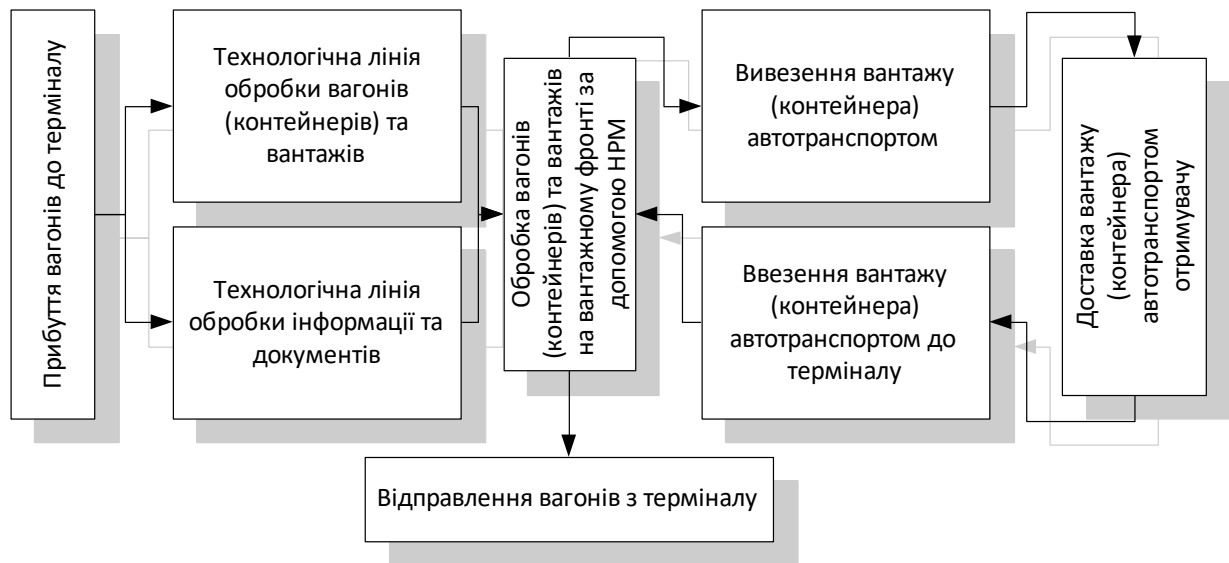


Рис. 1 – Структурно-логічна схема моделі взаємодії автомобільного та залізничного транспорту на логістичному терміналі при доставці вантажів

Завданням моделювання взаємодії автомобільного та залізничного транспорту на терміналі, як частині мультимодального логістичного ланцюга - максимізація різниці витрат вантажовласника V_v при виконанні доставки за

$$K = \begin{cases} \text{ArgMax} [V_v (V_{\text{зал}}, V_{\text{авт}}, V_{\text{конт}}, V_{\text{оч}}, V_{\text{нрм}}) - O_v (O_{\text{зал}}, O_{\text{авт}}, O_{\text{конт}}, O_{\text{оч}}, O_{\text{нрм}})] \\ O_{\text{пр}} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

де $V_{\text{зал}}, O_{\text{зал}}$ - витрати, що пов'язано із доставкою вантажу (контейнеру) залізничною частиною логістичного ланцюга у вантажовласника та у мультимодального оператора, грн./рік;

$V_{\text{авт}}, O_{\text{авт}}$ - витрати, необхідні на придбання або оренду автотранспорту при уні- та мультимодальному перевезенні, грн./рік;

$V_{\text{конт}}, O_{\text{конт}}$ - витрати вантажовласника або оператора на обробку контейнерів (якщо вантаж перевозиться у контейнерах), грн./рік;

$V_{\text{оч}}, O_{\text{оч}}$ - економічні втрати, пов'язані з очікуванням автомобілів навантаження, вивантаження та інших операцій на терміналі у вантажовласника або оператора, грн./рік;

$V_{\text{нрм}}, O_{\text{нрм}}$ - витрати вантажовласника або оператора, пов'язані з виконанням навантажувальних робіт на терміналі, грн./рік.

При цьому

$$V_{\text{зал}}, O_{\text{зал}} = 365 \sum_{i=1}^{N_n} n_i C_{\text{зі}} + t_{\text{звг}} i C_{\text{вт}}$$

де n_i - кількість вагонів, що задіяно у перевезенні вантажу i -го вантажовласника;

унімодальною схемою своїми силами та оператора мультимодального перевезення O_v у процесі надання їм послуги із доставки вантажів. При цьому для оператора має забезпечуватись прибуток $O_{\text{пр}}$ для різних початкових умов, тобто $O_v < V_v$. Це укрупнено представлено як

$C_{\text{зі}}$ - залізничний тариф на перевезенні вантажу i -го вантажовласника, грн./ваг. Може бути диференційованим в залежності від обсягу перевезень та наявності у перевізника скидок типу «сконто» як для вантажовласника, так й для оператора, грн./ваг;

$t_{\text{звг}} i$ - тривалість знаходження вагону на терміналі з урахуванням очікування, год

$C_{\text{вт}}$ - ставка вагоногодина простою, грн.;

N_n - кількість вантажовласників, що надали для перевезення вантаж мультимодальному оператору.

$$V_{\text{оч}}, O_{\text{оч}} = 365 m_{\text{авт}} (c_{\text{авт}} + c_{\text{інф}}) t_{\text{оч}}$$

$$V_{\text{авт}}, O_{\text{авт}} = 365 m_{\text{авт}} c_{\text{авт}} t_{\text{авт}}$$

де $m_{\text{авт}}$ - кількість автомобілів, які здійснюють перевезення вантажу (контейнерів);

$c_{\text{авт}}$ - вартість години роботи автомобіля, грн./год.;

$t_{\text{авт}}$ - розрахункова тривалість зайнятості автомобіля протягом доби, год. У разі власного автотранспорту $t_{\text{авт}} = 24$ год; при орендованому

автотранспорті $t_{\text{авт}}$ визначається тривалістю доставки до кінцевого споживача автотранспортом).

$$B_{\text{конт}, O_{\text{конт}}} = 365 * C_{\text{конт}} \sum_{i=1}^{N_0} n_i a_{\text{конт}i} t_{\text{конт}i},$$

де $C_{\text{конт}}$ – ставка контейнерогодини простою, грн.;
 $a_{\text{конт}i}$ – кількість контейнерів у вагоні для i -го вантажовласника;

$$B_{\text{крп}, O_{\text{крп}}} = 365 \left(2 * m_{\text{авт}} c_{\text{нвв}} + 2 * \sum_{i=1}^{N_0} n_i c_{\text{крв}} \right),$$

де $C_{\text{нвв}}$ – ставка збору за навантаження або розвантаження автомобілю, грн.;

$C_{\text{крв}}$ – ставка збору за навантаження або розвантаження вагону, грн.

З урахуванням схеми, наведеної на рис. 1, розглянемо в комплексі модель взаємодії залізничного та автомобільного транспорту у мультимодальних логістичних ланцюгах взаємодії залізничного та автомобільного видів транспорту при завезенні-вивезенні вантажів з урахуванням (2)-(6). При цьому приймаємо низку припущень:

- з кожним вагоном, що поданий на термінал, виконується дві вантажні операції;
- з кожним автомобілем, що прибув на термінал, виконується дві вантажні операції;
- всі автомобілі, вагони (контейнери) вважаються придатним для перевезення вантажу у технічному та комерційному відношенні;

$t_{\text{конт}i}$ – тривалість знаходження контейнера на терміналі, год.

де $t_{\text{оч}}$ – тривалість очікування автомобілем вантажних операцій на терміналі в період зайнятості фронту навантаження-вивантаження, технологічних перерв, неготовності вагонів (контейнерів) тощо, год.;

$C_{\text{інф}}$ – ставка погодинної оплати за користування інфраструктурою (терміналом), грн.

(6)

– інформація й документи на вантаж обробляються за допомогою автоматизованої системою й не є обмежуючим фактором часу

Як полігон досліджень моделі взаємодії залізничного та автомобільного транспорту був обраний умовний логістичний ланцюг із декількох підприємств харківського залізничного вузла. Оцінку середньодобової кількості вагонів, що очікують виконання вантажних операцій на терміналі при різних варіантах обслуговування дослідного логістичного ланцюга наведено на рис. 2. Встановлено, що кількість вагонів, які очікують на терміналі вантажних операцій, не перевищує середнє добове надходження вагонів, тобто не переходить на наступну добу навіть при задіяні 3, 2 та 1 автівок мультимодального оператора у автомобільній частині логістичного ланцюгу.

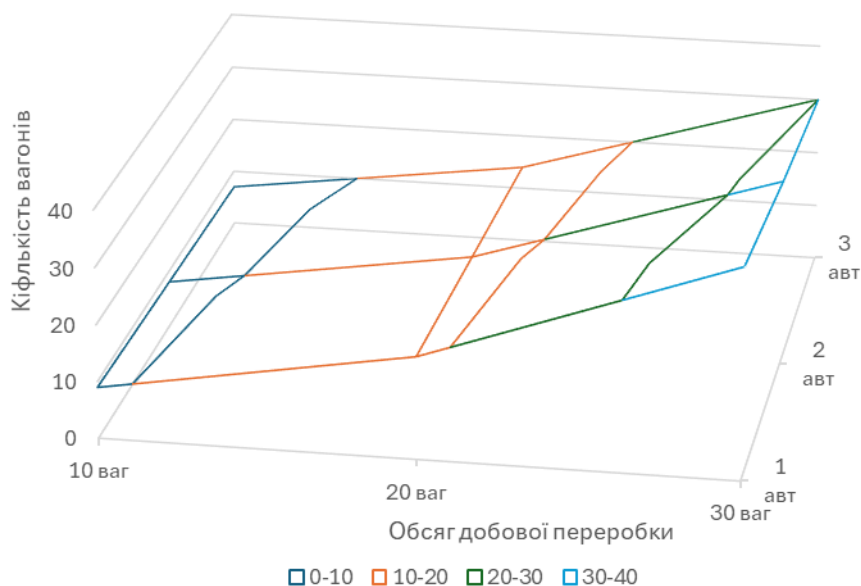


Рис. 2. Оцінка середньодобової кількості вагонів, що очікують виконання вантажних операцій на терміналі при різних варіантах обслуговування дослідного логістичного ланцюга

Оцінка середньодобової тривалості обробки автомобільного транспорту на терміналі при різних вагонів (з урахуванням очікування вантажних операцій) у процесі взаємодії залізничного та мультимодального оператора) наведено на рис. 3.

Встановлено, що тривалість обробки вагонів складає від 153 да 1621 хв/добу. Останній технологічний варіант із використанням 1 автівки не може бути

реалізованим протягом доби, тому його із застосування рекомендовано виключити.

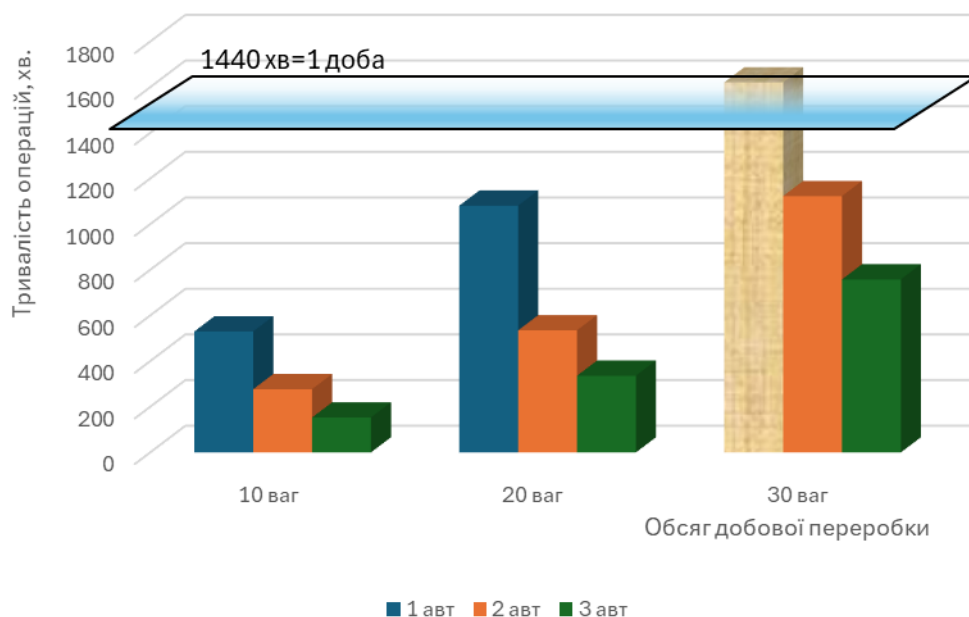


Рис. 3. Оцінка середньодобової тривалості обробки вагонів у процесі взаємодії залізничного та автомобільного транспорту на терміналі при різних варіантах обслуговування

Висновки.

Таким чином, запропонована модель взаємодії автомобільного та залізничного транспорту заснована на ринково-орієнтованому критерії оптимізації процесу функціонування вантажного терміналу, як частини логістичного ланцюга.

В результаті моделювання взаємодії встановлено максимальну кількість вагонів (контейнерів), що можуть бути оброблені терміналом, та раціональну кількість автотранспортних засобів, що задіяно у логістичному ланцюзі. На підставі цього зроблено висновок про допустимість того чи іншого технологічного варіанту взаємодії залізничного та автомобільного транспорту на терміналі з урахуванням вигідності варіантів для мультимодального оператора.

Це дозволяє зробити висновок про фінансову привабливість вантажовласника технологічних варіантів формування мультимодального логістичного ланцюга.

У перспективі динаміку змін тривалості знаходження автомобіля, вагона (контейнера) та їх очікування можна дослідити та представити у вигляді відповідних функцій розподілу, що перетворить модель на стохастичну й підвищить якість отриманих результатів.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках. Постанова КМУ

України №1550 від 27 грудня 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n22>.

2. Кирпа Г.Н. Организация контрейлерных перевозок в Украине. Дніпропетровськ: Арт-Пресс, 1998. – 132 с.
3. Арсененко Д. В., Ломотко Д. В., Ковальова О. В. Розроблення оптимальної технології перевезення зернових вантажів з урахуванням сучасних тенденцій галузі. Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2024, вип. 208. С.215-222 DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308751>.
4. Kwateng, K.O., Tetteh, F.K., Asare, N. and Manu, D. (2022), "Can intercluster coordination mediate the relationship between supply chain flexibility and humanitarian supply chain performance?", Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-09-2021-0086>
5. Розвиток інфраструктури мультимодальних перевезень в Україні у контексті зміни транспортно-логістичних маршрутів в умовах війни: наукова доповідь. – Львів: ІРД НАН України, 2023. – 72 с. ISBN 978-617-14-0079-5.
6. Окорочков А.М., Бех П.В., Лашков О.В. Організація міжнародних мультимодальних перевезень з урахуванням ризиків. Технічні науки та технології. – 2025. – № 1(1). – С. 41–47. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/41>

7. Ломотько Д.В., Ільчишин В.М., Афанасова О.Ф., Нестеренко О.О. Удосконалення технології функціонування зернових логістичних ланцюгів за участю залізничного транспорту. Залізничний транспорт України. – 2025. - № 2. – С. 4-11. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-155-2-04-11
8. Woschank, M. and Dallasega, P. (2021), “The impact of logistics 4.0 on performance in manufacturing companies: a pilot study”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 55, pp. 487-491, doi: 10.1016/j.promfg.2021.10.066.
9. Lomotko, D., Ohar, O., Kozodoi, D., Barbashyn, V., Lomotko, M. (2023). Efficiency of “Green” Logistics Technologies in Multimodal Transportation of Dangerous Goods. In: Arsenyeva, O. And etc. *Smart Technologies in Urban Engineering*. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-20141-7_74
10. Про мультимодальні перевезення. Закон України № 1887-IX від 17.11.2021р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>

Prof. Lomotko D. V., postgraduate student Abolonin A. I., Kofanov O.V., graduate students Kalynych M. V., Prokofiev A. I.

MODELING THE INTERACTION OF RAIL AND ROAD TRANSPORT IN MULTIMODAL LOGISTICS CHAINS

Abstract. In order to determine the effectiveness of providing logistics services in multimodal logistics chains, the article considers the issue of modeling the interaction of rail and road transport. The proposed model of interaction of road and rail transport is based on a market-oriented criterion for optimizing the process of functioning of a cargo terminal as part of a logistics chain. According to the results of interaction modeling, the upper limit of the number of wagons (containers) that the terminal can process, as well as the optimal number of vehicles involved in the logistics chain, was determined. Based on these data, a conclusion was formulated regarding the admissibility of a specific technological option for the interaction of rail and road transport at the terminal, taking into account its profitability for the multimodal operator. Thus, it is possible to assess the financial attractiveness of the options for forming a multimodal logistics chain from the point of view of the cargo owner.

Keywords: rail transport, road transport, container transport, multimodal transport, transport efficiency, logistics chain

Д-р техн. наук С. В. ВОРОНІН, кандидати техн. наук В. О. МАЗЕПА,
Г. М. АФАНАСОВ, аспіранти Ю. К. ОРЛЮК, Т. В. ТРИФОНОВ

КРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОТОРНИХ ОЛИВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СТРОКІВ ЇХ ЗАМІНИ



Анотація. У статті подано новий аналітичний підхід для оцінювання зміни службових властивостей моторних олив під час експлуатації двигунів внутрішнього згоряння. Запропоновано два безрозмірні критерії — π_m та π_b , які дають змогу комплексно враховувати зміну властивостей моторної оливи та вплив основних експлуатаційних факторів. Розроблено залежність $\pi_m = f(\pi_b)$ для визначення оптимальних строків заміни моторної оливи з урахуванням як якості пального, так і початкових характеристик оливи. Поданий критеріальний підхід забезпечує більш точне прогнозування моменту, коли олива втрачає свої експлуатаційні властивості та підлягає заміні. Наразі проводять експериментальні дослідження для уточнення розробленої залежності на основі даних із різних типів двигунів. Збір експериментальних даних із різних типів машин забезпечить побудову узагальненої моделі, яка враховує всі суттєві фактори зносу моторної оливи.

Ключові слова: моторна олива, критерій подібності, критеріальний підхід, двигун внутрішнього згоряння, експлуатація, строки заміни, властивості оливи.

Вступ.

Залізничне господарство України є основним і найбільшим споживачем нафтопродуктів. Постійне збільшення залізничних перевезень, а отже, і збільшення обсягів споживання нафтопродуктів ставить перед дослідниками ряд завдань: збільшення довговічності двигунів, економічності їх експлуатації, виявлення та використання резервів економії ПММ, суттєве їх зниження.

У зв'язку з цим істотну роль відіграють питання раціонального підбору та застосування моторних олив у процесі експлуатації, оскільки властивості змащувального матеріалу є одним із найважливіших факторів, що впливають на надійність, довговічність і економічність роботи двигуна внутрішнього згоряння. Правильно підбираючи моторну оливу до ДВЗ, ресурс дизельних двигунів можна збільшити в 1,5 раза і більше [1].

Надійність і довговічність роботи двигунів внутрішнього згоряння значною мірою залежать від якості мастильних матеріалів і своєчасної їх заміни.

Традиційні підходи для оцінювання строків заміни моторних олив базовані зазвичай на фіксованому пробігу або годинах роботи, що не враховує реальних умов експлуатації, конструктивних особливостей двигуна, якості пального та інтенсивності навантажень. Такий підхід може призводити як до передчасної заміни оливи, що збільшує експлуатаційні витрати, так і надмірного продовження її використання, що підвищує ризик зносу та відмови двигуна.

В оливі, яка пропрацювала деякий час у системі змащення двигуна, відбувається ряд змін (накопичуються продукти окиснення оливи, корозії та зносу двигуна, пил і волога, змінюється в'язкість, спрацьовуються присадки), що мають істотний вплив на його фізико-механічні та експлуатаційні властивості, а отже, і стан трибосполучень, агрегатів і двигуна в цілому.

Грунтуючись на припущенні про безперервне погіршення якості моторної оливи в процесі роботи двигуна, багато вітчизняних і закордонних дослідників до недавнього часу вважали недоцільним тривале застосування олив. Однак за останні роки встановлено, що зі збільшенням строку служби оливи деякі її експлуатаційні властивості не тільки не погіршуються, а навіть поліпшуються.

Пояснити можливість збільшення строків заміни оливи тільки поліпшенням їхньої якості і вдосконаленням очищення від механічних домішок у двигунах не можна, оскільки одночасно зріс ступінь форсування двигунів, що призвело до посилення роботи моторної оливи в ДВЗ [2-8].

Тому для всебічного розв'язання проблеми продовження строків служби олив необхідно багато теоретичних і експериментальних досліджень із метою встановлення загальних закономірностей процесів, що протікають у моторних оливах за їх експлуатації в ДВЗ.

Велику інформативність про процеси старіння моторних олив за їх експлуатації в ДВЗ мають методи визначення ступеня спрацьовування

© С. В. ВОРОНІН, В. О. МАЗЕПА, Г. М. АФАНАСОВ, Ю. К. ОРЛЮК, Т. В. ТРИФОНОВ, 2025

присадок: за лужністю [2-5, 7], в'язкістю і термоокиснювальною стабільністю оливи [2-4].

Основною властивістю роботи моторної оливи в ДВЗ є запобігання зносу і задиру пар тертя, що працюють у режимі граничного змащування. Змащувальну дію оливи в чинних стандартах найчастіше характеризують за в'язкістю. Однак значення в'язкості не відображає здатності оливи виконувати свої функції в умовах граничного змащення, а також не дає інформації про наявність в оливі протизносних і протизадирних присадок. Інформацію про роботу оливи за режимів пошкоджуваності поверхонь (наприклад задир), а також наявність в оливі пакета присадок дають випробування на чотирикульковій машині за ГОСТ 9490.

На сьогодні єдиним надійним є метод оцінювання встановлення тих чи інших строків заміни оливи шляхом випробування двигунів, що працюють із різними строками заміни оливи, і подальшого обміру деталей пар тертя і оцінювання кількості лаків, нагарів і осадів.

Однак такий метод є дорогим і дає інформацію тільки для конкретного двигуна.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення критеріального підходу, який дасть змогу об'єктивно оцінювати зміну службових властивостей моторної оливи у процесі експлуатації та визначати оптимальні строки її заміни з урахуванням фактичних умов роботи двигуна. У статті запропоновано систему безрозмірних критеріїв, яка охоплює основні фізико-хімічні та експлуатаційні параметри, що впливають на працездатність мастильного матеріалу.

Визначення мети та завдання дослідження.

Критеріальний підхід має вирішувати три основні завдання:

1. Оцінити «жорсткість» умов роботи моторної оливи в ДВЗ з урахуванням ступеня форсування, характеру виконуваної роботи, ступеня зношеності та конструктивних особливостей. На основі цього вибрати групу експлуатації оливи за API: SE, SF, SG, SH, SJ, SL, SM, SN (для бензинових ДВЗ); CC, CD, CE, CF-4, CG-4, CH-4, CI-4, CJ-4, CK-4 (для дизельних ДВЗ).

2. Оцінити характер змін службових властивостей моторної оливи (погіршення групи експлуатації) у процесі її напрацювання у ДВЗ. Знання цього характеру дасть змогу за розрахунками визначити час експлуатації або пробіг, досягнувши яких службові властивості оливи мають гранично допустимі значення, за яких потрібно її замінити.

3. Оцінити вплив експлуатаційних факторів на зміну службових властивостей моторної оливи, таких як якість пального, об'єм системи мащення, об'єм доливання свіжої оливи (із її згорянням), ступінь форсування двигуна і тривалість експлуатації (пробіг).

Високі оберти колінчастого вала та малий об'єм системи змащування сприяють інтенсивному

прокачуванню одиниці об'єму оливи через вузли тертя, а отже, інтенсивному накопиченню продуктів окиснення та швидшому зношенню присадок.

Забруднення оливи в працюючому двигуні відбувається безперервно. На швидкість забруднення оливи впливає безліч факторів, насамперед вид і властивості палива [1, 9], тип, конструкція, технічний стан, режим роботи і умови експлуатації. Будь-які фактори, що знижують повноту згоряння палива і збільшують прорив газів у картер, сприяють інтенсивному забрудненню оливи, перш за все органічними домішками [2, 4].

Автори багатьох робіт [1, 3-5, 8, 10] висловлюють думку про заміну моторних оливи за фактичним станом. За такої системи будуть виключені підвищений знос двигуна і знижені додаткові витрати, пов'язані з передчасною заміною моторних оливи.

Розроблення спеціальних методик, за якими будуть визначені службові властивості моторних оливи у процесі експлуатації машин з урахуванням доливання оливи (освіження оливи), а також оцінювання бракувальних показників для ухвалення рішення на зняття оливи з експлуатації або її експлуатацію в беззмінному режимі є актуальним завданням, яке буде вирішено в цій роботі.

Основна частина дослідження. Вирішуючи перше завдання, нами було виведено критерій $\pi_{ДВЗ}$ [11], що дає змогу оцінити «жорсткість» умов роботи моторної оливи в ДВЗ з урахуванням форсованості двигуна, характеру виконуваної роботи, ступеня зношеності та конструктивних особливостей. На підставі оцінювання визначено групу експлуатації оливи за API. Проте цей критерій не дає змогу враховувати зміну службових властивостей моторної оливи у процесі експлуатації в ДВЗ.

Тому для вирішення другого завдання — оцінювання характеру змін службових властивостей моторної оливи в процесі її напрацювання у ДВЗ — отримано додатковий критерій π_M , який виведено за методикою, викладеною у статтях [10, 11],

$$\pi_M = \frac{E \cdot \eta^{2/3}}{\eta^2 \cdot c^{5/3}}, \quad (1)$$

де E — енергетичний інтегральний критерій трибологічної характеристики оливи, $\text{кг/м} \cdot \text{с}^2$. Цей критерій визначено на чотирикульковій машині тертя і враховує наявність в оливі протизносних і протизадирних присадок, а також швидкість їх спрацьовування [11];

η — луже число, мг КОН/г оливи, що характеризує здатність моторної оливи нейтралізувати сірчані сполуки, які утворюються в процесі згоряння палива, що містить сірку;

η — кінематична в'язкість оливи, $\text{мм}^2/\text{с}$, що характеризує несучу здатність масляного шару і втрати на тертя;

C – схильність оливи до окиснення, кг/м^3 , характеризує здатність оливи утворювати лаки, смоли та інші високотемпературні відкладення.

Проаналізуємо отриманий критерій π_m . Він прагне до максимального значення, коли енергетичний інтегральний критерій і лужне число оливи мають максимальне значення, тобто олива має хороші протизносні та протизадирні властивості, а також запобігає відкладенню смолисто-асфальтових речовин, карбенів і карбоїдів на деталях двигуна [12], при цьому здатна нейтралізувати сірку, яка міститься в дизельному пальному, що зменшує корозійно-механічний знос верхньої частини гільзи циліндрів і поршневих кілець.

Збільшення ж значень кінематичної в'язкості і схильності до окиснення, навпаки, призводить до зменшення значення критерію π_m . Це відбувається через те, що з підвищенням в'язкості оливи збільшується опір зсуву в масляному шарі, що призводить до збільшення втрат на тертя, особливо з пуском і роботою двигуна за низьких температур. Схильність до окиснення оливи характеризують кількістю тонкого шару оливи, який перетворюється на лакову плівку за дією температури. Тому, чим вище значення показника C , тим більше олива схильна до лакоутворення [12], а отже, погіршення температурного стану двигуна і закоксовування поршневих кілець.

Для того щоб визначити строки заміни оливи в ДВЗ, необхідно знати залежність зміни критерію π_m від його напрацювання у двигуні, тобто знати, як будуть змінюватися службові властивості моторної оливи в процесі експлуатації ДВЗ. Такі дані можна отримати тільки через експлуатаційні випробування різних типів двигунів. Результатами випробувань будуть числові значення критерію π_m , які будуть зменшуватися в процесі експлуатації двигуна, оскільки будуть зменшуватися протизносні та протизадирні властивості оливи (E), а також лужність (Π) з одночасним збільшенням в'язкості (η) і схильністю до окиснення.

В експлуатації важливо знати граничне значення критерію π_m , тобто числове значення, із досягненням якого моторну оливу необхідно замінити. Такі дані також отримують експериментальним шляхом, на основі великої вибірки ДВЗ.

Визначаючи час роботи моторної оливи у двигуні, із досягненням якого критерій π_m буде мати граничні значення, необхідно враховувати не реальний час роботи, год, або пробіг, км, а оцінювати цей фактор безрозмірним критерієм подібності. За таким підходом буде вирішено третє завдання з оцінювання впливу на зміну службових властивостей моторної оливи таких експлуатаційних факторів, як якість палива, об'єм системи змащення, об'єм доливання свіжої моторної оливи на вигорання.

Якщо вигорання моторної оливи має місце, то за рахунок доливання свіжої оливи (що має високу концентрацію присадки) вміст присадки в цілому буде знаходитися на граничному (допустимому) рівні, що забезпечує надійну експлуатацію двигуна.

Проаналізувавши механізм спрацьовування присадок у моторній оливі і фактори, які впливають на цей механізм, за методикою, викладеною вище, отримано безрозмірний критерій часу, що оцінює в комплексі процес втрати службових властивостей моторною оливою за її роботи в ДВЗ. Критерій має такий вигляд:

$$\pi_t = \frac{S^2 \cdot N_L^3 \cdot L^3}{G_M^3 \cdot G_D}, \quad (2)$$

де S – наявність сірки в паливі, м^3 , характеризує швидкість спрацьовування лужної присадки в оливі;

N_L – літрова потужність двигуна, Вт/м^3 ;

L – час роботи двигуна, год, характеризує пробіг автомобіля;

G_M – об'єм системи змащення двигуна, м^3 ;

G_D – об'єм доливання свіжої оливи, м^3 , характеризує ступінь «освіження» оливи в картері двигуна за рахунок введення присадок.

Як впливає з аналізу критерію подібності π_t (2): великий відсоток сірки в паливі, висока потужність двигуна або високий ступінь форсування, а також час роботи оливи у двигуні сприятимуть збільшенню критерію. Малий об'єм системи змащення і відсутність доливання також сприятимуть збільшенню критерію.

Аналіз показників ступенів змінних у формулі (2) дає змогу судити про ступінь впливу факторів, що входять до критерію π_i . Більшою мірою впливає час роботи оливи у двигуні L (або пробіг), меншою мірою об'єм доливання моторної оливи на вигоряння G_d .

Для практичного застосування отриманих критеріїв π_m і π_i необхідно отримати залежність

$$\pi_m = f(\pi_i). \quad (3)$$

Наведений вище аналіз отриманих критеріїв показує, що залежність (3) матиме вигляд, як показано на рисунку.

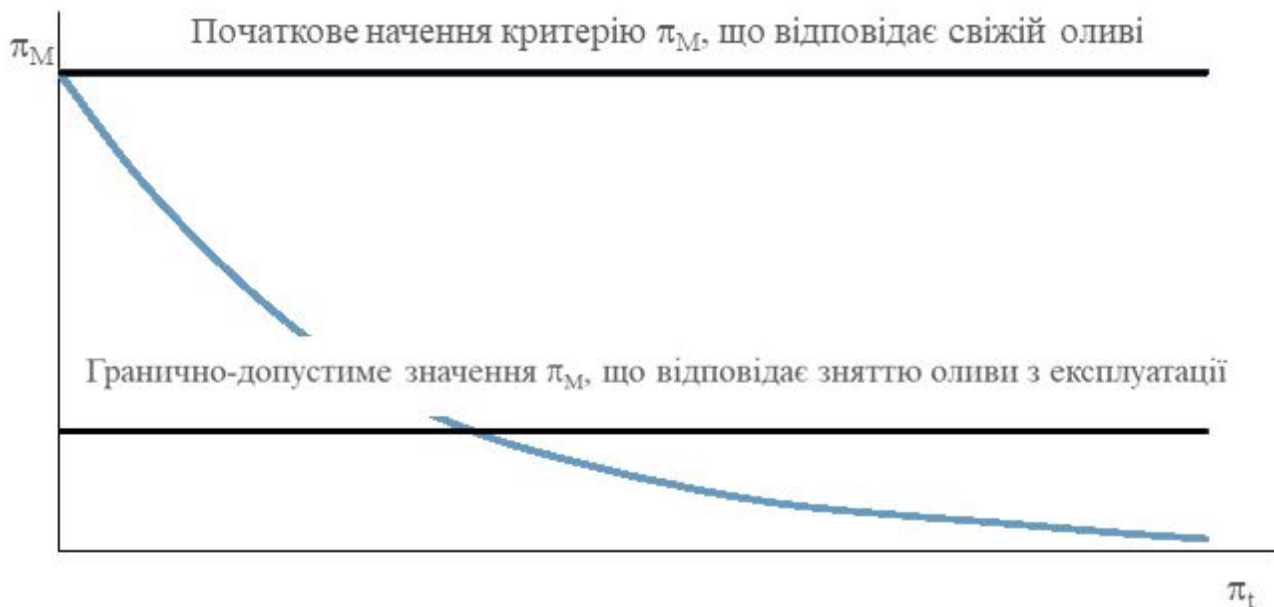


Рис. Взаємозалежність критеріїв подібності

На підставі інструкції [13] можна розрахувати граничне значення критерію $\pi_{m \text{ пред}}$ (1), досягши якого, оливу необхідно зняти з експлуатації.

Методика визначення експлуатації моторних олив за їхнім технічним станом зведена до оцінювання часу експлуатації моторних олив у мотогодинах за формулою

$$t = \frac{1}{3600} \cdot \left(\frac{G_m^{3/4} \cdot G_o^{3/4}}{N_l^{3/4} \cdot S} \cdot \left(\frac{\ln \frac{E_0 \cdot \Pi_0^{2/3}}{\eta_0^2 \cdot C_0^{5/3}} - \ln \frac{E_{\text{пред}} \cdot \Pi_{\text{пред}}^{2/3}}{\eta_{\text{пред}}^2 \cdot C_{\text{пред}}^{5/3}}}{a} \right) \right)^{4/9}, \quad (4)$$

де E_0 , Π_0 , η_0 , C_0 – початкові показники товарних моторних олив, які визначають лабораторним шляхом;

$E_{\text{пред}}$, $\Pi_{\text{пред}}$, $\eta_{\text{пред}}$, $C_{\text{пред}}$ – граничні значення показників моторних олив. Розраховують на

зниження (збільшення) від початкових показників, які визначають лабораторним шляхом за інструкцією [13].

Формулу (4) можна переписати в такому вигляді:

$$t = \frac{1}{3600} \cdot \left(\frac{G_m^{3/4} \cdot G_o^{3/4}}{N_l^{3/4} \cdot S} \cdot \left(\frac{\ln(\frac{\pi_{m0}}{\pi_{m\text{пред}}})}{a} \right) \right)^{4/9}, \quad (5)$$

де π_{m0} та $\pi_{m \text{ пред}}$ – значення критеріїв оцінювання службових властивостей моторних олив для товарної моторної оливи та оливи, яка досягла бракувальних показників, відповідно;

a – значення показника ступеня, для олив групи API CC дорівнює $1,58 \cdot 10^{-18}$.

Розрахуємо час експлуатації моторної оливи М-14Г₂ у двигуні 5Д49 тепловоза 2ТЕ116:

1. Початкове значення критерію π_{m0} , який оцінює експлуатаційні властивості товарної моторної оливи М-14Г₂ (АРІ СС), дорівнює $9,97 \cdot 10^{+21}$.

2. На підставі інструкції [13] розрахуємо граничні значення критерію $\pi_{m \text{ пред.}}$ для моторних олив групи АРІ СС, $\pi_{m \text{ пред. СС}} = 1,12 \cdot 10^{+21}$.

3. Показник ступеня a для олив групи експлуатації АРІ СС, якою заправлений двигун 5Д49 теплового 2ТЕ116, дорівнює $1,58 \cdot 10^{-18}$.

Підставимо отримані значення у формулу (5), додавши при цьому наявність сірки в паливі 0,5 % (що дорівнює $0,005 \text{ м}^3$), об'єм доливання оливи на вигорання для двигуна 5Д49 теплового 2ТЕ116 склав $G_d = 2,2 \text{ л/годину}$, отримаємо час експлуатації моторної оливи в мотогодинах:

$$t = \frac{1}{3600} \cdot \left(\frac{1^{3/4} \cdot 5^{3/4}}{101902217^{3/4} \cdot 0,005} \right) \cdot \left(\frac{\ln \left(\frac{9,97 \cdot 10^{+21}}{1,12 \cdot 10^{+21}} \right)}{1,58 \cdot 10^{-18}} \right)^{4/9} = 2668 \text{ м. г.}$$

З урахуванням середньої швидкості руху теплового 2ТЕ116 $V = 40 \text{ км/год}$

$$L = 2668 \cdot 40 = 106\,732 \text{ км.}$$

Обговорення результатів. Залежність (3) необхідно будувати за вибіркою не менше 100 двигунів, які відрізняються за конструкцією, потужністю, видом виконуваної роботи. При цьому для кожного двигуна з величиною критерію $\pi_{\text{двз}}$ існує своє значення π_m граничне, із досягненням якого моторну оливу необхідно замінити. Знаючи π_m граничне і вираз залежності (3), можна розрахунковим шляхом визначити строки зміни оливи. При цьому будуть ураховані всі фактори, які входять до формул (1) і (2), тобто не тільки пробіг або час роботи двигуна, а і якість палива, доливання оливи, ступінь форсування двигуна і початкова якість моторної оливи.

Висновки.

Залежність (3) розрахунковим шляхом дає змогу визначати збільшення строків заміни моторної оливи, якщо в ДВЗ застосовують оливу більш високої групи експлуатації, ніж необхідно, а також скорочення строків заміни, якщо застосовують оливу більш низької групи експлуатації.

Виходячи з отриманого результату, можна зробити висновок, що теоретичний розрахунок показав значення 106 732 км, а паспортні дані 100 000 км, що складає похибку 6,31 %.

Отже, можна зробити висновок, що отримана математична залежність для підбирання моторних олив (1), а також залежність для визначення часу експлуатації (4) і остаточна формула для розрахунку часу експлуатації (5) є достовірними.

Зараз автори статті збирають експериментальний матеріал для уточнення залежності (3). Залежність (3) буде побудована за результатами польових випробувань різних типів машин, що дасть змогу отримати узагальнений матеріал, як цього вимагає критеріальний підхід.

Список використаних джерел

1. Караулов А. К., Худолий Н. Н. Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение: справочник. Киев: Журнал «Радуга», 2000. 436с.
2. Gołębiowski W., Krakowski R. & Zajac G. Degradation of anti-wear additives and tribological properties of engine oils at extended oil change intervals in city buses. *Sci Rep.* 15. 27238. (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12480-y>.
3. Sejkorová Marie, Hurtová Ivana, Glos Josef, Pokorný Jan. Definition of a Motor Oil Change Interval for High-Volume Diesel Engines Based on its Current Characteristics Assessment. April 2017. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 65(2):481-490. DOI:10.11118/actaun201765020481, LicenseCC BY-NC-ND 4.0.
4. Smigins R., Amatnieks K., Birkavs A., Górski K., Kryštopta S. Studies on Engine Oil Degradation Characteristics in a Field Test with Passenger Cars. *Energies.* 2023. 16(24). 7955. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16247955>.
5. Onouchi H., Tanaka I., Elliott I., Ketterer N. Understanding degradation of engine oil additives and its effect on abnormal combustion in a gasoline engine (SAE Technical Paper 2023-32-0035) *SAE Technical Paper.* 2023-32-0035. DOI: <https://doi.org/10.4271/2023-32-0035>.
6. Change in Performance of Engine Oils with Degradation Inoue, Kiyoshi & Yamanaka, Yousuke. SAE Technical Paper 902122, 1990. DOI: <https://doi.org/10.4271/902122>.
7. Al Sheikh Omar A., Motamen Salehi F., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot *Tribology International.* 160 (2021). 107054. DOI : <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/176026/>.
8. Lacey P., Gunsell S., Ferner M., Pozebanchuk A. et al. Effect of Oil Drain Interval on Crankcase Lubricant Quality. *SAE Technical Paper.* 2003-01-1957, 2003. DOI: <https://doi.org/10.4271/2003-01-1957>.
9. Асташкевич Б. М. Износостойкость и прочность деталей цилиндропоршневой группы транспортных двигателей. *Вестник машиностроения.* 1997. № 10. С. 8 – 11.

10. Бажинов А. В. Прогнозирование остаточного ресурса автомобильного двигателя: монография. Харків: ХДАДТУ, 2001. 95 с.

11. Войтов В. А., Левченко А. В. Интегральный критерий оценки трибологических свойств смазочных материалов на четырехшариковой машине. *Трение и износ*. 2001. № 4. С. 441-446.

12. Hong S-H. & Jang E.K. (2023). Varnish Formation and Removal in Lubrication Systems: A Review. *Materials*. 16(10). 3737. <https://doi.org/10.3390/ma16103737>.

13. ЦТ – 0060. Інструкція з використання мастильних матеріалів на тяговому рухомому складі залізниць України. Київ: 2003. 54 с.

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Mazepa, PhD (Tech.) H. Afanasov, postgraduate student Y. Orliuk, postgraduate student T. Tryfonov

CRITERIA-BASED APPROACH FOR EVALUATING CHANGES IN THE PROPERTIES OF MOTOR OILS DURING OPERATION AND DETERMINING THEIR REPLACEMENT INTERVALS

Abstract. This article presents a novel analytical method for assessing the degradation of motor oil performance during the operation of internal combustion engines (ICEs), based on a criterial approach. The research introduces two dimensionless criteria — π_m and π_i — that comprehensively reflect both the change in the oil's functional properties and the impact of key operating factors such as engine load, fuel quality, lubrication system volume, oil consumption, and additive depletion over time.

The π_m criterion integrates tribological, chemical, and rheological indicators of oil performance, including anti-wear and anti-seizure characteristics, alkalinity (neutralization capacity), viscosity, and oxidative stability. It reflects the capacity of the oil to maintain protective and lubricating properties under thermal and mechanical stress conditions. The π_i criterion, in turn, incorporates sulfur content in fuel, engine power density, oil change intervals, and the volume of oil replenishment during operation, which directly affect the rate of additive depletion and oil aging processes. These criteria allow not only for real-time assessment of oil degradation but also for forecasting the optimal oil replacement period depending on the operational conditions and oil group classification (according to API standards or national regulations). This provides a unified and scientifically grounded tool for evaluating oil condition across a broad range of ICE types, designs, and operating modes.

A key outcome of the study is the derived functional dependence $\pi_m = f(\pi_i)$, which enables the calculation of oil change intervals based on operating

similarity rather than just mileage or engine hours. This approach enhances decision-making in maintenance planning by considering real service conditions. The proposed approach takes into account both the initial oil quality and the dynamic changes occurring during engine operation, which improves reliability, durability, and economic efficiency in vehicle and machinery maintenance systems.

Currently, experimental data is being collected from field tests of various engine types to refine the proposed dependency and to develop a generalized empirical model that can be applied across different service conditions and engine configurations. The criterial methodology developed in this study addresses the need for more objective and comprehensive assessment of motor oil service life, moving beyond traditional mileage-based approaches.

Keywords: engine oil, similarity criterion, criterion approach, internal combustion engine, operation, replacement intervals, oil properties.

Воронін Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-844,3-3222.

Тел.: +38(095)500-81-59.

E-mail:

voronin.sergey@ukr.net.

Мазепа Віталій Олександрович, канд. техн. наук, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-8617-5015. Тел.: +38(050)703-32-36. E-mail:

mazepavitalii@gmail.com.

Афанасов Георгій Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Тел.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.

Орлюк Юрій Костянтинів, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Тел.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Трифонов Тарас Вікторович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Тел.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Mazepa Vitalii, PhD (Tech.), doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0009-8617-5015. Tel.: +38(050)703-32-36. E-mail: mazepavitalii@gmail.com.

Afanasov Heorhii, PhD (Tech.), associate professor, doctoral student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0003-1730-1785. Tel.: +38(066)452-40-39. E-mail: 0674274770@kart.edu.ua.

Orliuk Yurii, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0001-1004-490X. Tel.: +38(067)923-14-85. E-mail: orlyuk525@gmail.com.

Tryfonov Taras, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Tel.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

ПОДРИГАЛО М. А., доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

АБРАМОВ Д. В., доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

КОРОБКО А. І., доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет



Цифрова трансформація міжнародних автомобільних вантажних перевезень, сучасні виклики, бар'єри та перспективи розвитку

Анотація. У статті досліджено сучасний стан і перспективи цифрової трансформації міжнародних автомобільних вантажних перевезень. Розглянуто основні технології, такі як системи управління транспортом (TMS), Інтернет речей (IoT), блокчейн, електронна товарно-транспортна накладна (e-CMR) і цифрові вантажні платформи. Показано їхній вплив на підвищення прозорості, ефективності та стійкості ланцюгів постачання, а також висвітлено бар'єри впровадження і шляхи їх подолання. Особливу увагу приділено проблемам фрагментації цифрових рішень і відсутності інтегрованих екосистем. Зроблено висновок, що стратегічний розвиток галузі можливий лише через комплексну інтеграцію цифрових технологій і формування єдиного цифрового простору в логістиці.

Ключові слова: міжнародні автомобільні перевезення, диджиталізація, цифрова трансформація, вантаж, автомобіль, ланцюг постачання.

Постанова проблеми.

Галузь міжнародних автоперевезень є основою глобальної торгівлі, але сьогодні вона переживає період трансформації через множинні виклики. Постійна нестабільність попиту і пропозиції на ринку призводить до коливань цін на послуги. Крім того, компанії стикаються зі зростанням витрат на паливо та робочу силу, посиленням екологічних норм. У таких умовах клієнти вимагають не тільки швидкого та надійного доставлення, а й можливості відстежувати свій вантаж на всіх етапах маршруту.

Традиційні методи організації перевезень, що переважно покладені на паперовий документообіг, телефонні дзвінки та розрізнені таблиці, виявляються неефективними за таких викликів. Вони породжують фрагментацію інформаційних потоків, відсутність прозорості ланцюга постачання в реальному часі та високу ймовірність людських помилок.

У цьому контексті диджиталізація – впровадження цифрових технологій – перестає бути опцією і стає стратегічним імперативом для виживання та розвитку галузі. Технології, такі як системи управління транспортом, Інтернет речей, блокчейн і цифрові логістичні платформи,

пропонують потужний інструментарій для автоматизації рутинних завдань, оптимізації логістичних процесів і кардинального підвищення прозорості всього ланцюга постачання.

Однак, незважаючи на очевидний потенціал, процес цифрової трансформації в секторі міжнародних автомобільних перевезень є вкрай нерівномірним і стикається зі значними бар'єрами. Спостерігають суттєвий науковий і практичний розрив між можливостями, які пропонують окремі технологічні рішення, і створенням інтегрованих, синергетичних цифрових екосистем, здатних забезпечити безперебійний обмін даними між усіма учасниками перевізного процесу. Конкуренція в галузі поступово зміщується від простого ціноутворення до надання комплексних, ціннісно орієнтованих послуг. Хоча ефективність витрат залишається критично важливою, основними диференціаторами та драйверами цифрової трансформації стають послуги з доданою вартістю: надання можливості відстеження вантажу в реальному часі, прогнозування затримок і звітність про викиди вуглецю. Це свідчить про фундаментальні зміни у сфері логістики, логістичні провайдери більше не конкурують виключно за ціною за

кілометр, а змагаються у своїй здатності надавати клієнтам аналітику на основі даних, підвищуючи стійкість їхніх ланцюгів постачання та допомагають у досягненні корпоративних цілей сталого розвитку.

Тож диджиталізація – це не просто інструмент для підвищення ефективності, а стратегічний важіль для переходу від надання стандартизованої транспортної послуги (переміщення вантажу) до створення комплексної послуги (переміщення з високою доданою вартістю (управління прозорим, прогнозованим і стійким ланцюгом постачання)).

Отже, постає наукова проблема, що полягає в недостатній систематизації знань про комплексний вплив диджиталізації на міжнародні автомобільні перевезення, а також у відсутності цілісного розуміння бар'єрів і факторів успіху на шляху до створення єдиного цифрового простору в логістиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасний науковий дискурс однозначно визначає диджиталізацію як головний фактор трансформації галузі міжнародних автомобільних вантажних перевезень. Дослідники доходять висновку, що інтеграція цифрових технологій, оцифрованих інформаційних потоків і систем на основі штучного інтелекту створює фундаментальні передумови для підвищення операційної ефективності, оптимізації управлінських рішень і скорочення витрат. Разом із тим у роботах [1, 2] зазначено, що процес цифрової трансформації є гетерогенним, темпи впровадження інновацій значно відрізняються залежно від розміру компанії, регіональних особливостей і специфіки ланцюгів поставок. Незважаючи на це, потенційна потреба в цифрових технологіях залишається високою, оскільки їх впровадження є прямою передумовою для підвищення економічної стійкості та конкурентоспроможності транспортних підприємств.

У роботах [3, 4] акцентовано на вплив Інтернету речей і блокчейну відносно прозорості ланцюгів постачання, автори доводять що IoT-сенсори дають змогу збирати дані про місцезнаходження, температуру, вологість та інші параметри вантажу в реальному часі, а технологія блокчейн забезпечує незмінність і захищеність цих даних, створюючи єдине джерело для всіх учасників.

Технологія Інтернету речей (IoT) відкриває можливості для збору гранулярних даних у режимі реального часу, що кардинально підвищує прозорість і керованість ланцюга поставок. Дослідження [5-7] доводять, що оснащення транспортних засобів і контейнерів датчиками дає змогу відстежувати не лише геолокацію, а й критичні параметри вантажу (температура, вологість, вібрація) і стан автомобіля (витрати пального, тиск у шинах). Ця інформація є

основою для систем предиктивного обслуговування та проактивного реагування на інциденти. Згенеровані за допомогою IoT масиви даних (Big Data) стають основою для застосування штучного інтелекту (ШІ) і машинного навчання (МН). У роботі [8] показано, що алгоритми ШІ дають змогу перейти від простого моніторингу до інтелектуального управління. Основні напрями застосування ШІ в міжнародних перевезеннях включають динамічну оптимізацію маршрутів з урахуванням трафіку та погодних умов, прогнозування попиту, автоматизацію обробки супровідних документів і виявлення шахрайства.

Наукові дослідження, присвячені практичним аспектам впровадження електронної товарно-транспортної накладної (e-CMR), аналізують переваги переходу на електронний документообіг, зокрема скорочення адміністративних витрат, прискорення митних процедур і зменшення ризику шахрайства. Водночас наголошено про проблеми повільної ратифікації відповідного протоколу до Конвенції КДПВ країнами-учасницями та необхідність гармонізації законодавства [9].

Центральним елементом сучасної цифрової екосистеми в логістиці є системи управління транспортом (Transportation Management Systems, TMS). У дослідженні [10] TMS розглянуто, як «цифрове ядро» або «нервова система» логістичної компанії дає змогу інтегрувати і управляти всіма етапами перевізного процесу. Сучасні TMS здатні не лише планувати оптимальні маршрути з урахуванням трафіку, обмежень на рух і вартості пального, але й прогнозувати попит, керувати парком транспортних засобів і бути інтегрованими із системами клієнтів (ERP, WMS) [11].

Цифрові вантажні платформи аналізують як трансформаційну технологію, що докорінно змінює традиційну модель експедирування. Ці платформи, функціонуючи як маркетплейси, з'єднують вантажовідправників і перевізників, усуваючи посередників і підвищуючи ефективність ринку [12]. Завдяки використанню алгоритмів ШІ для вибору оптимального перевізника, динамічному ціноутворенню та миттєвому бронюванню DFP значно скорочують витрати і час на пошук транспорту, їхній вплив виходить за межі операційної ефективності, стимулюючи трансформацію бізнес-моделей і сприяючи появі нових гравців на ринку, таких як цифрові експедитори.

Цифрова трансформація, що базована на інтеграції кіберфізичних систем, автоматизації та застосуванні штучного інтелекту, є каталізатором фундаментальних змін у секторі міжнародних автомобільних вантажних перевезень. Вона створює передумови не просто для поетапної оптимізації, а фундаментальної перебудови операційної діяльності,

відкриваючи можливості для значного підвищення ефективності, оптимізації використання активів і скорочення витрат. Основні переваги:

- прозорість і керованість, забезпечення наскрізної видимості ланцюга поставок у реальному часі;
- прогнозна аналітика, можливість прогнозувати час прибуття, виявляти потенційні збої та превентивно обслуговувати транспортні засоби;
- підвищення стійкості, здатність швидше реагувати на непередбачувані події (зміни погоди, затори, митні затримки) і переробляти маршрути динамічно.

Водночас значна частина публікацій підкреслює, що, попри очевидні переваги, процес диджиталізації в галузі автомобільних перевезень відбувається повільно та нерівномірно. Причинами цього є високі початкові інвестиції, нестача кваліфікованих кадрів, проблеми сумісності різних систем і консервативність багатьох гравців ринку.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значний обсяг досліджень, присвячених окремим аспектам диджиталізації в логістиці, залишається низка не вирішених проблем, які потребують глибшого наукового аналізу. Ці проблеми є системними і стримують повноцінну цифрову трансформацію галузі міжнародних автомобільних перевезень.

По-перше, проблема фрагментації та інтеоперабельності. Більшість досліджень успішно демонструють переваги окремих технологій, таких як TMS або цифрові платформи, але приділяють недостатньо уваги викликам, що виникають зі спробою їх інтегрувати. Сучасний ринок цифрових рішень є вкрай фрагментованим. Кожен учасник ланцюга постачання – вантажовідправник, перевізник, експедитор, склад, митний брокер – часто використовує власні, несумісні між собою системи. Це створює так звані «цифрові острови», між якими ускладнений або неможливий автоматичний обмін даними.

По-друге, недостатній рівень дослідження синергетичного ефекту від комплексної інтеграції технологій. Наукові праці часто розглядають TMS, IoT і блокчейн як окремі, ізольовані рішення. Проте залишається не вирішеним питання кількісного та якісного оцінювання синергетичного ефекту, що виникає з поєднанням їх у єдину екосистему.

Визначення мети та завдання дослідження.

Мета роботи полягає в комплексному дослідженні впливу диджиталізації на організаційні, операційні і стратегічні аспекти міжнародних автомобільних вантажних перевезень, виявленні

основних факторів успіху та системних бар'єрів на шляху цифрової трансформації галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Диджиталізація має глибокий і багатогранний вплив на галузь міжнародних автомобільних вантажних перевезень, трансформуючи її від операційної ефективності до фундаментальних бізнес-моделей. Цей вплив можна проаналізувати за трьома основними напрямками: підвищення прозорості та керованості, автоматизація та оптимізація процесів, трансформація бізнес-моделей.

Підвищення прозорості та керованості. Цифрові технології ліквідують інформаційну асиметрію, створюючи єдиний інформаційний простір, доступний усім авторизованим учасникам логістичного процесу. Технологічною основою цього є інтеграція телематичних систем (GPS-трекінг) із централізованими цифровими платформами. Постійний потік даних про місцезнаходження, швидкість і стан вантажу дає змогу застосовувати алгоритми машинного навчання для вирішення завдань прогнозування, зокрема точного розрахунку очікуваного часу прибуття. Це забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління, оперативно ідентифікуючи відхилення від графіка і мінімізуючи їхні наслідки, усуваючи необхідність у неавтоматизованому контролі.

Автоматизація та оптимізація процесів. Диджиталізація сприяє автоматизації рутинних операцій, що мінімізує вплив людського фактора та підвищує продуктивність. Сучасні системи управління транспортом (TMS) використовують алгоритми штучного інтелекту для комплексної оптимізації маршрутів, урахування не лише статичні, а й динамічні змінні: трафік, погодні умови, вартість ресурсів і регуляторні обмеження (включно з екологічними нормами). Автоматизують також процеси управління замовленнями через цифрові транспортні біржі. Основним елементом є перехід до електронного документообігу, зокрема впровадження e-CMR, що кардинально прискорює операційні та фінансові цикли завдяки миттєвому отриманню підтвердження доставлення (POD) та ініціації розрахунків.

Трансформація бізнес-моделей. Вплив диджиталізації виходить за межі операційної ефективності, стимулюючи парадигматичне відхилення від традиційної моделі надання транспортних послуг до концепції «Логістика як послуга». У межах цієї моделі конкурентною перевагою стає не фізичне переміщення вантажу, а надання інформаційно-аналітичних сервісів, прогнозованості та контролю над ланцюгом постачання. Логістичні провайдери трансформуються в технологічні компанії. Яскравим прикладом є поява цифрових експедиторів (наприклад Flexport), чия бізнес-модель із самого початку

базована на інтегрованих технологічних платформах, що забезпечують вищий рівень сервісу та прозорості порівняно з традиційними аналоговими підходами.

Більш того, розглянуті цифрові технології є технологічним фундаментом для розвитку логістичного провайдингу вищих рівнів – 4PL і 5PL. Провайдери рівня 4PL виступають інтеграторами, що управляють усім ланцюгом постачання клієнта, включаючи активи і технології сторонніх перевізників. Саме TMS, цифрові платформи та аналітика на основі Big Data дають змогу їм ефективно координувати складні логістичні мережі. Концепція 5PL йде ще далі, фокусуючись на управлінні мережами постачання за допомогою штучного інтелекту та інших передових технологій. Отже, цифровізація не просто модернізує наявні бізнес-моделі, а і створює умови для переходу до стратегічного аутсорсингу логістики, де провайдер пропонує не перевезення, а комплексне інжинірингове рішення для всього ланцюга постачання.

Для глибокого розуміння цифрової трансформації необхідно детально проаналізувати основні

технології, що лежать в її основі, а також обґрунтувати необхідність їх комплексного, синергетичного застосування. Аналіз переваг і бар'єрів окремих технологій чітко показує, що максимальної цінності та ефективності досягають не від ізольованого використання їх, а від глибокої інтеграції та синергії (таблиця). Окремі технології вирішують лише частину загальної проблеми, тоді як комплексний підхід дає змогу створити посправжньому трансформуючу цифрову екосистему.

Матриця переваг і бар'єрів впровадження основних цифрових технологій

Технологія	Основні переваги	Основні бар'єри
TMS	Операційні: оптимізація маршрутів, автоматизація планування, підвищення рівня сервісу. Фінансові: зниження витрат на паливо, зменшення адміністративних витрат. Стратегічні: прискорення ухвалення рішень на основі даних	Технологічні: складність інтеграції з ERP/WMS. Організаційні: опір змінам, нестача кваліфікованих кадрів. Фінансові: висока вартість впровадження та ліцензій. Регуляторні: відсутні
IoT	Операційні: моніторинг стану вантажу в реальному часі, підвищення безпеки, превентивне обслуговування. Фінансові: зменшення втрат від псування/крадіжки. Стратегічні: нові сервіси на основі даних (наприклад «холодовий ланцюг»)	Технологічні: стандартизація, інтероперабельність, кібербезпека. Організаційні: управління великими обсягами даних. Фінансові: вартість сенсорів та інфраструктури. Регуляторні: питання приватності даних
Блокчейн	Операційні: підвищення довіри, зменшення суперечок, автоматизація розрахунків (смарт-контракти). Фінансові: прискорення фінансових транзакцій. Стратегічні: створення прозорого та незмінного ланцюга постачання	Технологічні: масштабованість, енергоспоживання, незрілість технології. Організаційні: складність для розуміння та впровадження. Фінансові: високі витрати на розробку. Регуляторні: невизначений правовий статус
e-CMR	Операційні: прискорення документообігу, зменшення помилок. Фінансові: значне скорочення адміністративних витрат, прискорення оплати. Стратегічні: підвищення прозорості, екологічність (відмова від паперу)	Технологічні: необхідність сумісних платформ. Організаційні: низька цифрова грамотність, опір змінам. Фінансові: вартість підписки на платформи. Регуляторні: відсутність гармонізованого законодавства між країнами

Наприклад, TMS сама собою є потужним інструментом планування, але її ефективність значно зростає, коли вона працює не зі статичними чи застарілими даними, а отримує інформацію в реальному часі від IoT-сенсорів, встановлених на транспортному засобі та вантажі. Цінність цих даних багаторазово підвищується, якщо їхня достовірність і незмінність гарантовані записом у блокчейн-реєстрі. А весь цей цифровий процес стає юридично значущим та операційно завершеним завдяки використанню стандартизованого електронного документа, такого як e-CMR.

Майбутнє міжнародної логістики лежить у площині створення таких інтегрованих цифрових екосистем, де дані безперешкодно та безпечно рухаються між усіма учасниками – вантажовідправником, перевізником, експедитором, складом, митницею та кінцевим отримувачем. Це створює передумови для формування єдиного цифрового середовища, нівелювання інформаційної асиметрії та переходу до прогностичної моделі управління логістичними процесами, заснованої на принципах превентивності та випередження.

Висновки.

У статті обґрунтовано, що цифровізація є визначальним фактором підвищення конкурентоспроможності міжнародних автомобільних вантажних перевезень. Використання сучасних технологій, зокрема TMS, IoT, блокчейну, e-CMR і цифрових вантажних платформ, забезпечує прозорість процесів, зменшує ймовірність помилок у документації, скорочує витрати і підвищує надійність транспортування.

Можна зробити висновок, що цифрові рішення дають змогу не лише оптимізувати операційну діяльність перевізників, а і формують умови для появи нових бізнес-моделей, таких як цифрові експедитори та платформи для автоматизованого вибору перевізників. Це сприяє зниженню витрат і розширює доступ малих і середніх підприємств до міжнародних ринків перевезень. Якісне оцінювання синергетичного ефекту полягає в переході від простої оптимізації до створення інтелектуальної логістичної системи, щоб отримувати дані в реальному часі від IoT-сенсорів і використовувати ШІ для динамічного корегування маршрутів, перетворюється з інструмента планування на проактивний механізм управління.

Разом із тим виявлено низку бар'єрів: висока вартість впровадження, складність інтеграції різних цифрових систем, відсутність уніфікованих міжнародних стандартів обміну даними та питання кібербезпеки. Додатковим викликом є нерівномірність цифрової трансформації, швидша адаптація інновацій великими

компаніями, тоді як малі компанії часто відстають через обмежені ресурси.

Отже, перспективний розвиток міжнародних автомобільних перевезень залежить від комплексної інтеграції цифрових технологій у єдині логістичні екосистеми для забезпечення наскрізної цифрової взаємодії між усіма учасниками ринку. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оцінювання економічних та екологічних ефектів цифровізації, розроблення міжнародних стандартів цифрових сервісів і створення моделей державно-приватного партнерства для підтримки впровадження цифрових рішень у малому та середньому бізнесі.

Список використаних джерел

1. Clemente-Almendros J. A., Popescu-Nicoara D., Pastor-Sanz I. Digital transformation in SMEs: Understanding its determinants and size heterogeneity. *Technology in Society*. 2024. P. 102483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102483>.
2. Bossong P., Reinhardt A., Elbert R. Adoption drivers and barriers of digital freight transport platforms—An intermodal case study. *Electronic Markets*. 2025. Vol. 35, No. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s12525-025-00780-0>.
3. Hofmann E., Rüscher M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*. 2017. Vol. 89. P. 23–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>.
4. Tam F. Y. Blockchain technology adoption in the fashion supply chain: a review on the practices of fashion brands. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/jgoss-01-2025-0003>.
5. Cargo Monitoring and Tracking Based on IoT / V. Mekala et al. 2023 *14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, 6–8 July* 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/icccnt56998.2023.10308117>.
6. Protopappas L., Bechtsis D., Tsotsolas N. IoT Services for Monitoring Food Supply Chains. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 13. P. 7602. URL: <https://doi.org/10.3390/app15137602>.
7. Sevidova V., Salnikov Y., Kalinichenko O. APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE DELIVERY OF CARGO IN INTERNATIONAL TRAFFIC. *Municipal economy of cities*. 2023. Vol. 3, No. 177. P. 200–205. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-3-177-200-205>.
8. Shaping the Future of Freight Logistics: Use Cases of Artificial Intelligence / M. J. du Plessis et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 4. P. 1355. URL: <https://doi.org/10.3390/su17041355>.

9. Poliak M., Tomicová J. Transport document in road freight transport - paper versus electronic consignment note CMR. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2021. Vol. 90, No. 4. P. 45–58. URL: <https://doi.org/10.14669/am.vol90.art4>.

10. Ranjangaonkar R. TMS in Connected Systems Enhancing Logistics Efficiency and Integration. *International Journal of Computer Trends and Technology*. 2024. Vol. 72, No. 9. P. 152–156. URL: <https://doi.org/10.14445/22312803/ijctt-v72i9p124>.

11. Alheadary W. G. The impacts of the internet of things and artificial intelligence on logistics in supply chain management. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 161–168. URL: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2024.01.019>.

12. Bossong P., Reinhardt A., Elbert R. Digital platforms in intermodal freight transport: an analysis of emerging business models and their future dynamics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-02-2024-0072>.

Подригало Михайло Абович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-1624-5219. Тел.: +380503011658. E-mail: pmikhab@gmail.com.

Абрамов Дмитрій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-1846-1991. E-mail: varan_mail@ukr.net.

Коробко Андрій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-6618-7790. E-mail: ak82andrey@gmail.com.

Podrigalo Mikhail, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-1624-5219. Tel.: +380503011658. E-mail: pmikhab@gmail.com.

Abramov Dmytro, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-1846-1991. E-mail: varan_mail@ukr.net.

Korobko Andrey, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine

maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-6618-7790. E-mail: ak82andrey@gmail.com.

Digital transformation of international road freight transport, modern

challenges, barriers and development prospects

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the current state and prospects of the digital transformation in international road freight transport, which is now a key condition for ensuring the efficiency of global supply chains. It is substantiated that the intensive development of digital technologies drives the transition from traditional models of transport operations management to integrated, intelligent systems that combine the capabilities of predictive analytics, automation, and end-to-end transparency.

The role of TMS as the «digital core» of logistics companies is examined, which allows for the integration of route planning, vehicle monitoring, cargo management, and document flow processes into a single information environment. It is shown that the IoT technology significantly expands the possibilities for real-time data collection – from tracking geolocation to monitoring critical cargo parameters and the technical condition of vehicles. The resulting large datasets form the basis for using artificial intelligence and machine learning algorithms, which provide dynamic route optimization, demand forecasting, automation of document processing, and fraud detection.

Particular attention is paid to Digital Freight Platforms, which act as a disruptive technology, transforming the traditional freight forwarding model. Their operation as marketplaces that directly connect shippers and carriers contributes to reducing transaction costs, shortening the time needed to find transport, and creating new business models, including the emergence of digital forwarders. At the same time, barriers to digitalization have been identified: the high cost of implementation, the complexity of integrating heterogeneous IT systems, the lack of international data exchange standards, and the uneven pace of innovation adoption depending on the size of companies and regional specifics.

It is concluded that the development prospects of international road freight transport are directly linked to the formation of end-to-end digital ecosystems that will ensure the comprehensive integration of technologies and contribute to increasing the transparency, economic stability, and environmental safety of the industry.

Keywords: international road transport, digitalization, digital transformation, cargo, car, supply chain.

UDC 004.93

DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i3.351322>

BARKOVSKA O.Y.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics

NECHTAYLO O.V.

Master's student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics

SERDECHNYI V.S.

PhD student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics

BATURIN O.O.

Master's student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics



Software Application for Assisting Visually Impaired Persons at Public Transport Stops

Abstract. *The paper addresses the urgent problem of social adaptation of visually impaired individuals in Ukraine, where the number of people with visual disabilities has significantly increased due to the consequences of military actions. The research presents the development of an intelligent software application designed to assist visually impaired persons in independent orientation at public transport stops. The system integrates deep learning, computer vision, and text-to-speech synthesis to automatically detect public transport vehicles (bus, trolleybus, tram) and recognize their route numbers in real time. The YOLOv8 model was employed for object detection, Tesseract OCR for route number recognition, and pyttsx3 for offline speech synthesis. Data preprocessing included dataset annotation, augmentation with simulated weather conditions, and the use of OpenCV-based filters to enhance OCR accuracy. Testing under both real and simulated conditions (fog, rain, snow, blur, low lighting) demonstrated consistently high detection accuracy (100%) and acceptable classification performance, though recognition robustness decreased under low-visibility scenarios. The results confirm the practical value of the proposed approach, while further improvements will focus on expanding real-world datasets, enhancing preprocessing methods, and integrating stronger deep learning models. The system holds promise as a foundation for wearable assistive technologies aimed at improving inclusivity and mobility for visually impaired users in urban environments.*

Keywords: *vision impairment; computer vision; YOLOv8; OCR; Tesseract; synthesis; object detection; assistive technologies; deep learning*

Introduction

The relevance of the problem of rehabilitation and social adaptation of people with visual impairments in Ukraine has significantly increased due to the consequences of military actions, which lead to damage to the organs of vision in both the military and the civilian population, requiring constant attention to technologies that help people adapt and integrate into society [1, 2]. According to the results of studies conducted in recent years in Ukraine, there were 19,000 citizens with visual impairments in 2023.

In 2021, this number was 17,000, which indicates an increase in the number of people with visual impairments [3, 4].

Large cities usually have an extensive and extensive system of urban roads for motor vehicles (intersections, bridges, tunnels, highways). There are various solutions for crossing all these road elements, such as traffic lights, underground/overground crossings, and pedestrian crossings. It should be noted that most of these measures are focused on visual identification of the road crossing location.

© BARKOVSKA O.Y., NECHTAYLO O.V., SERDECHNYI V.S., BATURIN O.O., 2025

One of the busiest streets in Kharkiv, Prospekt Nauki, has six intersections per kilometre, only three of which are regulated but do not have audible crossing signals (figure 1).



Fig. 1. Number of intersections per 1 km on Nauky Avenue

This shows that the conditions of the modern urban environment remain insufficiently inclusive, as state resources are mainly directed towards the needs of the defence sector. The issue of orientation at public transport stops, which is a key element of infrastructure for visually impaired people who are unable to use private transport, is particularly complex.

Traditional means of assistance, such as guide dogs [5], do not provide complete autonomy, as they are unable to provide a person with information about the type of vehicle and route number. One promising approach to solving this problem is the use of computer vision technologies in combination with deep learning algorithms and speech synthesis systems. Such approaches allow for automatic recognition of vehicles and route numbers in real time and broadcast the results in the form of voice prompts. Some technological tools have already been created to help the visually impaired, but they have their drawbacks, which are described in the next section of this paper.

Therefore, the development of a proprietary software application using these technologies can significantly increase the level of inclusion in urban spaces, promote the principle of accessibility, and provide

visually impaired people with more comfortable and safer conditions for travelling by public transport.

Analysis of recent studies and publications

Modern approaches to solving the problem of object detection in urban environments show a tendency to move from multi-step cascading architectures to single-step fully convolutional models. Traditional architectures, such as R-CNN, Fast R-CNN, and Faster R-CNN, have achieved a significant breakthrough in accuracy by integrating feature extraction and region generation mechanisms through regional proposals (RPN) [6]. However, their use in real-time systems, especially on resource-constrained embedded devices, remains problematic due to their significant computational complexity.

In the context of mobile or wearable devices, single-stage detectors such as SSD and YOLO family models are preferred. In particular, YOLOv8 provides high throughput and real-time performance by directly predicting classes and window coordinates in parallel [7]. This property makes it suitable for use in wearable or autonomous systems to support people with visual impairments.

In the sub-task of recognising public transport route numbers, two paradigms remain relevant: classical optical character recognition (OCR) methods, such as Tesseract, and deep neural networks focused on scene text recognition [8–9]. The Tesseract system, described by Smith at the ICDAR conference (2007), involves step-by-step segmentation, binarisation, character classification and labelling language. This makes it effective for processing clearly structured signs and labels with a fixed font.

In contrast, modern approaches based on CRNN (Convolutional Recurrent Neural Network) in combination with the CTC (Connectionist Temporal Classification) mechanism allow direct sequential text recognition without prior character segmentation. This significantly improves accuracy in conditions of perspective distortion, motion, or low video stream quality. The CRNN architecture combines convolutional layers for feature extraction, recurrent layers (usually BiLSTM) for sequence modelling, and a transcription layer, allowing for flexible processing of variable text structures in a frame.

The choice between Tesseract and neural network OCR models in systems with limited computing budgets is often driven by a trade-off between accuracy and resource consumption. In stable conditions, Tesseract demonstrates low latency and ease of integration, while

CRNN provides higher resistance to noise and distortions but requires a more powerful computing platform.

Stable video stream transmission remains a key factor in system reliability. To achieve this, video data is pre-processed and buffered using the OpenCV library, which allows you to adjust the frame rate, perform size alignment, focus, and apply filters necessary to improve the quality of input images. In practice, this is implemented through the VideoCapture API (Python/C++), which is currently the standard for video integration in real-time computer vision systems.

The final stage is the vocalisation of the results. In accordance with the requirements for the autonomy of systems for visually impaired people, it is recommended to use offline speech synthesis engines, in particular pyttsx3, which supports work with system TTS engines. This approach minimises the delay in starting synthesis and does not require a stable internet connection, which is critical for outdoor use. Cloud-based TTS services, such as gTTS, although they provide higher voice quality, are inferior to offline options in terms of speed and reliability in field conditions [10-11].

The above shows that a number of technological tools have been developed to support people with visual impairments. For example, GPS-based mobile applications (Seeing Eye GPS, LazarilloApp) provide navigation in open spaces, but they have limited accuracy indoors and in the absence of a stable satellite signal. Other solutions are based on ultrasonic sensor technology that signals obstacles (e.g., SmartCane), but such devices often do not take context into account (e.g., moving objects) and require additional user training. Computer systems using computer vision (e.g., Microsoft Seeing AI) are also becoming more widespread, providing object and text recognition, but they require significant computing resources and a constant internet connection, which reduces their practicality.

Work [12] is a systematic review of modern technologies designed to support individuals with visual impairments when navigating both indoor and outdoor environments. The authors reviewed 191 publications from 2011 to 2020, classifying approaches, hardware, and software solutions. Particular attention is paid to electronic canes, robotic assistants, systems based on GPS, RFID, Kinect, ultrasonic and infrared sensors. The analysis showed that the development of traditional electronic aids is gradually shifting towards the use of IoT solutions, computer vision algorithms and multimodal technologies.

However, the results have several limitations. The study covers only six major scientific libraries, which may lead to the omission of important works. Only the decade 2011–2020 was considered, so earlier or more recent developments were not taken into account. Most of the systems analyzed were tested under controlled

conditions, often with a small number of users, and without a sufficient assessment of energy consumption, operating time, or user acceptance. Insufficient attention has also been paid to algorithms for selecting the shortest route and integration into urban infrastructure.

Work [13] presents a system of "smart glasses" for people with visual impairments, combining image enhancement in low light, DETR-based object recognition, tactile feedback, and text-to-speech. Experiments on the Low-Light and ExDark datasets showed competitive results in low-light conditions. However, the system has limitations, including reduced accuracy for small objects, dependence on a client-server architecture, and incomplete testing in real-world conditions.

Article [14] presents the ARIANNA+ system, which is based on augmented reality and computer vision technologies and is designed to support the mobility of people with visual impairments. The system allows you to build virtual routes without the need for physical landmarks, and also provides interaction with the environment through object recognition and access to digital content. Experiments have demonstrated the feasibility of reliable navigation in both indoor and outdoor environments using smartphones, achieving up to 90% accuracy in identifying cultural heritage sites.

Among the limitations of the application, it is worth noting its dependence on the accuracy of ARKit algorithms and the performance of the smartphone's camera, which complicates its use in conditions of sudden lighting changes or rapid movements. Navigation accuracy decreases when the device is positioned incorrectly, and the object recognition process relies on a limited amount of data collected in a specific cultural context, which raises concerns about the scalability of the solution. In addition, the tests were conducted under controlled conditions, and there is a lack of extensive testing involving users with visual impairments, which limits the practical assessment of effectiveness.

Thesis [15] describes a "smart cane" system that integrates Raspberry Pi 4B, a camera, an ultrasonic sensor, and Arduino. The system combines visual recognition (Viola–Jones, TensorFlow Object Detection) with distance measurement to obstacles and audible warning via a buzzer. The results showed an accuracy of approximately 91%, positioning the device as a compact and inexpensive solution for everyday use by people with visual impairments.

The following limitations are inherent in the development. First, the algorithms (in particular, Viola–Jones) remain sensitive to noise and camera vibrations, which reduces accuracy for small objects and in low-quality images. Second, the system relies primarily on simple computer vision methods, which are inferior to modern neural models in terms of stability and scalability.

Third, the tests were conducted mostly in controlled scenarios, which calls into question the effectiveness of the device in real urban environments with dynamic obstacles.

Paper [16] presents a mobile assistance system for visually impaired people that combines an OAK-D sensor with stereo vision, edge AI accelerators (NCS2) and optimised models (OpenVINO, TensorFlow Lite) for object detection, recognition of road signs, traffic lights, crosswalks, and changes in surface elevation. The system is compact, has relatively low power consumption, and a convenient voice interface, and its testing has shown promise in real urban environments.

However, the work has certain limitations. The use of lightweight models, such as SSD-MobileNet, results in a trade-off between speed and accuracy, with an increased likelihood of false positives and false negatives. Segmentation models operate with significant delays (0.4–2 fps), which complicates their use in real-time and may confuse the distinction between the road and the pavement. An additional challenge is the inability to reliably determine height changes based solely on OAK-D due to its low depth resolution. Therefore, the authors resort to machine learning on RGB and depth images, acknowledging that traditional point cloud processing methods could yield more robust results.

Thus, the review results confirm the feasibility of the selected software configuration for vehicle detection, route number recognition, and real-time voice prompt generation tasks. The use of YOLOv8 as the base detection model, flexible selection of OCR kernels depending on the context, an OpenCV-based video pipeline, and offline TTS provide the necessary balance between performance, accuracy, and affordability for implementation in systems that assist visually impaired users.

Purpose and objectives of the work

The goal of the work is to develop a software application to help visually impaired people independently navigate public transport stops, which provides automatic recognition of the type of transport and route number, as well as the generation of voice prompts for the user.

The following types of input data are required to implement the system:

- images of vehicles taken from a personal device (frames in RGB format);
- labelled datasets containing the coordinates of objects (bounding boxes) for transport types (bus, trolleybus, tram) and route numbers;
- augmented data with simulated weather effects: fog, rain, night, twilight, etc.;

- audio signals broadcast through a speaker in response to recognition.

Therefore, to achieve the set goal, a number of tasks must be performed:

- collection and labelling of data for deep learning of the YOLO model for recognising different types of vehicles and their route numbers;
- augmenting the dataset by simulating low visibility conditions, creating artificial weather conditions (fog, rain, night, etc.) at different times of the day (daylight, dusk, darkness);
- research and implementation of machine learning methods for the task of automated vehicle recognition in real time;
- testing and adaptation of the system in virtual conditions.

Further development of the project involves expanding functionality to work with smart stops (IoT infrastructure), integrating with a mobile application to personalize settings, and utilizing artificial intelligence technologies to adapt the system to different users.

Scientific results obtained. Discussion of results

The study describes the software component of a software-hardware complex designed to support the mobility of people with visual impairments. The hardware part is implemented on the basis of a single-board computer Raspberry Pi 5, to which a Logitech Carl Zeiss Tessar 2.0/3.7 (2 MP) webcam and an external Logitech G Pro X audio card with headphones are connected, providing real-time message playback. Power is supplied by a 10,000 mAh portable battery, which guarantees several hours of autonomous operation. At the same time, it is the software algorithms — image pre-processing, vehicle detection, and route number recognition — that determine the effectiveness of the complex. The efficiency of the system at various stages of its operation is ensured by the YOLOv8 framework, Tesseract, and the pyttsx3 library.

At the first stage of the system's operation, the incoming video stream from the camera is received, as well as accompanying information about the external environment, in particular, the level of illumination and weather conditions. This data is transmitted to the environment analysis module, which, based on the detected conditions, initiates the application of appropriate image pre-processing filters (e.g., contrast correction, noise reduction, visibility improvement in rain or at night).

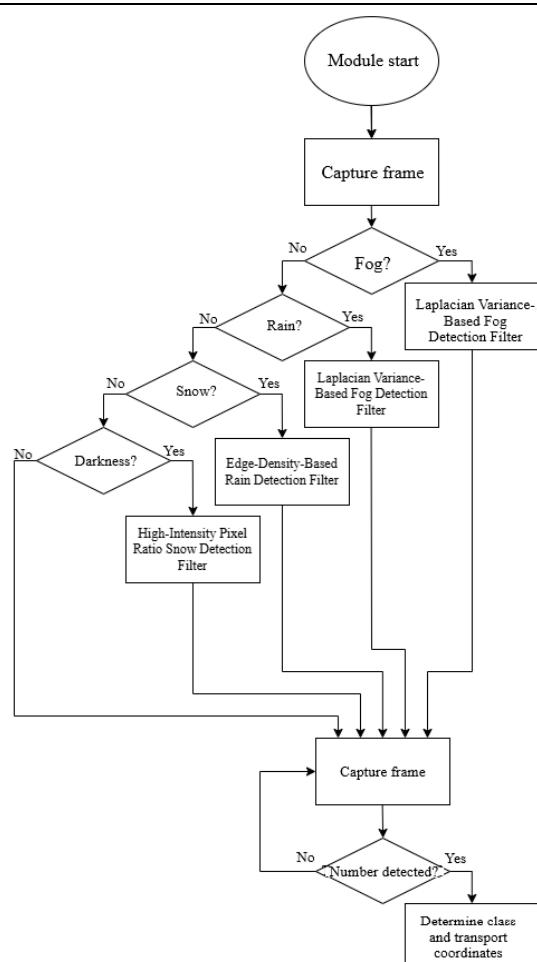


Fig. 2. Block diagram of the transport detection module

The environment analysis module performs a preliminary assessment of the shooting conditions based on the incoming video stream. To do this, it analyses the brightness characteristics of the frame (determining low light or high contrast), assesses the image noise level, and detects artefacts characteristic of rain or fog. Based on these characteristics, the system selects the appropriate pre-processing methods: brightness enhancement (gamma correction, CLAHE) in the dark, noise filtering (bilateral filtering) in the presence of interference. The use of defogging and deraining methods in case of deteriorating weather conditions are further steps necessary for implementation. Thus, the module ensures the operation of the entire system, improving the quality of input data before the object detection stage.

After that, the prepared image is sent to the computer vision module, implemented on the basis of the YOLOv8 architecture, where transport objects are detected. If the vehicle is successfully detected, the system proceeds to localise the area where the route number is located. The selected area is transferred to the optical character recognition (OCR) module, built on the Tesseract library.

If the route number is successfully read, a text message is generated, which is then sent to the speech

synthesis module (pyttsx3) to voice the information received. If the OCR does not recognise the characters correctly, the system generates a voice message indicating only the type of vehicle (e.g. "bus", "trolleybus", etc.).

The general principle of the system is illustrated in detail in the block diagram (figure 2), which shows the sequence of video stream processing steps and the adaptability of the algorithm to changes in the external environment.

Analysis of the visual characteristics of route numbers has shown that they usually have a clearly defined rectangular shape and are placed on a contrasting background – black or white, sometimes with backlighting. This greatly facilitates their visual identification by humans and, at the same time, indicates the potential effectiveness of their automatic detection using neural network models of object detection.

Taking these features into account, it was decided to retrain the YOLOv8 model not only for the task of classifying vehicle types, but also for the task of localising the route number area on the vehicle body. This approach allows the area that is most likely to contain relevant text information to be selected directly from the frame.

The area selected using YOLOv8 is transferred to the optical character recognition (OCR) module, implemented on the basis of the Tesseract library. Given the peculiarities of its algorithms, which work more stably with black-and-white or grayscale images, contrast enhancement and color noise reduction methods are first applied to the localised area.

These operations are performed using the OpenCV library, which allows for the implementation of a number of filters: conversion to grayscale, adaptive binarisation, histogram equalisation, or contour enhancement. The result is an image optimised for further text recognition.

The general processing sequence and an example of image transformation before recognition are shown in figure 3.

The type of transport and its number are announced until the transport leaves the device's field of view, so that the user can understand that the transport is still in front of them.

To ensure that the system operates in real time, the voice announcement module is implemented using an asynchronous approach. The voice message is generated in the background, which does not interrupt the video frame processing cycle and minimises delays. This approach allows for continuous operation regardless of the duration of the voice announcement.

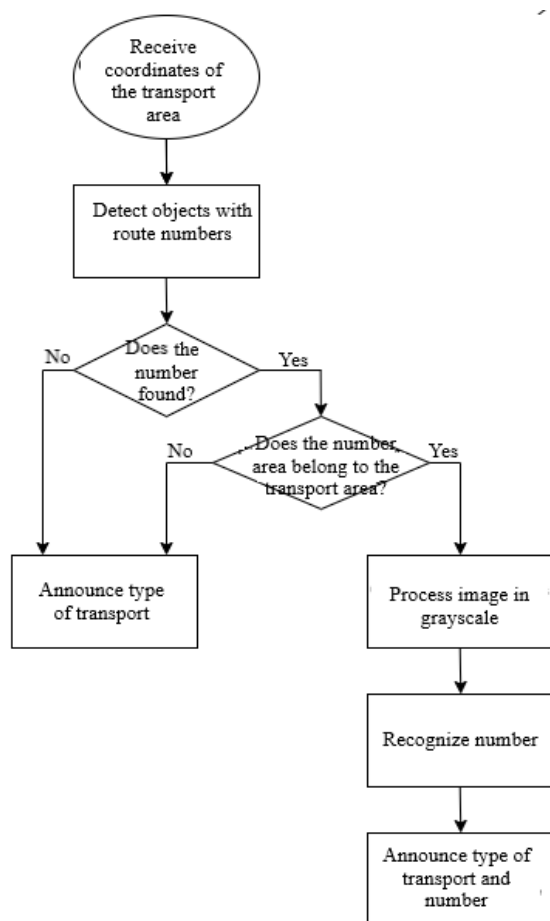


Fig. 3. Block diagram of the route number detection module

The message generation process is a key stage in the system's interaction with the user. A generalised description of the algorithm for voicing the detection results includes a sequence of actions from receiving the classified result to initiating speech synthesis, and also provides for the processing of exceptional situations, in particular cases where no route number is recognised.

In order to ensure the feasibility of the proposed approaches, a specialised dataset was prepared and labelled, including the following classes of objects:

- bus;
- trolleybus;
- tram;

- route number.

The annotation was performed in YOLO format, where the coordinates of the bounding box and the corresponding class label are specified for each image.

The initial sample consisted of 756 images, which were supplemented with augmentation to increase the model's resistance to changing external conditions. The following methods were used:

- change of lighting (brightness, contrast);
- adding noise (Gaussian, Salt & Pepper);
- simulation of rain;
- simulation of fog;
- simulation of night conditions (reduction of global brightness + local glare).

A specialised dataset was created for training the system, consisting of 756 source images of vehicles (buses, trolleybuses, trams) and route numbers. The classes are distributed approximately evenly: 260 examples of buses, 248 trolleybuses and 248 trams. To improve the generalisation ability of the model, augmentation was applied, resulting in an almost twofold increase in the size of the dataset. The proportion of real data in the final set was about 60%, and the proportion of synthetically generated images (simulation of fog, rain, night conditions, etc.) was 40%.

A classic distribution scheme was used to form the samples: 70% of the data was used for training, 15% for validation, and 15% for testing. This division ensured the representativeness of the test sample even with a relatively small number of examples and prevented the "spillover" of augmented data from the training into the test subset.

This expansion of the training dataset is necessary to increase its representativeness and ensure reliable model performance in a real-world environment.

It should be noted that route number markings require special attention — these areas are usually located on a contrasting rectangular background with back-lighting, and they have a characteristic shape that allows them to be effectively identified using the YOLOv8 model, provided that they are correctly annotated during training (figure 4).



a)

b)

c)

Fig. 4. Example of frame marking for different vehicles: a) for a bus, b) for a trolleybus, c) for a tram

At the current stage, the system is focused on the route number formats represented in the dataset. Contextual constraints (number location zone, characteristic string length) are used to reduce the number of false positives. To avoid errors, a simple contextual filter is used: the location of the digits in the frame (for example, a characteristic area on the windscreen or on the transport display) and the format (1–3 digits, sometimes with a letter) are checked. Thus, the system does not announce numbers that fall outside these parameters (e.g., 4-digit on-board codes). In case of changes in the formats of route displays, the dataset is expanded and the model is retrained. Vehicles are classified based on visual characteristics specific to each class: the presence of poles and contact wires (trolleybuses), rail chassis (trams), and the absence of these elements (buses).

The Roboflow platform was used to label the images, which provides a complete set of functionality for

annotation, dataset version management, and export in the required formats, in particular for YOLO models.

During the formation of the dataset, situations that often occur in real conditions were taken into account, such as the presence of several vehicles in one frame, particularly at public transport stops. Such scenes are often accompanied by partial overlap of vehicles, which complicates the detection task.

In such cases, it is worth performing an approximate annotation of their boundaries, taking into account the shape of the object and the context of the scene (figure 5).

This approach improves the generalisation of the model and ensures its stable operation in complex situations, particularly in urban environments.



Fig. 5. Example of marking with several objects overlapping each other

To improve the model's generalisation ability, synthetic image augmentation was implemented. This allows the model to learn to recognise public transport

objects in different weather conditions and in low light (figure 6).



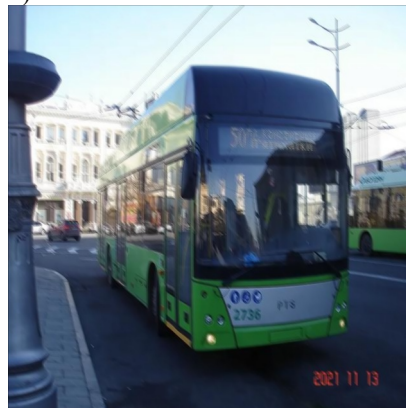
a)



c)



b)



d)

Fig. 6. Conditions for dataset augmentation: a) rain; b) snow; c) darkness; d) blurring

To assess the functional suitability of the developed software and hardware complex, testing was carried out in conditions as close as possible to the real operating environment. The main goal of the experiment was to determine the accuracy of vehicle detection and route number recognition.

To simulate changing environmental conditions (fog, rain, night shooting), the OBS (Open Broadcaster Software) programme with the OBS Virtual Camera function was used, which allowed a video stream with simulated scenes, including buses, trolleybuses and trams, to be fed into the system.

Table 1. – *Table of test results in real and simulated conditions*

Experimental conditions	Number of frames, pcs.	Object recall (TPR), %	Precision of transport type, %	Accuracy of route number recognition, %
Simulation, daylight (100–10,000 lx)	30	10	95	89
Simulation, fog	30	98	95	84
Imitation, rain	30	100	100	85
Simulation, snow	30	100	100	90
Simulation, blurring (reduced sharpness)	30	96	95	80

Based on the results obtained, it can be concluded that the system demonstrates consistently high

accuracy in detecting vehicles (mainly 100%), which indicates the reliability of the YOLOv8 algorithm in the task of object detection. Only in foggy conditions (98%)

and blurred images (96%) did the indicators decrease slightly, which is associated with a decrease in the contrast and sharpness of the input data (figure 7).

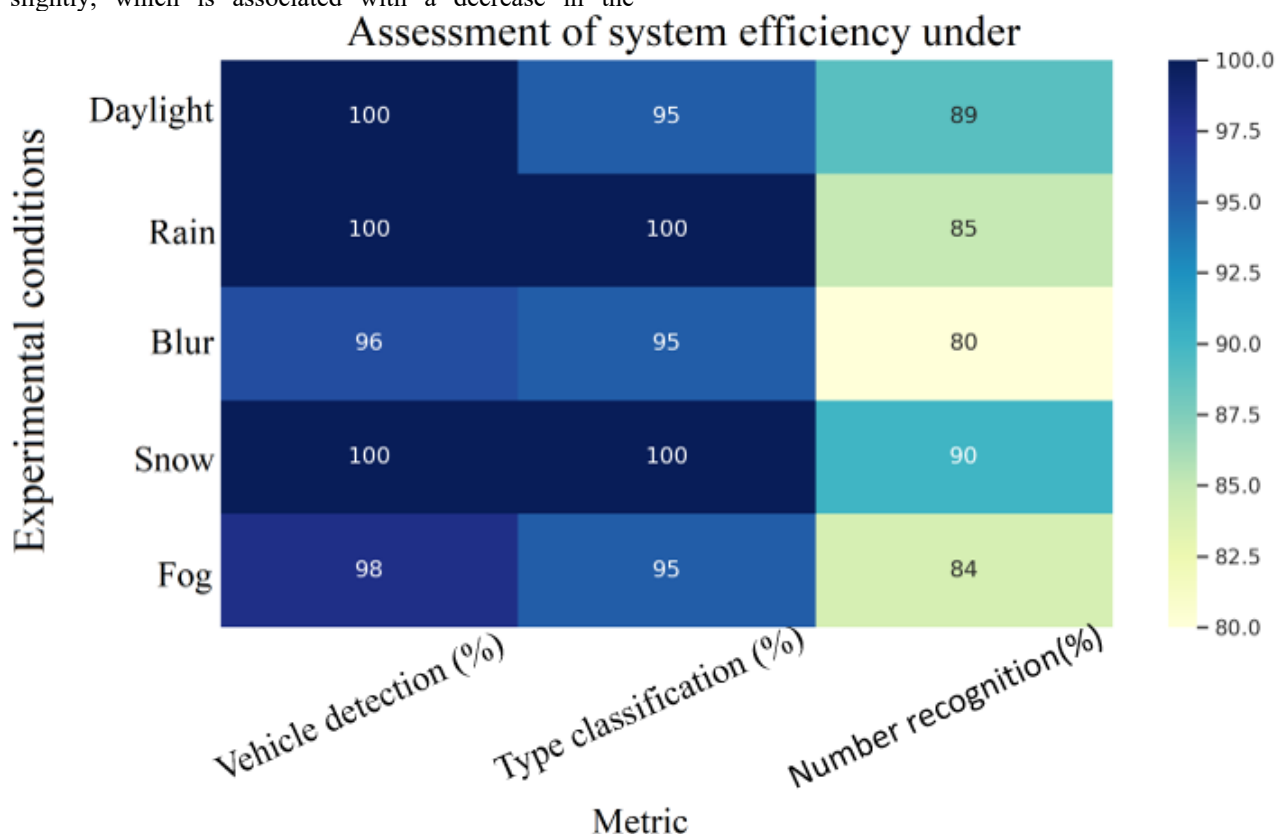


Fig. 7. Heat map of the results of experimental testing of the developed system

The accuracy of vehicle type classification ranged from 95 to 100%, with the best results observed in rainy and snowy conditions, where the contours of objects remained sufficiently clear. At the same time, in cases of fog and glare, the accuracy decreased to 95%, indicating the sensitivity of the model to blurred contours and loss of local features.

The higher accuracy in adverse conditions (100% in rain/snow) compared to daylight (95%) is explained by the uneven distribution of test examples: the number of examples in "difficult" conditions was smaller, which could artificially increase accuracy. In future work, we plan to balance the dataset and conduct a series of new experiments. It is also worth noting that some of the "adverse conditions" (rain, snow, fog) were generated using augmentation methods and reflect simulation scenarios. This could have affected the results and given higher accuracy compared to daylight conditions. The actual performance of the system in similar weather conditions may vary, which also requires further field experiments using real data.

The most problematic stage was the recognition of route numbers, where the accuracy ranged from 80% (blurred image) to 90% (snow, daylight). This is because the OCR system is highly dependent on the clarity of the characters and the quality of the frame pre-processing. Thus, further development of the system should be aimed

at improving image pre-processing algorithms to increase the reliability of OCR in difficult visibility conditions.

Conclusions

During development, the software part of the intelligent module was created, combining deep learning, computer vision, and speech synthesis methods. To detect public transport, the YOLOv8n model was used, which demonstrated high accuracy in daytime conditions and acceptable speed on a single-board computer. Route number recognition was implemented using the Tesseract OCR module, which allowed the necessary text information to be obtained from video frames. The pyttsx3 library was used for rapid voice output of results, which ensures offline operation without an Internet connection and minimal delays.

Testing of the software component confirmed the effectiveness of the chosen solutions: the system consistently recognises vehicles and their numbers and correctly announces the results. At the same time, analysis showed that in low visibility conditions (twilight, darkness, blurred images), the accuracy of OCR and transport type classification decreases. This determines the directions for further work: improving image pre-processing algorithms, expanding the dataset with real examples from different weather conditions, and using

more powerful deep learning models. As a result, the software component has proven its practical value and can be the basis for full integration into wearable systems to assist the visually impaired.

The tests showed that the software solutions provide acceptable performance in daylight conditions, but in twilight and with reduced lighting quality, the

References

1. Berad, A. S. (2025). Emerging Technologies for Enhancing Vision in People with Blindness: Innovations, Applications, and Future Directions. *Central India Journal of Medical Research*, 4(01), 18-20. <https://doi.org/10.58999/cijmr.v4i01.218>
2. Serdechnyi, V., Barkovska, O., Kovalenko, A., Martovytskyi, V., & Havrashenko, A. (2025). Knowledge systematization about the characteristics of existing technological means for assisting people with visual impairments. *Advanced Information Systems*, 9(1), 13-23. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.02>
3. Нечітайло О. В. Інтелектуальний модуль навігації для реабілітації осіб з вадами зору на зупинках громадського транспорту / О. В. Нечітайло, А. О. Гаврашенко // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : тези доп. 15-ї міжнар. наук.-техн. конф., 24-25 квітня 2025 р., Баку–Харків–Жиліна : [у 4 т.]. Т. 3 : секція 3,4 / Нац. ун-т оборони Азербайджанської Республіки [та ін.]. – Харків : Impress., 2025. – С. 123. <https://doi.org/10.32620/ICT.25.t3>
4. Tulashvili Y. Humanization of society through integration and inclusive education: Challenges and prospects for individuals with visual impairments in Ukraine // *Forum for Education Studies*. – 2024. – Т. 2. – №. 3. – С. 279-279. <https://doi.org/10.59400/fes.v2i3.279>
5. Khan, S., Nazir, S., & Khan, H. U. (2021). Analysis of navigation assistants for blind and visually impaired people: A systematic review. *IEEE access*, 9, 26712-26734. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052415>
6. Hmidani, O., & Alaoui, E. I. (2022, December). A comprehensive survey of the R-CNN family for object detection. In *2022 5th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CommNet56067.2022.9993862>
7. Ali, M. L., & Zhang, Z. (2024). The YOLO framework: A comprehensive review of evolution, applications, and benchmarks in object detection. *Computers*, 13(12), 336. <https://doi.org/10.3390/computers13120336>
8. Avyodri, R., Lukas, S., & Tjahyadi, H. (2022, September). Optical character recognition (ocr) for text recognition and its post-processing method: A literature review. In *2022 1st International Conference on Technology Innovation and Its Applications (ICTIIA)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTIIA54654.2022.9935961>
9. Thorat, C., Bhat, A., Sawant, P., Bartakke, I., & Shirsath, S. (2022). A detailed review on text extraction using optical character recognition. *ICT Analysis and Applications*, 719-728. <https://doi.org/10.1109/I2CT61223.2024.10544007>
10. Kumar, Y., Koul, A., & Singh, C. (2023). A deep learning approaches in text-to-speech system: a systematic review and recent research perspective. *Multimedia Tools and Applications*, 82(10), 15171-15197. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13943-4>
11. Praveen Borra. 'A Survey of Google Cloud Platform (GCP): Features, Services, and Applications'. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, Jun. 2024, pp. 191–99. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.48175/IJARST-18922>
12. S. Khan, S. Nazir and H. U. Khan, "Analysis of Navigation Assistants for Blind and Visually Impaired People: A Systematic Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26712-26734, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052415
13. Mukhiddinov, M.; Cho, J. Smart Glass System Using Deep Learning for the Blind and Visually Impaired. *Electronics* 2021, 10, 2756. <https://doi.org/10.3390/electronics10222756>
14. Lo Valvo, A.; Croce, D.; Garlisi, D.; Giuliano, F.; Giarré, L.; Tinnirello, I. A Navigation and Augmented Reality System for Visually Impaired People. *Sensors* 2021, 21, 3061. <https://doi.org/10.3390/s21093061>
15. U. Masud, T. Saeed, H. M. Malaikah, F. U. Islam and G. Abbas, "Smart Assistive System for Visually Impaired People Obstruction Avoidance Through Object Detection and Classification," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 13428-13441, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146320>
16. J. K. Mahendran, D. T. Barry, A. K. Nivedha and S. M. Bhandarkar, "Computer Vision-based Assistance System for the Visually Impaired Using Mobile Edge Artificial Intelligence," 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Nashville, TN, USA, 2021, pp. 2418-2427, <https://doi.org/10.1109/CVPRW53098.2021.00274>

Програмний модуль розпізнавання маршрутних номерів у реальному часі для вбудованих систем допомоги слабоворим

Abstract. У роботі розглядається актуальна проблема соціальної адаптації осіб із порушенням зору в Україні, кількість яких суттєво зростає внаслідок військових дій. Представлено розробку інтелектуального програмного додатку, призначеного для допомоги слабоворим особам в самостійній орієнтації на зупинках громадського транспорту. Система поєднує методи глибинного навчання, комп'ютерного зору та синтезу мовлення для автоматичного виявлення транспортних засобів (автобус, тролейбус, трамвай) та розпізнавання їхніх номерів маршрутів у реальному часі. Для детекції об'єктів застосовано модель YOLOv8, для розпізнавання номерів маршрутів – Tesseract OCR, а для озвучення результатів – офлайн синтезатор pyttsx3. Попередня обробка даних включала анотацію датасету, аугментацію із моделюванням погодних умов та використання фільтрів на основі OpenCV для підвищення точності OCR. Тестування у реальних і змодельованих умовах (туман, дощ, сніг, розмиття, низьке освітлення) показало стабільно високу точність виявлення (100%) та прийнятну класифікаційну продуктивність, хоча стійкість розпізнавання знижувалася за умов обмеженої видимості. Отримані результати підтверджують практичну цінність запропонованого підходу, а подальші вдосконалення зосереджуватимуться на розширенні реальних датасетів, удосконаленні методів попередньої обробки та інтеграції більш потужних моделей глибинного навчання. Запропонована система може стати основою для створення переносних асистивних технологій, спрямованих на підвищення інклюзивності та мобільності слабоворих користувачів в урбанізованому середовищі.

Ключові слова: порушення зору; комп'ютерний зір; YOLOv8; OCR; Tesseract; синтез; детекція об'єктів; асистивні технології; глибинне навчання

About the authors

Барковська Оlesia Юрївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна. E-mail: olesia.barkovska@nure.ua, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>

Olesia Barkovska, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic

Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: olesia.barkovska@nure.ua, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-7496-4353>

Нечітайло Олександр Віталійович, магістрант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

E-mail: oleksandr.nechitailo@nure.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0005-7299-2875>

Oleksandr Nechitailo, master's student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: oleksandr.nechitailo@nure.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0005-7299-2875>

Сердечний Віталій Сергійович, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

E-mail: vitalii.serdechnyi@nure.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0007-8828-5803>

Vitalii Serdechnyi, PhD student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: vitalii.serdechnyi@nure.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0007-8828-5803>

Батурін Олексій Олександрович, магістрант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

E-mail: oleksii.baturin@nure.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0009-2815-3061>

Baturin Oleksii, master's student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: oleksii.baturin@nure.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0009-2815-3061>

Аспіранти С. В. Бірюков, К. В. Ілленко, С. Д. Горбач, В. В. Говорун,
В. М. Клименко

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТЯГОВИХ МУФТ, ЩО ЕКСПЛУАТОВАНИ НА ЕЛЕКТРОПОЇЗДАХ ВІТЧИЗНЯНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ І МЕТРОПОЛІТЕНІВ



Анотація. У статті проаналізовано схеми конструкцій тягових передач, які застосовували на рейковому рухомому складі, експлуатованому на залізницях і метрополітенах. Вказано на відмінності та особливості конструкцій тягових приводів різних класів, зокрема доцільність використання тягових муфт як елемента, який дає змогу передавати обертальний момент від тягового двигуна на редуктор колісної пари з неспівпадінням осей їхніх валів.

Розглянуто конструкції тягових муфт, які застосовували на вагонах електропоїздів метрополітену старих і модернізованих конструкцій та електропоїздів приміського сполучення на залізницях. Вказано на основні складові конструкції муфт електропоїздів і можливі несправності такого вузла, які можуть виникати з експлуатацією. У статті зосереджено увагу на конструкції карданної муфти вагона електропоїзда метрополітену та зубчастої муфти ЗК 306, що встановлена на вагонах, які пройшли капітально-відновлювальний ремонт. Розглянуто гумокордну пружну муфту, яка встановлена на рухомому складі залізничних електропоїздів приміського сполучення.

Порівняно величини неспіввісності валів, що компенсують розглянуті тягові муфти, зроблено висновки щодо проведеного аналізу.

Ключові слова: рейковий рухомий склад, тягова передача, візок вагона, тяговий привод, карданна муфта, гумокордна муфта.

Вступ.

Залізничний транспорт у сучасному світі відіграє важливу роль у забезпеченні мобільності населення та перевезенні вантажів. Він дає змогу сполучати між собою країни та міста, тим самим сприяючи інтеграції економіки і розвитку інфраструктури. Саме залізничний транспорт найдоцільніше використовувати для перевезення великого обсягу вантажів на середні та великі відстані суходолом. Те саме справедливо і для пасажирських перевезень, якщо звісно є розвинена залізнична інфраструктура.

Щодо переміщення на порівняно малі відстані, то тут лідирує автомобільний транспорт [1], але також значну нішу займає і рейковий: трамвай, залізничний рухомий склад міського сполучення та електропоїзди метрополітену.

У свою чергу рухомий склад метрополітену, як один із видів громадського транспорту, робить вагомий внесок у розвиток міської транспортної інфраструктури, адже він є дуже зручним і порівняно швидким. Однак метрополітен є складною структурою із специфічною розгалуженою системою, яка розташована під землею, а саме тунелі та станції, які потребують постійного догляду і ремонту. Усе це призводить до значних витрат на експлуатацію, тому таку транспортну структуру потрібно впроваджувати

у великих містах, населення яких складає більше мільйона жителів [2], щоб покрити капітальні витрати на будівництво та подальшу експлуатацію. Відповідно і рухомий склад метрополітену має бути надійним, щоб забезпечувати перевезення пасажирів із належною безпекою [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ) і Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» є одними з основних вітчизняних центрів, де проводять дослідження і публікують роботи стосовно тягового привода та інших складових ходової частини рейкового транспорту [4, 5]. Дослідження механічної частини рухомого складу здебільшого стосуються її модернізації [6] і збільшення ресурсу роботи, оскільки значну частину локомотивів і поїздів експлуатують із пробігом, який перевищив нормативний [7], а нових рухомих одиниць на Укрзалізницях та метрополітенах не так багато.

За кордоном дослідженню ходової частини електропоїздів і вирішенню питань щодо її оптимізації та вдосконаленні приділяють багато уваги. Наприклад, досліджують динаміку тягової передачі та аналізують її відмови, зокрема на високошвидкісному рейковому транспорті [8, 9], адже

від надійності механічного обладнання залежить безпека руху.

Також моделюють ходову частину рейкового транспорту, щоб оцінити її стан у складних умовах експлуатації [10].

Визначення мети та задачі дослідження.

Метою статті є аналіз особливостей конструкції існуючих моделей тягових муфт, які експлуатовані на електропоїздах метрополітену і поїздах залізничного приміського сполучення, а також порівняння параметрів неспіввісності валів, які компенсують муфти.

Основна частина дослідження.

Одним із основних компонентів рейкового транспорту, який безпосередньо впливає на безпеку руху, є його ходова частина, а саме візки, які сприймають вагу вагона з пасажирами та рівномірно розподіляють її на колісні пари, а також передають тягові та гальмівні зусилля, виконують напрямлення руху вагона по колії. Для передавання обертового моменту від двигуна до колісної пари служить тягова передача [11]. Оскільки в конструкції візків вітчизняного рейкового транспорту геометричні осі

вала двигуна та колісної пари не співпадають, то необхідно застосовувати редуктор.

Тягові передачі рухомого складу залежно від способу підвішування двигуна та редуктора умовно поділяють на три класи [12]:

- привод першого класу: опорно-осьове підвішування двигуна та редуктора;
- привод другого класу: опорно-рамне підвішування двигуна та опорно-осьове редуктора;
- привод третього класу: опорно-рамне підвішування двигуна та редуктора.

Привод першого класу, кінематична схема якого зображена на рис. 1, здебільшого застосовано на локомотивах, задіяних у вантажних перевезеннях, і на електропоїздах старих серій. Також опорно-осьовий привод був дуже поширений на трамваях. Опорно-осьове підвішування має значну невіднесену вагу привода, оскільки тяговий електродвигун спирається на вісь колісної пари, що викликає значні напруження в елементах тягової передачі з рухом коліс по нерівностях рейкової колії. Така передача має більш просту конструкцію порівняно з іншими класами та буває односторонньою або двосторонньою залежно від конструктивного виконання.

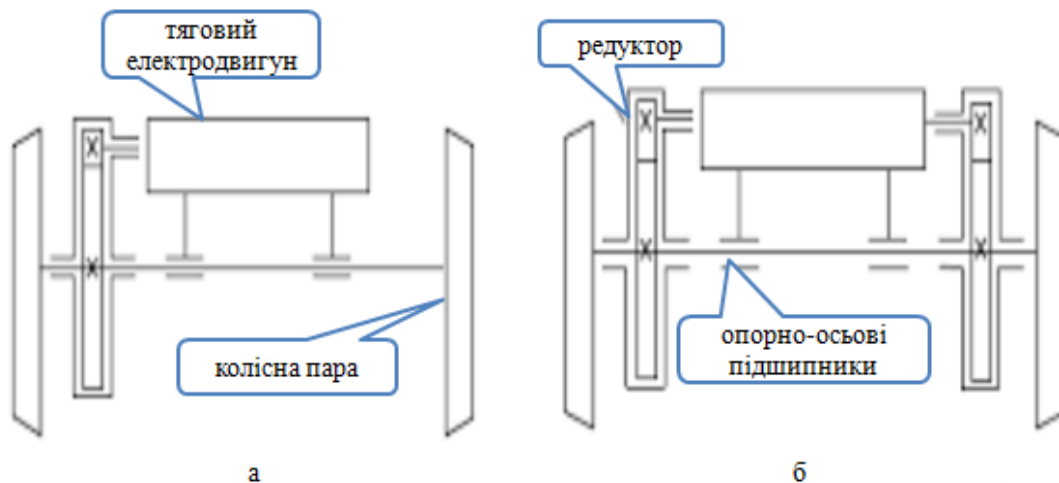


Рис. 1. Схема опорно-осьового підвішування електродвигунів:

а – одностороння передача; б – двостороння передача

Привод другого класу застосовувано на пасажирських локомотивах і поїздах, а також електропоїздах метрополітену (рис. 2). Для нього

характерне зниження невіднесеної ваги порівняно із приводом першого класу, оскільки двигун встановлено на віднесену частину візка, а саме – раму.

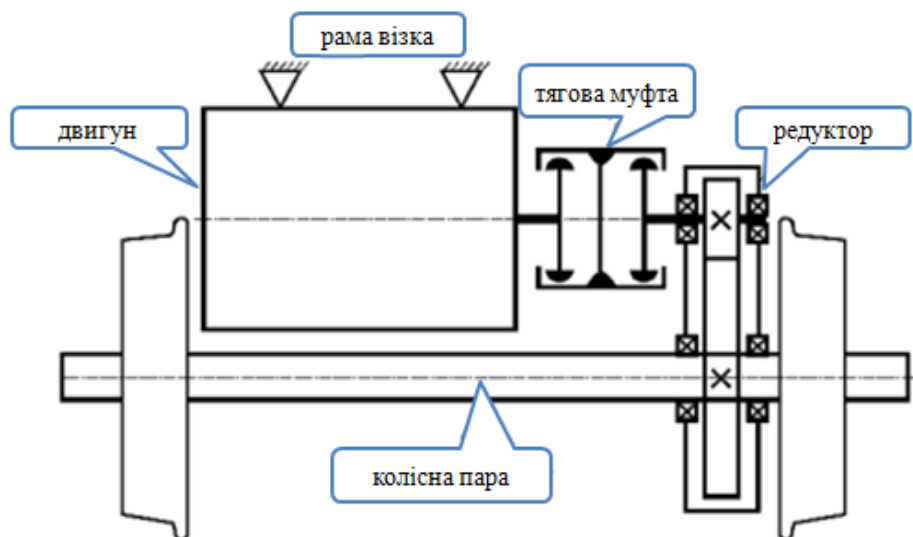


Рис. 2. Кінематична схема тягового привода II класу

Привод третього класу застосовано, зокрема, на високошвидкісному рухомому складі, деяких сучасних вантажних електровозах і вагонах метрополітену. Усі основні компоненти привода

підресорені, що показано на рис. 3, це зменшує вплив динамічних навантажень на них. Але такий привод має досить складну конструкцію, що впливає на його вартість і обслуговування.

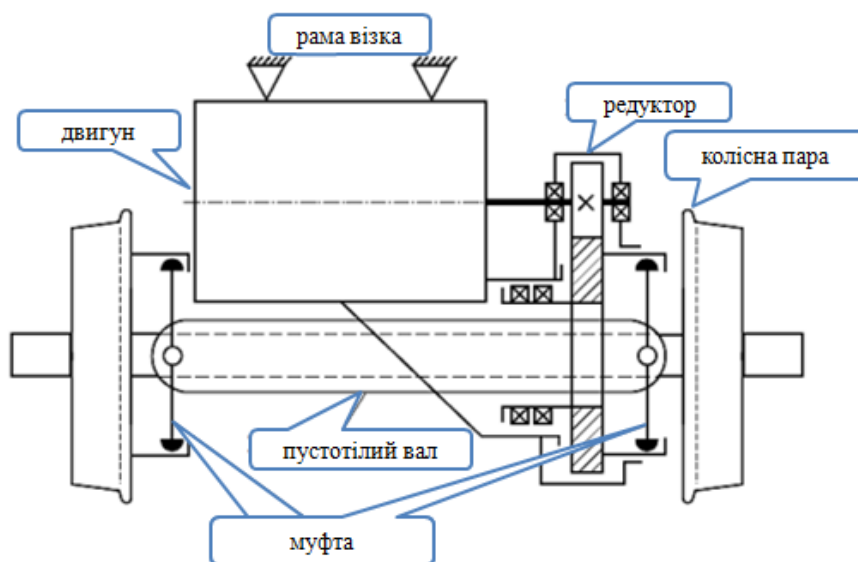


Рис. 3. Кінематична схема тягового привода III класу

Тяговий двигун під час руху вагона може переміщуватися відносно колісної пари, якщо він розташований на підресорених частинах візка. У таких умовах експлуатації застосовують муфти, які з'єднують вал двигуна та шестірню редуктора, щоб передавати обертальний момент на колісну пару. Але у випадку опорно-осьового підвішування двигуна, тобто із застосуванням тягової передачі I класу, необхідності в таких муфтах немає.

Застосовуючи привод II класу, між двигуном і редуктором використовують тягову муфту. Цей факт накладає певні обмеження на габаритні розміри

двигуна, адже необхідно вмістити разом із великим редуктором ще й муфту.

Щодо тягового привода III класу, то, коли і двигун і редуктор встановлені на підресореній частині візка, вал зубчастого колеса редуктора з'єднується з колісною парою за допомогою тягової муфти, яка має сприймати великі обертальні моменти, на відміну від муфт, що застосовані у приводах II класу. Також підресорювання редуктора створює додаткові обмеження за габаритами – через збільшення висоти положення нижньої точки редуктора над головками ходових рейок є необхідність зменшення граничного діаметра зубчастого колеса порівняно з аналогічним

діаметром у приводах I і II класів, що призводить до зменшення максимального передавального відношення редуктора, яке реалізовано на одній передачі. Це не має великого значення для пасажирського рейкового транспорту, але є дуже суттєвим для вантажного.

За конструкцією тягові муфти поділяють на муфти поздовжньої компенсації та муфти поперечної компенсації.

На вітчизняному рухомому складі, зокрема електропоїздах Харківського метрополітену, експлуатують візки, на яких тяговий електродвигун має рамне підвішування, а редуктор – опорно-осьове, відповідно застосовано тяговий привод другого класу [13].

Під час руху рухомого складу по колії виникає неспіввісність вала тягового двигуна з валом шестірні редуктора. Переміщення валів, що виникають із рухом, можуть відбуватися одночасно в горизонтальній і вертикальній площинах: горизонтальна площина – у результаті розбігу колісної пари, тобто можливості її руху відносно рами візка як у поздовжньому, так і поперечному напрямках; вертикальна площина – із навантаженням пружин буксового підвішування від нерівностей колії та навантаження від ваги пасажирів. Для компенсації цієї неспіввісності валів застосовують шарнірне з'єднання, а саме карданну муфту [14] (рис. 4), яка з'єднує вал тягового двигуна з валом шестірні редуктора та передає тягові й гальмівні зусилля від двигуна на колісну пару. Ця муфта допускає паралельне зміщення валів один відносно одного до 8 мм, кутове зміщення до $2,5^\circ$, взаємне поздовжнє зміщення валів до 11 мм.



Рис. 4. Розташування карданної муфти під вагоном

Складається карданна муфта з двох однакових напівмуфт, які з'єднані чотирма призонними болтами після встановлення на відповідні вали. До елементів кожної напівмуфти (рис. 5) входять кулачок із двома голковими підшипниками і двома ковпачками, кріпильна гайка з шайбою, корпус-вилка, стакан, ущільнюючий щит і чотири болти з

контргайками. Для з'єднання напівмуфт між собою встановлена загальна центруюча шайба та ущільнююча прокладка [15].

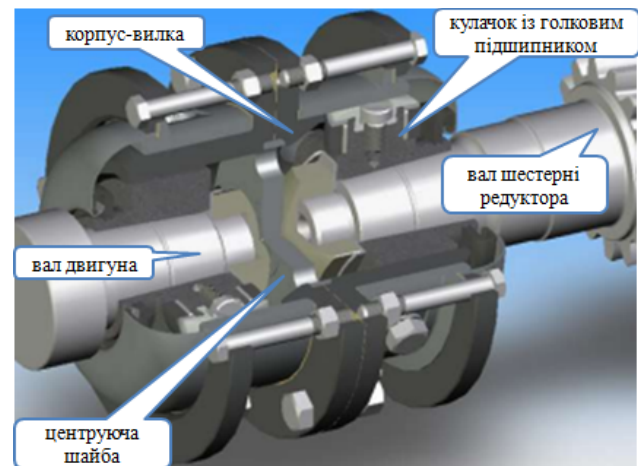


Рис. 5. Конструкція карданної муфти

Роботу карданної муфти можна описати так: кулачок, який насаджено на вал двигуна, обертається разом із ним і передає обертальний момент до вилки напівмуфти через голкові підшипники та цапфи, на яких вони закріплені. Вилка першої напівмуфти жорстко з'єднана фланцем із вилкою другої напівмуфти і передає обертання через вилку на кулачок, що насаджений на вал шестірні, яка у свою чергу приводить до обертання зубчасте колесо редуктора разом із колісною парою.

Виходячи з такої конструкції, за принципом дії карданну муфту відносять до універсальних шарнірів. Кулачки є нерухомими елементами в ній, а вилки із стаканами та центруючою шайбою – рухомими. Корпус муфти з її роботою не має визначеного положення та може бути розташований під нахилом і переміщуватися вздовж валів. Із роботою муфти відбувається постійне тертя металічних частин, тому застосовують змащення.

Карданна муфта візка електропоїзда метрополітену є дуже відповідальним вузлом, тому потребує ретельного догляду та обслуговування. Характерними несправностями муфти є неправильне регулювання, перегрів, відсутність або викид змазки, спресування кулачка, а також спрацювання сормайтівих наплавлень на вилці, яка зображена на рис. 6, що може призводити до виникнення люфту між вилкою та голковим підшипником і, як наслідок, зламу цапфи кулачка з пуском тягового двигуна.



Рис. 6. Вилка карданної муфти вагона метро

Вузол карданної муфти практично не модернізований за весь період експлуатації вітчизняних вагонів із рамним підвішуванням тягових двигунів, за винятком незначних змін у конструкції кулачка та вилки. Але на Харківському метрополітені експлуатують декілька поїздів (рис. 7), які пройшли капітально-відновлювальний ремонт. Саме на них встановлено більш сучасні тягові муфти, які мають іншу конструкцію. Ідеться про зубчасту муфту ZK 306 виробництва німецької компанії KWD Automotive.

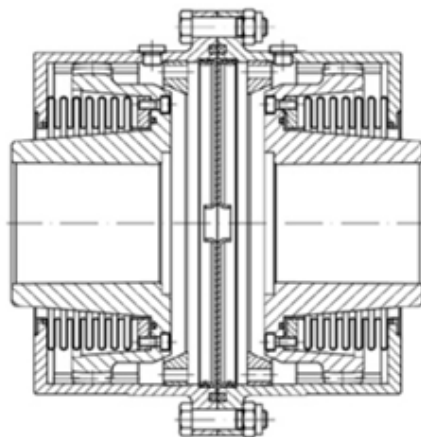


Рис. 7. Електропоїзд серії ЕЖ 3 після капітально-відновлювального ремонту

Ця муфта передає крутний момент шляхом кінематичного замикання через зовнішнє та внутрішнє зубчасте зачеплення, що зачіпляються одне за одного, з евольвентним профілем зуба маточини та гільзи. Муфта (рис. 8) складається з двох однакових напівмуфт із необхідним кріпильним матеріалом. На вал двигуна та вал малої шестірні напресовують маточину, виконану разом із зубчастим вінцем. Вінцем входить у зачеплення із зубчастим сектором, нанесеним на внутрішній поверхні гільзи. У гільзі встановлено роз'ємне упорне кільце, що обмежує осьове переміщення муфти, і гофрований металевий сильфон, який утримує мастило. Кожна гільза з боку фланця закрита кришкою з отвором і з'єднана з другою напівмуфтою за допомогою призонних болтів.



а



б

Рис. 8. Зубчаста муфта: а – зовнішній вигляд; б – поперечний переріз муфти

Муфта ZK 306 допускає паралельне зміщення валів один відносно одного до 8 мм, кутове зміщення до 2° , взаємне поздовжнє зміщення валів до 9 мм.

Характерними несправностями зубчастої муфти є проворот маточини, зношення зубців, тріщиноутворення в гільзі муфти, злам призонних болтів, викид змащування та нагрів вище встановленої норми.

Тим не менш саме муфта зубчастої конструкції зарекомендувала себе як більш надійна та невибаглива під час експлуатації порівняно з карданною муфтою немодернізованих вагонів.

Також цікаву конструкцію має пружна муфта, що зображена на рис. 9, застосовувана на залізничних електропоїздах приміського сполучення, зокрема ЕР2, ЕР9М, ЕД9Т, ЕР9П та інших.

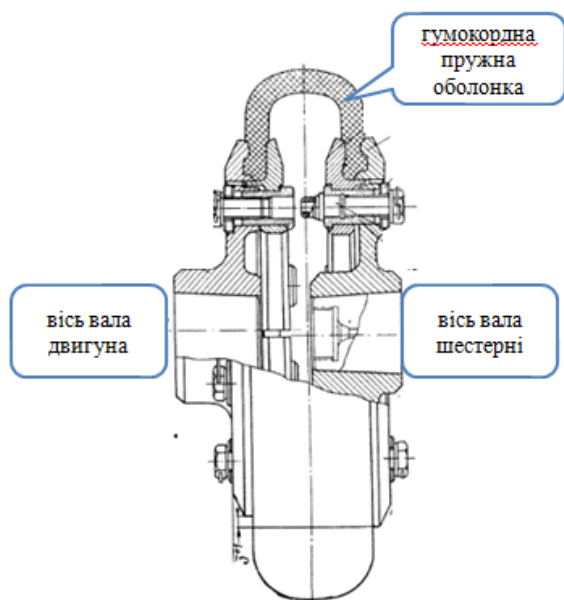


Рис. 9. Гумокордна пружна муфта електропоїзда ЕР2

Цю муфту використовують не тільки як з'єднувальну ланку, яка компенсує неспіввісність валів двигуна та шестірні редуктора, а ще й як пружну, оскільки знижує динамічні навантаження в приводі за рахунок гнучкості пружної оболонки. У ній відсутні поверхні, що труться або змащуються, а також для її виготовлення не потрібні дорогі матеріали.

Муфта складається з двох сталевих фланців, які в гарячому стані насаджені на кінці валів двигуна та шестірні редуктора, гумокордної пружної оболонки та елементів кріплення оболонки до фланців.

Гумокордна муфта допускає взаємне паралельне зміщення валів до 15 мм, поздовжнє – до 20 мм, кутове – до 4°.

Розглянуті вище тягові муфти мають різну конструкцію та застосовувані на рухомому складі, який має тягову передачу, що належить до II класу. Величини неспіввісностей валів, що компенсовані тяговими муфтами, наведено в таблиці залежно від типу зміщення осей якоря двигуна та шестірні редуктора, які виникають із рухом візка по рейках.

Величини неспіввісностей, що компенсують муфти

Тип тягової муфти	Тип неспіввісності валів, що компенсована		
	Паралельне зміщення	Поздовжнє зміщення	Кутове зміщення
Карданна муфта	до 8 мм	до 11 мм	до 2,5°
Зубчаста муфта	до 8 мм	до 9 мм	до 2°
Гумокордна муфта	до 15 мм	до 20 мм	до 4°

Висновки.

Одним з основних елементів ходової частини моторного рейкового рухомого складу є його тяговий привод, який залежно від класу тягової передачі має різну конструкцію підвішування тягового електродвигуна та редуктора. Тягові передачі з рамним підвішуванням двигуна належать до II або III класу та мають у своїй конструкції тягову муфту, яка з'єднує вал електродвигуна з шестірнею редуктора.

Саме тягові муфти компенсують значні взаємні переміщення, що виникають між підресореними та непідресореними частинами тягового привода. Без них передача крутного моменту була б неможливою або призвела до швидкого руйнування механічних вузлів.

Від надійності з'єднання валів двигуна та шестірні редуктора безпосередньо залежить безпека руху, відповідно дослідження та вдосконалення конструкції тягової муфти є перспективним напрямом, на який слід звертати увагу фахівцям із проєктуванням нових і модернізацією старих конструкцій тягових передач.

Карданна муфта є досить проблемним вузлом у конструкції тягової передачі та потребує постійного догляду і ремонту, на відміну від зубчастої муфти, яка має значно більший гарантійний пробіг і майже не потребує обслуговування. Гумокордна муфта може працювати за більших неспіввісностей валів двигуна та шестірні редуктора, але має більші габаритні розміри порівняно з карданною муфтою. Отже, найбільш переважним варіантом тягової муфти на вагонах метрополітену є зубчаста муфта, яку перспективно застосовувати для модернізації рухомого складу.

Т

Колектив авторів висловлює подяку співробітникам електродепо «Салтівське», а саме Андрію Фандеєву, Володимиру Сорокіну, Олександр

Острякову за надані консультації щодо питань, які висвітлені у статті.

Список використаних джерел

1. Стасюк О. М., Чмирьова Л. Ю., Федяй Н. О. Ринки вантажних та пасажирських перевезень в Україні: проблеми та тенденції. *Ефективна економіка*. 2020. № 9. DOI: [10.32702/2307-2105-2020.9.54](https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.9.54) (дата звернення 05.07.2025).
2. Loo Becky P. Y., Cheng Amy H. T. Are there useful yardsticks of population size and income level for building metro systems? Some worldwide evidence. *Cities*. 2010. Vol. 27(5). P. 299-306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2010.02.003> (дата звернення 05.07.2025).
3. Правила технічної експлуатації метрополітенів України. Харків, 2015. 304 с.
4. Чигирик Н. Д., Найдьон Є. О., Сумцов А. Л. Аналіз схемних рішень та вибір тягового привода швидкісного рухомого складу. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2016. Вип. 164. С. 104 – 112. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92524> (дата звернення 20.07.2025).
5. Лукашова Н. П., Павленко Т. П., Любарський Б. Г., Петренко О. М. Аналіз конструкцій ресорних підвішувань рейкового міського електрорухомого складу. *Оптимізація транспортних систем*. 2018. Вип. 5(51). С. 65 – 68. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.065> (дата звернення 20.07.2025).
6. Войтенко О. І. Дослідження модернізації вагонів метрополітену в Україні як альтернативи придбання нового рухомого складу та порядку проведення робіт з модернізації. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2018. Вип. 17. С. 29 – 35.
7. Капіца М. І., Дерев'янюк О. Й. Аналіз показників безпеки локомотивів з подовженим терміном експлуатації. *Інтелектуальні транспортні технології: IV Міжнар. наук.-техн. конф. (27-28 листопада 2023 р.): тези доповідей*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 290-292.
8. Yongxu Hu, Jianhui Lin, Andy Chit Tan. Failure analysis of gearbox in CRH high-speed train. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 105. P. 110 – 126. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.099> (дата звернення 20.07.2025).
9. Liang Zhao, Yuejian Chen. Dynamics and Fault Diagnosis of Railway Vehicle Gearboxes: A Review. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics*. 2024. Vol. 3(2). P. 83-98. URL: <https://doi.org/10.37965/jdmd.2024.518> (дата звернення 20.07.2025).
10. Chao Cheng, Ming Liu, Bangcheng Zhang, Xiaojing Yin, Caixin Fu and Wanxiu Teng. Health Assessment of High-Speed Train Running Gear System under Complex Working Conditions Based on Data-Driven Model. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020(1). URL: <https://doi.org/10.1155/2020/9863936> (дата звернення 20.07.2025).
11. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
12. Гетьман Г. К., Голік С. М. Тягові передачі електрорухомого складу: навч. посіб. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
13. Бобрицький С. В. Аналіз особливостей конструкції тягових приводів моторвагонного рухомого складу метрополітену. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : наук. вид. : тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2019 (15-17 травня 2019 р.)* / ред. Є. І. Сокол. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Ч. 1. С. 167.
14. Бірюков С. В., Юрченко О. А. Аналіз конструкції карданної муфти вагону метрополітену. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 33-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р.* / ред. Є. І. Сокол; уклад. Г. В. Лісачук; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 224.
15. Навчальний посібник по вивченню улаштування та роботи електричного, пневматичного та механічного обладнання вагонів метрополітену серії 81 – 717 та 81 – 714. КП «Київський метрополітен». Київ, 2005. 60 с.

S. BIRIUKOV, K. ILLIENKO, S. HORBACH, V. GOVORUN, V. KLYMENKO ANALYSIS OF TRACTION COUPLINGS USED ON ELECTRIC TRAINS OF DOMESTIC RAILWAYS AND SUBWAYS

Abstract. In this article, a comprehensive analysis of the design schemes of traction drives is performed. These drives are key components of bogie design for railway rolling stock used on both mainline railways and metro systems. The study meticulously examines and identifies the differences and specific features of various classes of traction drive designs, with a particular focus on the rationale for using traction couplings. These couplings are critical elements that ensure the transmission of torque from the traction motor to the wheelset gearbox, even when the axes of their shafts are misaligned.

Furthermore, the paper provides a detailed review of the designs of traction couplings used on metro electric multiple units (EMUs) of both older and modernized models, as well as on suburban rail EMUs. It describes the main components of the couplings and analyzes the most common failures that can occur during

their operation. This analysis helps to better understand the root causes of potential failures and to develop more effective preventative measures, which will undoubtedly have a positive impact on traffic safety.

Particular attention is given to two specific types of couplings used on metro rolling stock. The first is the design of the cardan coupling for metro EMU cars, which can compensate for angular and axial displacements that arise from the misalignment of the motor and gearbox shafts during motion. The second is the ZK 306 gear coupling, which is installed on cars that have undergone major overhaul and is known for its reliability. The study also examines and analyzes the rubber-cord resilient coupling, which is widely used on suburban rail EMUs due to its ability to effectively absorb shocks and vibrations, thereby reducing dynamic loads on the traction drive components.

A comparison of the levels of shaft misalignment that each of the reviewed traction couplings can effectively compensate for was conducted. This comparison allowed for objective conclusions regarding the optimal choice of couplings for different operating conditions.

The analysis establishes that the choice of a specific coupling type depends directly on the operating characteristics of the rolling stock, the magnitude of dynamic loads, and the reliability requirements. The research also underscores the necessity of continuous monitoring and timely maintenance of traction drives to ensure the safety and efficiency of train operations.

Keywords: rail rolling stock, traction transmission, carriage bogie, traction drive, universal joint, rubber cord clutch.

Бірюков Сергій Віталійович, аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0005-6403-5880. Тел.: +38 (097) 654-34-78.

E-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua.

Ілленко Костянтин Валерійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-5124-0862. Тел.: +380 99 382 93 80. E-mail: illenکو_phd@kart.edu.ua.

Горбач Сергій Дмитрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-2945-3342. Тел.: +380 93 607 68 44. E-mail: horbach_phd@kart.edu.ua.

Говорун Владислав Вадимович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: 0009-0009-4323-7466. Тел.: +380 67 158 37 56. E-mail: hovorun_phd@kart.edu.ua.com.

Клименко Вадим Михайлович, аспірант кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0005-9532-6744. Тел.: +380 97 819 99 13. E-mail: Vadym.Klymenko@ieec.khpi.edu.ua.

Biriukov Serhii, Postgraduate student of the Computer modelling and integrated pressure processing technologies Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0005-6403-5880. E-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua.

Illienko Kostiantyn, Postgraduate student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0009-0000-5124-0862. E-mail: illenکو_phd@kart.edu.ua.

Horbach Serhii, Postgraduate student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0009-0004-2945-3342. E-mail: horbach_phd@kart.edu.ua.

Govorun Vladyslav, Postgraduate student, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0009-0009-4323-7466. E-mail: hovorun_phd@kart.edu.ua.

Klymenko Vadym - Postgraduate student, Department of Turbine Engineering of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0005-9532-6744. E-mail: Vadym.Klymenko@ieec.khpi.edu.ua.

Канд. техн. наук Г. О. Примаченко, асп. Г. С. Пащенко
(Український державний університет залізничного транспорту)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПОЗИЦІЙ І ЛОГІСТИЧНИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ МІЖНАРОДНИХ І ВНУТРІШНІХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ



Анотація. У статті проаналізовано і вибрано найбільш актуальні наукові пропозиції українських і зарубіжних учених для розвитку контейнерних перевезень. Основною причиною перегляду наукових ідей є стрімка зміна політичних та економічних умов, через що висунуто пропозиції, що мали чималу користь для пристосування до нових обставин. Визначено можливість інтеграції транспортної системи України до Європейської із застосуванням розподілу терміналів. Така пропозиція існує, але вона розрахована на транзитні перевезення, що можна враховувати лише в далекій перспективі. Запропонована кластеризація терміналів дасть змогу зменшити ризики, пов'язані з несанкціонованим людським втручанням і корупцією. Цьому також може посприяти цифровізація внутрішніх операцій контейнерних терміналів. Зарубіжні вчені часто розвивають ідею сухих портів, завдяки яким можна налагодити найбільш ефективну взаємодію морських портів і вантажовласників, що знаходяться у віддалених місцях від морського узбережжя.

Ключові слова: інтермодальний термінал, кластер, контейнерні перевезення, розподіл вантажів, сухий порт, цифровізація.

Вступ.

Необхідність розвитку контейнерних перевезень в Україні була зрозумілою вже на початку ХХІ століття. Тому саме відтоді почали з'являтися різні наукові праці, присвячені цій тематиці. Водночас ситуація на загальному ринку вантажних перевезень ставала більш динамічною, а особливих змін транспортна система України зазнала після початку повномасштабної війни, коли через стрімку переорієнтацію потоків перевізникам довелося в короткі строки знаходити оптимальні рішення. Виходячи з цього, з'являється висока потреба в обґрунтованих наукових пропозиціях, але для цього потрібно створити міцну основу з робіт визначних учених у транспортній галузі.

Кардинальні зміни у здійсненні транспортних технологій є суттєвими викликами як для сучасних науковців, так і безпосередніх виконавців відповідних робіт. Перевізники завжди звертають і приймають вдалі наукові пропозиції, щоб досягти більшої ефективності та менших витрат. Але з часом такі рішення потребують оновлення, оскільки певні елементи результатів досліджень втрачають актуальність. Водночас деякі пропозиції, навпаки, можуть стати актуальними. Але оскільки вони випередили свій час, то такі рішення могли загубитися серед більш сучасних праць, тому доцільно нагадати і пристосувати їх до сучасних умов.

Слід зазначити, що не на всі пропозиції зважали перевізники. Деякі з них мали досить актуальну ідею, яка не отримувала повного розкриття. У таких випадках слід додатково проаналізувати можливості реалізації пропозиції в сучасних умовах. Також у більшості праць недостатньо враховані фактори ризиків і безпеки, оскільки вони були опубліковані в мирні часи, це стосується й напрямків вантажоперевезень. Тому доцільно доповнити та переробити наукові висновки для сучасних умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наукові рішення для контейнерних перевезень і логістичних ланцюгів пропонували вже від початку користування тарою. Але в Україні публікації з цієї теми з'являлися пропорційно популярності застосування контейнерів. Особливо продуктивним став проміжок часу з початку 2010-х років, коли розглядали приєднання України до концепції Нового Шовкового шляху. У ті часи увагу приділяли не лише загальній ефективності використання контейнерів [1, 2], а і розвитку транспортно-логістичних центрів і логістичних ланцюгів із застосуванням відповідних підходів [3, 4]. До того ж розвиток мультимодальних та інтермодальних перевезень активізувався лише ближче до початку 2020-х років, а Закон України «Про мультимодальні перевезення» для державного регулювання цього виду перевезень було ухвалено у 2021 році [5].

Більшість закордонних публікацій містять дослідження про морські контейнерні перевезення [6], внутрішні контейнерні перевезення [7] і сухі порти [8, 9]. Слід зазначити, що в більшості країн із розвинутими мультимодальними перевезеннями основними транспортними засобами для їх здійснення є морські контейнеровози, тому саме про ці транспортні засоби йдеться в дослідженнях. В Україні географічне положення спричиняє потребу комбінувати сухопутні та морські транспортні засоби, а під час війни морські порти опинилися під особливою загрозою. Раніше також впроваджували транзитний контейнеропотік за напрямком «північ-південь», тому була актуальною тематика розвитку контейнерних поїздів [10]. Дослідження останніх років присвячені удосконаленню інтермодальних перевезень [11] і створенню логістичних центрів [12, 13].

В інших закордонних дослідженнях, окрім впровадження інтермодальних перевезень, розглянуто важливість синхронізації графіків обслуговування і операцій між різними видами транспорту, завдяки чому знижуються загальні транспортні витрати [14]. Спостерігають тенденцію до раціоналізації у сфері контейнерних перевезень. Реалізація синхронно-модальних послуг пропонується у трьох рівнях: поставок, послуг і транспорту. У рамках «зеленого курсу» зростає кількість публікацій зі зниження шкідливих викидів від інтермодальних перевезень [15]. Крім того, зазначено, що перевезення вантажів у ланцюзі «море – залізниця» є енергоефективним і має високу пропускну спроможність. Для підвищення ефективності запропоновано перетворювати річкові порти в регіональні логістичні хаби з інтеграцією внутрішнього водного транспорту в Європейську інтермодальну мережу [16]. За допомогою сучасних технологій, зокрема Інтернету речей, можна прогнозувати точну дату прибуття контейнерів [17]. Також акцент зроблено на автоматизацію ведення інформаційних процесів контейнерних терміналів і зазначено про користь від її впровадження, а проблеми, пов'язані з нестачею кваліфікації навченого персоналу, вирішуватимуть під час фактичної роботи з відповідними системами [18]. Щодо далекого вантажного сухопутного сполучення, то яскравим прикладом є маршрут CER (China-Europe Railway) Express, завдяки якому підвищилася ефективність використання часу та скоротився ланцюг поставок [19].

Отже, тематикою дослідження останнім часом займалися такі вчені: Є. С. Альошинський, М. М. Андрієнко, К. Ю. Гілевська, М. Гуліч, Г. Зеласкевич, А. В. Кирічок, А. О. Ковальов, О. М. Костенніков, К. Кулліан, Д. В. Ломотко, Л. Магліч, К. О. Майданік, О. В. Мельник, О. М. Огар, Л. О. Пархоменко, В. В. Петрушов, Н. М. Піддубна, Г. С. Прокудін, В. Росо, О. М. Тимошук, Й. Ч. Цзюан, О. А. Чукайленко та ін. Діяльність із розвитку контейнерних перевезень і логістичних

ланцюгів продовжується й нині, тому кількість публікацій з цієї теми буде зростати і далі.

Визначення мети та завдання дослідження.

Як було зазначено вище, значна кількість наукових пропозицій з інтермодальних перевезень, що були висунуті раніше, мають великий потенціал і в наші дні, але певні елементи потребують удосконалення. Міжнародні контейнерні перевезення розвивалися в умовах мирного часу, повноцінного функціонування морського транспорту і широких транзитних можливостей. Проте геополітична обстановка за досить короткий час зазнала змін із значними наслідками, зокрема у сфері міжнародних вантажних перевезень. Метою статті є переосмислення та додатковий аналіз наукових рішень для контейнерних перевезень із застосуванням логістичних підходів для їх актуалізації стосовно сучасних умов. Також доцільно сформулювати власні пропозиції з удосконалення міжнародних контейнерних перевезень, для яких думки визначних учених будуть міцною основою. У роботах автори використовували ефективні підходи, які можуть бути корисними і сьогодні. Розглянуто не лише роботи вітчизняних учених, а і закордонні публікації для переймання досвіду контейнерних перевезень і логістичних підходів більш розвинутих країн і аналізу можливості пристосування такого досвіду для транспортної системи України. Тому до цілей статті також можливо віднести формування висновків про придатність або непридатність пропонованих рішень для інтермодальних перевезень з урахуванням поточної транспортної, інфраструктурної та геополітичної ситуації логістичними ланцюгами всередині України та за кордон.

Методи дослідження.

Основним інструментом дослідження є логістичні підходи, оскільки вони мають високу ефективність не тільки в мирних, а і в умовах воєнного стану. Для аналізу поточного стану контейнерних перевезень в Україні та світі застосовані аналітичний і графічний методи. За їх допомогою можна найбільш детально розглянути сучасну логістичну ситуацію в Україні та наочно визначити тенденції розвитку інтермодальних перевезень. Цільова функція методу перевезення «від дверей до дверей» буде визначена за допомогою методу математичного моделювання. Досліджено можливість впровадження кластерного методу, що передбачає формування логістичних кластерів. Цей інструмент вже понад 30 років використовують у розвинених країнах. За цей час застосування методу сприяло розвитку сучасних технологій, завдяки чому підвищилася ефективність інтермодальних перевезень. Систематизація та автоматизація сприятимуть більшій фінансовій прозорості процесів перевезень, що є особливо актуальним фактором для попередження ризиків недобросовісної конкуренції та корупції.

Основна частина дослідження.

Станом на 2025 рік глобалізація транспортних потоків є важливим фактором у міжнародній торгівлі. Сучасне суспільство потребує не лише ефективного, але й якомога швидкого обміну важливими товарами. Світові конфлікти можуть одночасно і перешкоджати, і, навпаки, пришвидшувати процеси розвитку логістичних систем. Слід нагадати, що саме через війну і з'явилася сама наука «Логістика».

Інтеграція транспортної системи України до європейської та світової мереж була пріоритетним завданням уже на початку 2010-х років [20]. Наша

держава з набуттям своєї незалежності мала всі умови для широкого впровадження контейнерних перевезень і входження до світової контейнерної мережі. Але з економічних та історичних причин транспортна мережа України мала найбільш налагоджені зв'язки з країнами СНД, із якими залізниці України мають однакову ширину колії. Тому для перевезення вантажів переважно використовували універсальні вантажні вагони. Україна має досить вигідне географічне положення, проте через брак контейнеризації транзитний потенціал нашої країни не використаний повністю (рис. 1).



Рис. 1. Діаграма змін обсягів перевезення контейнерів на АТ «Укрзалізниця»

На початку 2010-х років відбулося досить різке зростання залізничних контейнерних перевезень України. Через політичну кризу їхні обсяги зменшилися, але вже у 2016 році відновилося щорічне зростання, що склало 10-11 %. Свої корективи внесла повномасштабна війна, проте подальша ситуація стимулювала швидше зростання рівня контейнерних перевезень вже на 25-30 %. За стратегією АТ «Укрзалізниця», заплановано довести обсяги перевезень завантажених контейнерів до 1 млн TEU на рік до 2031 року [21]. При цьому частка інтермодальних перевезень у загальних обсягах АТ «Укрзалізниця» становила 3,4 %. Зокрема, на внутрішнє сполучення припало 43 %, а на експорт та імпорт приблизно однаково – відповідно 29 % та 28 %.

Підвищити рівень контейнерних перевезень рекомендують різні світові організації, зокрема Світовий банк. У його звіті «Транспортно-логістична система України: поточні та перспективні можливості та виклики» зазначено, що в майбутньому передбачено збільшення обсягів перевезень товарів із доданою вартістю, перехід на контейнерні

перевезення є складовою транспортної стратегії ЄС, відповідно до якої не менше 30 % вантажів має бути перевезено залізничним або водним транспортом, зокрема в контейнерах. На відміну від країн ЄС, в Україні сегмент залізничних контейнерних перевезень ще формується і потребує інвестицій і державної підтримки [22]. Тому для найбільш успішної інтеграції транспортної мережі України з європейськими державами контейнерні перевезення є важливою умовою.

Номенклатура вантажів, що перевозять у контейнерах, є досить нетиповою для такого типу тари (рис. 2). Втім сучасні виклики змушують перевізників шукати нові рішення. Наприклад, зерна перевозили раніше в хоперах-зерновозах, але їх застосування суттєво ускладнює процес перевезення в цілому через різну ширину колії в суміжних державах. До 2022 року пріоритетними вантажами в контейнерах були металургійні вироби та важкі вантажі, але станом на сьогодні основні виробники цієї продукції не функціонують, а продовольча потреба перевищила промислову.



Рис. 2. Номенклатура вантажів, перевезених у контейнерах в Україні у 2024 році

Одним із найбільших операторів контейнерних перевезень в Україні є структурний підрозділ АТ «Укрзалізниця» – Центр транспортного сервісу «Ліски». Мета Центру – розвиток контейнерної системи в Україні, розширення сфери діяльності залізничного транспорту України на внутрішньому і зовнішньому ринках, надання транспортних, експедиторських та інших послуг, регулювання парку контейнерів і фітінгових платформ, а також утримання їх у технічно справному стані. На сьогодні підрозділ має шість терміналів: Київський, Одеський, Дніпровський, Харківський, Сквиливський (поблизу Львова) і Чопський.

У 2023 році з метою надання експедиторських, навантажувально-розвантажувальних і складських послуг була заснована філія «Термінальний оператор» АТ «Укрзалізниця». Вона має 21 відділення в різних частинах України, які обладнані вантажними майданчиками, козовими кранами, фронтальними та малогабаритними навантажувачами, вантажними автомобілями, автокранами, складами і підвищеними колями.

Але першим випадком виходу АТ «Укрзалізниця» на європейський ринок став початок функціонування компанії «Ukrainian Railways Cargo Poland», що з'єднує своєю роботою перевезення Україною та європейськими країнами. Діяльність компанії спрямована також на інтеграцію системи вантажних перевезень України в європейський простір і встановлення прозорості та конкуренції для гідного висування АТ «Укрзалізниця» на міжнародній арені. У планах компанії надання комплексної послуги вантажоперевезень, координація роботи з вантажовласниками, європейськими операторами, прикордонними переходами, контроль та оперування рухомим складом колії 1435 та 1520 мм.

Серед приватних операторів контейнерних перевезень можна виділити трьох лідируючих компаній: «Левада-Карго» (Україна), «Laude» (Польща) і «N'UNIT» (Україна). Контейнерообіг цих компаній мав приблизно однакову динаміку: із початком війни відбулося досить різке падіння, але вже у 2023 році зафіксовано відновлення та навіть наближення до довоєнних показників. Наприклад, за даними «Laude», у 2021 році обсяги контейнерообігу склали 104,3 тис. TEU, у 2022 році – 61,2 тис. TEU, 2023 році – 89,3 тис. TEU. Компанія «N'UNIT» також звітувала про зростання у 2023 році приблизно у два рази порівняно з минулим роком.

Отже, можна зазначити, що сьогодні повільно, але впевнено відбувається процес інтеграції транспортної мережі України до європейської. Але не менш важливим питанням є шляхи пересування вантажів. Основний вантажообмін між Європою та Південно-Східною Азією був через Суецький канал, пропускна спроможність якого вже тоді була вичерпана. Аварія контейнеровоза «Ever Given» у

березні 2021 року, що викликала колапс світових вантажоперевезень, є зайвим підтвердженням пошуку альтернативних шляхів. У зв'язку з цим запропоновано створення інтермодальних терміналів в Україні. До війни основним видом міжнародних вантажних перевезень, що здійснювала АТ «Укрзалізниця», були саме транзитні вантажі. Тому основним напрямом роботи інтермодальних терміналів мала бути обробка контейнеропотоків, що перетинали кордон України. Зазначали, що робота таких терміналів дала б змогу прискорити просування міжнародних вантажопотоків, оптимізувати взаємодію різних видів транспорту і застосовувати комбіновані тарифи разом із поліпшенням сервісу. До недоліків належить значна вартість будівництва та експлуатації терміналів, ускладнення процесів доставлення вантажів та ймовірність неповного завантаження комплексів.

За довоєнної геополітичної ситуацією передбачали застосовувати розподіл терміналів на три класи [23]. Термінали класу А мали розташовуватися у транспортних вузлах і місцях із великою кількістю підприємств, що генерували б вантажопотік. Комплекси повинні мати значну площу та велику пропускну спроможність. Термінали класу В створювалися б на вхідних і вихідних точках транспортної системи (тобто поблизу кордонів і морських портів), а також у місцях із великим вантажопотоком. Їм не потрібно мати велику площу, але пропускна спроможність має бути підтримувана на високому рівні. Найменші за обсягами термінали класу С розраховані на менший вантажопотік у місцях із незначним вантажопотоком. Відповідно, їхня площа та пропускна спроможність може бути на нижчому рівні. Окрім цих факторів, для кожного терміналу створювали логістичний ланцюг переміщення вантажів.

Зазначені термінали передбачали впровадження схеми доставлення вантажів «від дверей до дверей». Цільову функцію цього введення можна виразити так [20]:

$$C_{\text{пер}} = C_{\text{тр}} + C_{\text{НРР}} + C_{\text{екс}} + C_{\text{ПДВ}} \rightarrow \min, \quad 1)$$

де $C_{\text{тр}}$ – транспортні витрати на перевезення різними видами транспорту, грн;

$C_{\text{НРР}}$ – вартість навантажувально-розвантажувальних робіт, грн;

$C_{\text{екс}}$ – витрати на транспортно-експедиторське обслуговування, грн;

$C_{\text{ПДВ}}$ – ПДВ (20 %) від загальної вартості перевезення, грн.

Цільову функцію в розгорнутому вигляді визначають як

$$C_{\text{пер}} = k(\sum_{i=1}^n T_i \cdot L_i + \Pi_{\text{од}} + \partial_{\text{ст}}) + \sum_{i=1}^n T_{\text{робі}} \cdot Q_{\text{ван}} + t_{\text{робі}} \cdot C_{\text{год}}^{\text{робі}} + C_{\text{зан}} + C_{\text{експ}}^{\text{робі}} \cdot t_{\text{експ}}^{\text{робі}} + C_{\text{ПДВ}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де k – кількість контейнерів;

T_i – тариф на перевезення різними видами транспорту порожнього та навантаженого контейнера відповідно, грн/км;

L_i – дальність перевезення порожнього контейнера під навантаження та доставлення його на залізничну станцію та з доставлення навантаженого контейнера із залізничної станції до місця розвантаження відповідно, км;

$\Pi_{\text{од}}$ – ціна одиниці вантажу, грн;

$\partial_{\text{ст}}$ – тариф на страхування одиниці вантажу (для гарантування відшкодування збитків у разі непередбачуваної ситуації), грн;

$T_{\text{робі}}$ – тариф i -го працівника, які здійснюють навантажувально-розвантажувальні роботи, грн/т;

$Q_{\text{ван}}$ – обсяг вантажу брутто, т;

$t_{\text{робі}}$ – час роботи працівників, год;

$C_{\text{год}}^{\text{робі}}$ – вартість однієї години роботи працівника, грн/год;

$C_{\text{зан}}$ – вартість замовлення послуги експедитора, грн;

$C_{\text{експ}}^{\text{робі}}$ – вартість години роботи експедитора, грн/год

$t_{\text{експ}}^{\text{робі}}$ – час роботи експедитора, год.

Результатом виконання умов цільової функції має бути мінімізація витрат на перевезення контейнерів. До його вартості входять витрати на переміщення контейнерів на конкретну відстань, витрати на працівників, що беруть участь у навантажувально-розвантажувальних роботах, та експедитора з урахуванням часу їхньої роботи. В умовах війни та складних економічних обставин важливо надати перевізникам максимальну можливість здійснювати вчасні поставки, особливо це стосується гуманітарних і військових вантажів. До того ж підвищення тарифів на перевезення, зростання цін на оплату праці та енергоносії можуть погіршити вантажообмін з іншими країнами, що негативно позначиться на економічному та військовому становищі держави.

Отже, така пропозиція не втратила актуальності, оскільки з часу її публікації інтермодальні перевезення територією України не набули належного розвитку. Але в реаліях війни, що почалася після висування вищезазначеного рішення, недоцільно створювати запропоновані термінали безпосередньо на території України. Можливе функціонування подібної системи комплексів на території держав, що межують з Україною, у рамках міжнародної концесії, за якою керівництво

відбудуватиметься українським оператором. Щодо території України, то доцільно підготувати пропозиції та проекти, які можна буде впровадити після завершення війни. Починати реалізацію системи можна із західних регіонів України, які знаходяться в найменшій групі ризику. Війна вплинула і на вартість перевезення, тому доцільно змінити цільову функцію шляхом додавання витрат, що пов'язані з воєнним станом:

$$C_{\text{пер}} = C_{\text{тр}} + C_{\text{НРР}} + C_{\text{екс}} + C_{\text{ПДВ}} + C_{\text{вс}} \rightarrow \min \quad (3)$$

де $C_{\text{вс}}$ – військові витрати.

Військові втрати включають додаткове страхування на випадок пошкоджень, пов'язаних із бойовими діями:

$$C_{\text{вс}} = k \cdot \Pi_{\text{од}} \cdot \partial_{\text{ст}}^{\text{доп}}, \quad (4)$$

де $\partial_{\text{ст}}^{\text{доп}}$ – додаткове страхування, пов'язане з пошкодженнями внаслідок бойових дій, %.

Вищезазначені термінали могли б стати не лише пунктами обробки масових вантажопотоків, а й цілими транспортно-логістичними центрами, до завдань якого входитимуть також організація ведення електронного документообігу та надання вантажовласникам можливості визначення місцезнаходження вантажу в режимі реального часу. Це можна реалізувати за допомогою систем автоматичної ідентифікації, таких як звична RFID або більш сучасна GPS. Створення подібних центрів доцільно поділити на три етапи [3]: становлення, тобто визначення оптимального місцезнаходження відповідно до розташування потенційних вантажовідправників і вантажовласників; впровадження технологій електронного документообігу; можливість обслуговування клієнтів за всіма напрямками роботи центру. До того ж головним принципом роботи транспортно-логістичних центрів має бути єдине інформаційне забезпечення не лише учасників логістичних процесів, а і державних органів інспекції для більшої прозорості процесів і забезпечення можливості швидких перевірок, що прискорить виявлення тінювих схем і, отже, мінімізує ризики корупції та незаконних дій у рамках перевезень. Також перевагою електронних систем документообігу є можливість швидкого доступу до інформації з її зберіганням за кордоном. Це актуально, оскільки через загрозу ударів по таких центрах паперові документи можуть бути втрачені, а за наявності електронних копій їх можна швидко відновити.

Найбільш ефективне функціонування транспортно-логістичних центрів може бути на базі транспортного вузла [3]. Це призведе до швидкого інформаційного обміну між учасниками логістичних ланцюгів, зниження невиробничих витрат для вантажовласників, підвищення гарантії доставлення міжнародних вантажів у контейнерах і збільшення доходів до місцевих і державного бюджетів. На сьогодні можна констатувати, що відбувається розвиток інтермодальних терміналів. Проте вони в більшості випадках належать різним компаніям, через що можуть виникати неузгодженість, недобросовісна конкуренція і марні грошові та часові витрати. Це є недопустимим під час війни, коли для життєздатності держави важливий кожен елемент бюджету, а будь-який час зволікання може негативно позначитися на житті та здоров'ї людей.

З метою усунення таких недоліків можна провести кластеризацію контейнерних інтермодальних терміналів, внаслідок якого утворяться логістичні кластери. Вони являють собою сукупність регіональних автотранспортних підприємств, представників-підприємств інших видів транспорту, логістичних фірм, ліцензійних складів, органів місцевої влади та науково-дослідних інститутів у формі асоціативного утворення з адекватним фінансуванням внесками учасників, наявною інфраструктурою, сучасними комунікаційними зв'язками, які посилюють взаємодію та переваги порівняно з іншими конкурентами, що дає змогу підвищити інвестиційну привабливість і стійкий розвиток регіональної території [24]. Створюючи подібні сукупності, потрібно враховувати досвід розвинених країн, що вибрали кластерну стратегію. За останні 30 років можна зазначити особливу ефективність подібних методів, оскільки інтеграція сприяла розвитку сучасних та інноваційних технологій.

Організація кластера можлива як за ініціативою з боку безпосередньо організацій, так і за підтримки державних програм. Водночас допускають допомогу іноземних організацій-донорів. Ураховуючи, що в наші часи економіка України знаходиться в незадовільному стані, варіант іноземного донорства має особливу актуальність. Але для будь-якого кластера необхідно створювати передумови. Розглянувши специфіку економічної географії України, слід зазначити, що основна маса підприємств була розташована на сході України. Тому їх можна було об'єднати в єдиний кластер, щоб підвищити рівень ефективності виробництва та покращити транспортне обслуговування. Проте сьогодні цей значущий регіон опинився в зоні активних бойових дій, а більшість підприємств було зруйновано. Тому розвиток цього регіону можна передбачати лише після закінчення війни. Західна ж частина країни є основними транспортними воротами України на сьогодні, тому допустимо формування кластера контейнерних інтермодальних терміналів

саме в цій частині. Особливо це стосується прикордонних терміналів, взаємодія між якими мінімізує виникнення простоїв вантажів і дасть змогу перенаправити вантажопотоки в разі перевантаження одного з таких терміналів. Усередині країни елементами кластера можуть бути транспортні вузли, так вони матимуть прямі зв'язки та буде пришвидшено просування вантажопотоків територією України. Після закінчення війни такий кластер буде якісною передумовою для включення транспортної системи України до загальноєвропейської.

Мережу контейнерних перевезень в Україні доцільно розглядати як загальну систему. При цьому вона є сукупністю підсистем, основним завданням яких є забезпечення доставлення вантажів від відправника до одержувача [12]. Сутність логістичного підходу полягає в дотриманні декількох факторів. Система доставлення від виробника до споживача має бути цілою та єдиною. Плануючи перевезення, виконавець потрібен враховувати вимоги споживача за часом, місцем доставлення, кількості та якості. Застосовують схему перевезення «від дверей до дверей», а загальні витрати на виконання всіх логістичних операцій мінімізують. Отже, обов'язково виконують такі логістичні принципи: необхідний вантаж доставляють у потрібне місце, за потрібний час у необхідних для споживача кількості та якості з мінімальними витратами. Для виконання зазначених вимог найбільш оптимальними можуть бути саме контейнерні перевезення.

У рамках транспортної мережі разом із великими хабами можна передбачити застосування розподільчих центрів, які отримували б товари великими партіями та розподіляли їх на більш дрібні для доставлення замовникам. Такі центри почали з'являтися ще до початку війни, але були зав'язані на морський транспорт. Їх створювали для підтримки функціонування системи розподілу вантажів, що є досить складним завданням. Загалом завданням розподільчих центрів було виконання операцій із групування вантажопотоків за їхнім призначенням. Географічне розташування таких комплексів визначали за допомогою визначення центра ваги системного розподілу, повного перебору або евристичного методу. Розподіляли вантаж із використанням економіко-математичних моделей транспортної задачі. У той же час такі методи призводили до допустимих, але не оптимальних рішень [12]



Рис. 3. Загальні функції розподільчих центрів

Для ефективної зв'язності розподільчих терміналів із вхідними та вихідними точками контейнеропотоків доцільно розглянути можливості формування окремих контейнерних поїздів. АТ «Укрзалізниця» вже має певний досвід роботи з поїздами такого типу. До початку війни поїзди, що склалися виключно з контейнерів, регулярно курсували як усередині України, так і за її межі. Вони пов'язували морські порти України і великі міста і промислові райони. На сьогодні значна частка вантажів проходить через сухопутні західні кордони, тому маршрути миті може опинитися під ударом і бути пошкодженим або знищеним, залишається високий ризик виникнення надзвичайних ситуацій. На жаль, зараз можна спостерігати збільшення частоти повітряних ударів по українських містах, при цьому збільшується кількість руйнувань. Але найбільш серйозними є численні людські втрати, також може бути завдана шкода економічній складовій держави, прикладом є удари по енергетичній інфраструктурі. Тому можуть виникати ситуації, коли деякий вантаж з-за кордону необхідно доставити швидко, якісно та надійно. Це особливо актуально, оскільки стосується безпеки та життя людей. Не менш впливовими є військові вантажі, від швидкості доставлення яких може залежати ситуація в зонах активних бойових дій та обороноздатність країни. Для таких вантажів доцільно передбачити додаткові рейси контейнерних поїздів. При цьому заплановані відправлення можуть бути зміщені. Такі позачергові контейнерні рейси можуть вплинути не лише на контейнерні відправлення конкретного напрямку, а й на рух інших вантажних і навіть пасажирських поїздів, які рухатимуться із

затримками. Проте за умови безсумнівної важливості таких рейсів для життя людей і обороноздатності країни їх швидке просування до пунктів призначення є необхідною мірою.

Отже, слід допустити можливість позачергових відправлень контейнерних поїздів і врахувати їх у загальному інтервалі відправлення:

$$I_{\text{кп}} = \frac{m_{\text{кп}} - \alpha \cdot m_{\text{ек}}}{u_{\text{доб}}}, \quad (6)$$

де $m_{\text{кп}}$ – норма кількості вагонів у складі контейнерного поїзда (одна фітінгова платформа може перевозити один 40-футовий або два 20-футові контейнери; орієнтовна довжина поїзда – близько 40-50 вагонів-платформ), ваг;

$m_{\text{ек}}$ – кількість вагонів з екстремим вантажем, ваг;

α – коефіцієнт, що враховує наявність контейнерів з екстремим вантажем, 0 або 1;

$u_{\text{доб}}$ – розрахунковий розмір добового вагонопотоку, ваг.

Важливою часткою загального часу перевезення контейнерів через мережу є їх обробка в контейнерних терміналах. Існує досить велика кількість засобів прискорення цього процесу. Проте деякі з них можуть мати невелику вартість, але малу ефективність, інші, навпаки, мати високу ефективність, але потребувати значних вкладень. Серед усіх варіантів потрібно вибрати найбільш

оптимальний. При цьому необхідно враховувати останні технологічні зміни та наявні можливості. Найбільш сучасні термінали у країнах Західної Європи мають автоматичні навантажувачі, які можуть працювати без втручання операторів. Існують й інші сучасні технології, які потребують значних грошових вкладень. Впровадження таких технологій для застосування на території, яка постійно опиняється під повітряними ударами, може бути недоцільним. Водночас існує потреба в усуненні негативного впливу людського фактора, зменшенні витрат на оплату праці та досягненні максимальної безпеки для проведення виробничих процесів. Окрім того, необхідно забезпечити найбільш прозору взаємодію між різними операторами, що беруть участь у перевезенні.

Одним із таких способів може бути автоматизація процесів обробки контейнерів і взаємодії між терміналами та перевізниками. Вона може бути виконана у вигляді створення основи для системи підтримки ухвалення рішень (СППР). Така модель розроблена на основі імовірнісного підходу для взаємодії з морським транспортом [11]. Водночас вона є ефективною саме для взаємодії з морським транспортом. У наступних дослідженнях доцільно розглянути можливість її адаптації для сухопутних контейнерних перевезень через кордон України.

Стосовно контейнерних терміналів найбільш перспективною є цифровізація внутрішніх операцій. Вона дає змогу досягти зростання продуктивності та стійкості, зменшення витрат і часу на операції, удосконалення інформаційних потоків і процесу ухвалення рішень, скорочення паперового документообігу, просування інновацій і розвитку, а також полегшити пристосування терміналу до ринкових і політично-економічних вимог, що швидко змінюються в сучасному світі. За останні декілька років доволі значного розвитку зазнала нейронна мережа, яка високо зарекомендувала себе у вирішенні складних завдань. До того ж вона має можливість висувати точні прогнози завдяки її здатності до узагальнення та виділення прихованих залежностей між вхідними та вихідними даними. Іншою здатністю нейронної мережі є ведення електронної документації, завдяки чому мінімізовано вплив людського фактора та підвищено точність даних із перевезень.

Перевезення вантажів через кордон потребує митного контролю та відповідних перевірок. Ураховуючи, що обсяги перевезень через сухопутний кордон суттєво збільшилися, з'явилася необхідність застосовувати більш досконалі засоби контролю для забезпечення підвищення швидкості проведення митних процедур і результативності виявлення можливих порушень. За словами очільника Державної митної служби України, до кінця 2025 року перші залізничні сканери для моніторингу вагонів і контейнерів мають з'явитися поблизу станцій Мостиська-2 і Ягодин, що розташовані на кордоні з

Польщею [25]. Вони будуть призначені для неінтрузивного контролю, що означатиме перевірку відповідності вмісту контейнерів задекларованим даним у документах без додаткових втручань. Для запобігання фіксації пасажирських вагонів і локомотивів сканери оснащені спеціальними компонентами та програмним забезпеченням. Процес сканування буде повністю автоматизованим, а обладнання зможе працювати цілодобово для поїздів, що рухатимуться як в Україну, так і за кордон. Пізніше такі системи планують встановити на кордоні зі Словаччиною та Румунією. Отже, автоматизація поступово розширює можливості контейнерних перевезень в Україні.

Слід зазначити, що більшість вищезазначених наукових пропозицій розробляли та висували в мирні часи, коли вантажопотоки мали зовсім інший основний напрямок, а Україну розглядали як стратегічного учасника транспортного коридору Захід – Схід. Станом на сьогодні подібні коридори територією України мають доволі невеликі перспективи. Особливо це стосується транзитних вантажів. Як вантажовідправники, так і вантажоодержувачі мають на меті переміщення вантажів із найменшими ризиками, тому навіть за більшої вартості вони будуть надавати перевагу обхідним маршрутам. Виходячи з цього, слід розраховувати, що для переважної більшості вантажів пунктом відправлення або призначення буде саме Україна. Водночас для нашої держави ці вантажі можуть мати чималий позитивний вплив, тому втілення подібних ініціатив на цьому етапі геополітичного становища може відбуватися саме в інтересах України.

Крім військового фактора, чималий вплив має фактор інфраструктури. На західних кордонах розташована певна кількість прикордонних переходів із різною пропускнуною спроможністю. Водночас важливо врахувати пропускну спроможність залізничних ліній, що з'єднують кордони з основною частиною України. Держава має досить розвинену залізничну мережу, основними елементами якої є двоколіїні електрифіковані лінії. Саме вони мають найбільші обсяги руху. На заході України можна виділити два основних прикордонних переходи – Мостиська та Чоп. Вони мають залізничні підходи, але з проходженням цих пунктів переважна більшість вантажів перетинатиме Львівський залізничний вузол. Унаслідок цього можливе виникнення ризиків перевантаження цього вузла. Альтернативою маршрутів через Львів можуть бути вантажопотоки через Ковель і Ягодин як найкоротший шлях до Варшави та польських морських портів, але через незадовільний стан залізничного колійного господарства та відсутність електрифікації ця ділянка не може пропускати велику кількість вантажів. Водночас цей напрямок є важливим. Він може стати частиною міжнародного інтермодального маршруту Клайпеда – Київ через територію Польщі, що є одним

із пунктів меморандуму між АТ «Укрзалізниця» і LTG Group, підписаного у травні 2024 року [26]. Отже, розвиток цього напрямку може підвищити привабливість міжнародних контейнерних перевезень.

Унаслідок воєнного стану та прямої загрози повітряних ударів по будь-яких об'єктах, що розташовані на території України, актуальним є питання створення вантажних хабів поблизу суміжних із нашою державою прикордонних пунктів або на шляху основних вантажопотоків. Найбільш зацікавленою стороною є наша держава, тому вона має брати найбільшу участь у відповідних процесах. АТ «Укрзалізниця» уже має досвід роботи на європейському ринку через європейського оператора «Ukrainian Railways Cargo Poland», що з'єднує своєю роботою перевезення Україною та європейськими країнами [27]. Також прикладом є польський приватний перевізник «Laude», що здійснює перевалку вантажів з України на власному терміналі в польському Замості поблизу кордону з Україною.

Поступово вдосконалюють законодавчу базу, пов'язану з контейнерними перевезеннями. Закон України «Про мультимодальні перевезення» розширив наявну законодавчу базу та запровадив правові механізми для ширшого використання мультимодальних/контейнерних вантажних перевезень у транспортній системі України. Контейнерні перевезення в межах України здійснюються за Правилами перевезення вантажів в універсальних контейнерах і Правилами перевезення вантажів у спеціальних і спеціалізованих контейнерах відправників та одержувачів. Міжнародні контейнерні перевезення регулюються пунктом 15 розділу III Правил перевезень вантажів (додаток 1 до СМГС) і Конвенцією про міжнародні залізничні перевезення (КОТІФ). Відкриття і функціонування будь-якого представництва або філії в іншій країні має відбуватися за законодавством цієї країни. Отже, потреби України у вантажних перевезеннях гармонізуватимуться із законами країн Європи.

Дослідження було б неповним, якщо не розглянути рішення, що були висунуті зарубіжними науковцями. Слід зазначити, що тема контейнерних перевезень за кордоном має високий попит у розвинених країнах і тих, що розвиваються. Тому досить велика кількість наукових праць складена вченими з країн Західної Європи, Північної Америки та Південно-Східної Азії. Найбільш привабливою для України могла б бути ідея сухих портів, які зараз знаходяться у стані розвитку.

Сухі порти є контейнерними терміналами, що виконують первинні портові функції [9]. Причиною їхнього розвитку у країнах Європи стало збільшення вантажопотоків, що проходять через порти, через що наявних портових площ стало недостатньо. Концепція сухого порту в азіатських та африканських країнах передбачає здійснення перевезень контейнерів із пункту відправлення до пункту призначення без

проміжного митного огляду. Завдяки цьому перевізники мають можливість здійснювати безперервні інтермодальні перевезення, що є досить важливим для країн, які не мають вихід до моря. Відстань до морських портів може бути до 1000 км, тобто така концепція прийнятна для портів Польщі або Румунії відносно України. Сухі порти можуть знаходитися як у державній, так і приватній власності. Єдиною спільною рисою таких терміналів є щоденне залізничне сполучення з морськими портами. Отже, реалізувати це можна завдяки прикордонним сухим портам, до яких будуть підведені залізничні колії шириною 1435 мм. Недоліками їх впровадження можуть бути екологічні наслідки, зайняття значних земельних ділянок і необхідність вкладання значних фінансових ресурсів. У той же час сухі порти стимулюють розвиток промисловості, надають нові робочі місця та покращують обслуговування клієнтів. Це забезпечуватиметься завдяки нижчим транспортним витратам, швидшому транспортуванню контейнерів до/з морських портів, швидшому митному оформленню та нижчим тарифам на зберігання.

Незважаючи на те, що сухий порт може бути у приватній власності, уряд має відігравати певну роль у формулюванні відповідної політики та регуляторного контролю, щоб сприяти розвитку сухих портів і дотримуватися екологічних вимог [24]. Обґрунтувати розвиток сухого порту можна фінансовими або економічними факторами. До того ж за останнє десятиліття великого впливу набув екологічний фактор, який найбільш реалізований саме за допомогою концепції сухих портів. Тому, зважаючи на приклади країн, що розвиваються, доцільно розглядати впровадження концепції з портами Польщі або Румунії.

Висновки.

За результатами огляду наукових публікацій було виявлено та відтворено спробу пристосувати до сучасних умов найбільш корисні рішення. Одним із них є розподіл контейнерних терміналів на три класи, а також впровадження схеми доставлення «від дверей до дверей». В умовах війни найбільш доцільним є функціонування системи комплексів на території держав, що межують з Україною, у рамках міжнародної концесії під керівництвом України. Створення таких логістичних центрів доцільно поділити на три етапи: становлення, впровадження електронного документообігу та обслуговування клієнтів за всіма напрямками роботи центру.

Корисним рішенням є ідея кластеризації контейнерних терміналів, внаслідок чого утворюються логістичні кластери. Вони являють собою сукупність регіональних перевізників, логістичних фірм, підприємств та інших зацікавлених сторін. Найбільш показовим є приклад розвинених країн, де за останні тридцять років така інтеграція сприяла розвитку сучасних та інноваційних технологій. У випадку України доцільно впроваджувати кластери

прикордонних терміналів, оскільки взаємодія між ними мінімізує виникнення простоїв вантажів і дасть можливість перенаправити вантажопотоки в разі перевантаження одного з таких терміналів.

Якщо розглядати мережу контейнерних перевезень в Україні як загальну систему, то можна передбачити застосування розподільчих центрів. До їхніх функцій належать управління транспортними потоками та їх розподілом, складування і групування товарів. Для ефективної зв'язності таких центрів доцільно розглянути можливості формування контейнерних поїздів, із якими АТ «Укрзалізниця» уже має певний досвід роботи. Також підвищенню ефективності сприятиме впровадження автоматизованих технологій і СППР.

Тему контейнерних перевезень широко вивчають за кордоном. Одним із найбільш корисних рішень є впровадження концепції сухого порту як допоміжного терміналу для морських портів. Обґрунтувати його розвиток можна як фінансовими, так і економічними факторами, а основними морськими портами для них можуть стати термінали Польщі та Румунії.

Список використаних джерел

1. Андрієнко М. М. Оцінка ефективності контейнерних перевезень на транспорті. *Ефективна економіка*. 2011. № 10. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=728> (дата звернення: 07.02.2025).
2. Андрієнко М. М. Оцінювання ефективності контейнерних перевезень на залізниці. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2015. № 4(4). С. 133–139.
3. Тимошук О. М., Мельник О. В. Роль транспортно-логістичних центрів в сучасних логістичних технологіях транспортування. *Ефективна економіка*. 2012. № 11. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2290> (дата звернення: 07.02.2025).
4. Features of formation and prospects of development transport and logistic clusters / P. G та ін. *The National Transport University Bulletin*. 2020. Т. 1, № 46. Р. 274–282. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-274-282> (дата звернення: 07.02.2025).
5. Про мультимодальні перевезення : Закон України від 17.11.2021 р. № 1887-IX : станом на 01.01.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text> (дата звернення: 07.02.2025).
6. Maglić L., Gulić M., Maglić L. Optimization of container relocation operations in port container terminals. *Transport*. 2019. Т. 35, № 1. Р. 37–47. URL: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.11628> (дата звернення: 07.02.2025).
7. Yih-Ching Juang. Modeling Inland Intermodal Container Transport Systems in Taiwan. *The SIJ Transactions on Advances in Space Research & Earth Exploration*. 2017. Т. 5, № 6. Р. 1–6. URL: <https://doi.org/10.9756/sijasree/v5i6/0204500101> (дата звернення: 07.02.2025).
8. Khaslavskaya A., Roso V. Dry ports: research outcomes, trends, and future implications. *Maritime Economics & Logistics*. 2020. Т. 22, № 2. Р. 265–292. URL: <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00152-9> (дата звернення: 07.02.2025).
9. Roso V., Lumsden K. A review of dry ports. *Maritime Economics & Logistics*. 2010. Т. 12, № 2. Р. 196–213. URL: <https://doi.org/10.1057/mel.2010.5> (дата звернення: 07.02.2025).
10. Костенніков О. М. Перспективи розвитку контейнерних поїздів у напрямку міжнародних транспортних коридорів та територією України. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* 2013. Вип. 140. С. 102–105.
11. Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи інтермодальних перевезень / Л. О. Пархоменко, В. М. Прохоров, Т. Ю. Калашнікова, О. Е. Шандер. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 29–42.
12. Піддубна Н. М., Кирічок А. В. Оптимізація розташування розподільних центрів в логістичній підсистемі розподілу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Серія «Фізичні науки»*. 2019. № 3 (251). С. 135–143.
13. Формування термінальної системи розподілу товарів у разі їх перевезення залізницею / Д. В. Ломотько, В. М. Ільчишин, М. Д. Ломотько, Д. В. Кудряшов. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2024. Вип. 210. С. 217–226.
14. Tavasszy L. A., Behdani B., Konings R. Intermodality and Synchromodality. *SSRN Electronic Journal*. 2015. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2592888> (дата звернення: 20.08.2025).
15. A Review on Intermodal Transportation and Decarbonization: An Operations Research Perspective / M. M. Ferguson та ін. arXiv.org e-Print archive. URL: <https://arxiv.org/html/2503.12322v1> (дата звернення: 20.08.2025).
16. Abu-Aisha T., Audy J.-F., Ouhimmou M. Toward an efficient sea-rail intermodal transportation system: a systematic literature review. *Journal of Shipping and Trade*. 2024. Т. 9, № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s41072-024-00182-z> (дата звернення: 20.08.2025).
17. Predicting container intermodal transport arrival times: An approach based on IoT data / R. Barlogis та ін. *Internet of Things*. 2024. 101460. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101460> (дата звернення: 20.08.2025).
18. Wang L., Fu S. Container Multimodal Cooperative Transportation Management Information System Based on Artificial Intelligence Technology. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Т. 2021. Р.

1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/1272221> (дата звернення: 20.08.2025).

19. The influence of China-Europe Railway Express on the production system of enterprises: A case study of TCL Poland Plant / H. Liu та ін. *Journal of Geographical Sciences*. 2021. Т. 31, № 5. Р. 699–711. URL: <https://doi.org/10.1007/s11442-021-1866-4> (дата звернення: 20.08.2025).

20. Петрушов В. В., Кривцун М. О. Проблеми інтермодальних перевезень в Україні. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. «Нові рішення в сучасних технологіях»*. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. № 70 (1043). С. 86–91.

21. Агроновини. Зерно займає половину контейнерних перевезень залізницею – AgroPortal.ua. URL: <https://agroportal.ua/news/ukraine/zerno-zaymaye-polovinu-konteynernih-perevezen-zalizniceyu> (дата звернення: 18.06.2025).

22. Ukraine's Transport and Logistics System : Current and Prospective Opportunities and Challenges / E. E. Echeverria та ін. Washington, D.C. : World Bank Group, 2025. 57 с. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documentdetail/099061725033525342> (дата звернення: 02.07.2025).

23. Підвисоцький В. Г., Палпу Т. В. Транскордонні кластери: європейський досвід створення та розвитку. *Формування ринкових відносин в Україні*. 2011. № 4. С. 28.

24. Cullinane K., Bergqvist R., Wilmsmeier G. The dry port concept – Theory and practice. *Maritime Economics & Logistics*. 2012. Т. 14, № 1. Р. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1057/mel.2011.14> (дата звернення: 20.08.2025).

25. В Україні з'являться перші скануючі системи для огляду залізничних вагонів та контейнерів. Державна Митна Служба. URL: <https://customs.gov.ua/news/zagalne-20/post/v-ukrayini-ziaivliatsia-pershi-skanuiuchi-sistemi-dlia-ogliadu-zaliznichnikh-vagoniv-ta-konteyneriv-2088> (дата звернення: 02.04.2025).

26. УЗ і LTG Group будуть розвивати інтермодальний маршрут Клайпеда–Київ. Rail.insider – інформаційно-аналітичне видання про залізницю в Україні. URL: <https://www.railinsider.com.ua/uz-i-ltg-group-budut-rozvyvaty-intermodalnyj-marshrut-khajpeda-kuiv/> (дата звернення: 20.08.2025).

27. Укрзалізниця виходить на європейський ринок: зареєстровано оператора Ukrainian Railways Cargo Poland. Акціонерне товариство «Українська залізниця». URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/615632/ (дата звернення: 20.08.2025).

H. Prymachenko, G. S. Pashchenko RESEARCH OF PROPOSALS AND LOGISTICS SOLUTIONS IN THE FIELD OF INTERNATIONAL AND INTERNAL CONTAINER TRANSPORTATION IN UKRAINE

Abstract. The paper analyzes and selects the most relevant scientific proposals for the development of container transportation by Ukrainian and foreign scientists. The main reason for the revision of scientific ideas is the rapid change in political and economic conditions, which is why the proposals put forward, which were of considerable benefit, require adaptation to new circumstances. The globalization of traffic flows is an important factor in international trade, so modern society needs not only efficient but also the fastest possible exchange of important goods. Global conflicts can both impede and accelerate the development of logistics systems. The possibility of integrating Ukraine's transport system into the European one using terminal distribution is determined. Such a proposal exists, but it is designed for transit transportation, which can only be considered in the long term. The most efficient functioning of transport and logistics centers can be based on a transport hub. The proposed clustering of terminals, which will result in the formation of a set of different enterprises in the form of an association, will reduce the risks associated with unauthorized human intervention and corruption. This could also be facilitated by the digitalization of internal operations at container terminals. Intermodal terminals could become not only points of handling massive cargo flows, but also entire transport and logistics centers, whose tasks would also include organizing electronic document management and providing cargo owners with the ability to determine the location of cargo in real time. This can be realized with the help of automatic identification systems, such as the usual RFID or the more modern GPS. Foreign scientists often develop the idea of dry ports, which can help to establish the most effective interaction between seaports and cargo owners located in remote places from the sea coast. In addition, they help to solve the problem of lack of available port space. Dry ports can be both state-owned and privately owned. The most significant examples of dry ports for Ukraine are those in Romania and Poland.

Keywords: cargo distribution, cluster, container transportation, digitalization, dry port, intermodal terminal.

Примаченко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7326-8997. Тел.: +38 (066) 567-97-72. E-mail: gannaprymachenko@kart.edu.ua.

Пашенко Георгій Сергійович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0008-7699-2399. Тел.: +38 (067) 918

51-18. E-mail: pashegor2000@gmail.com.

Prymachenko Hanna, PhD (Tech). Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7326-8997. Tel.: +38 (066) 567-97-72. E-mail: gannaprymachenko@kart.edu.ua.

Pashchenko Heorhii, postgraduate student, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0008-7699-2399. Tel.: +38 (067) 918-51-18. E-mail: pashegor2000@gmail.com.

Редакційна колегія

Бабасв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Бутько Т. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Гаврилюк В. І., д.ф.-м.н., професор,
Український державний університет науки і технологій;

Доценко С. І., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ;

Жуковицький І. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і технологій;

Каргін А. О., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Климаш М. М., д.т.н., професор,
НУ «Львівська політехніка»;

Zbigniew Łukasik Kazimierz Pulaski
University of Humanities and Technology in
Radom, Professor;

Ловська А.О д.т.н.,проф. УкрДУЗТ

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Mareks Mezitis, Dr.sc.ing., Head of Scientific
Institution Transporta Akadēmija, Rīga,
Latvija;

Мойсеєнко В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Панченко С. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;
головний редактор;

Рубан І. В., д.т.н., професор, ХНУРЕ;

Серков О. А., д.т.н., професор, НТУ
«ХП»;

Скалозуб В. В., д.т.н., професор,
Український державний університет науки і технологій;

Трубчанінова К. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Thierry Horsin, Enseignant chercheur au
CNAM (PU);

Юрай Герліці , доктор інженерії,
професор, почесний професор, завідувач
кафедри Транспорт та під'омно-транспортна
техніка

Жилінського університету (Словаччина)

Штомпель М. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

© Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti

Суб'єкт у сфері друкованих медіа R30-06148, за рішенням № 947 Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення, протокол № 11 від 01 травня 2025

ISSN 2413-3833 (Online), ISSN 1681-4886 (Print)
Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de l'ISSN, 75002 PARIS, France.

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17 березня 2020 р. зі змінами від 02.07.2020 р. № 886)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/+++++p24787015,3.html>), Google Scholar (<https://scholar.google.com>), науково-видавничої платформи «Наукова періодика України» (<http://jks.kart.edu.ua>).

Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 8 від 22 вересня 2025 р.

Рецензування проводиться конфіденційно за принципами double-blind

Статті друкуються мовою оригіналу

Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився

Передрук матеріалів – тільки з дозволу редакції журналу

Індекс журналу у Каталозі передплатних видань України – 48707

Адреса редакції: Україна, 61050, Харків-50,
площа Фейсрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 318.

Тел.: (057) 730-19-37, 730-10-82. E-mail:
ndch.ukrsurt@ukr.net

Відповідальний за випуск Харін Р.О.
Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 22.09.2025 р. Формат 60x84 ¹/₈.

Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №

Наклад 50 прим. Ціна договірна.

Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.

Видавець та виготовлювач

Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, площа Фейсрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.