

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

**ЗБІРНИК
НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

СЕРІЯ

**«ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ
І ТЕХНОЛОГІЇ»**

ВИПУСК 39

Київ·ДУІТ·2022

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

**STATE UNIVERSITY OF INFRASTRUCTURE
AND TECHNOLOGIES**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
PAPERS**

**OF THE STATE UNIVERSITY
OF INFRASTRUCTURE AND TECHNOLOGIES**

SERIES

«TRANSPORT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES»

ISSUE 39

Kyiv·SUIT·2022

УДК 656:62

Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 39. К.: ДУІТ, 2022. 280 с. DOI:10.32703/2617-9040-2022-39

Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series "Transport Systems and Technologies". № 39. K.: SUIT, 2022. 280 p. . DOI:10.32703/2617-9040-2022-39

ISSN 2617-9040

Збірник містить статті, присвячені теоретичним, методологічним і прикладним проблемам транспортної галузі. У статтях збірника розглядаються питання транспортної інфраструктури та рухомого складу, технології та організації транспортних процесів, інформаційних та комп'ютерних технологій на транспорті, математичного моделювання об'єктів транспорту, екологічної безпеки на транспорті.

Для науковців, викладачів, студентів вищих навчальних закладів і працівників транспорту та зв'язку.

The collection contains articles devoted to theoretical, methodological and applied problems of the transport industry. The articles of the collection consider the issues of transport infrastructure and rolling stock, technology and organization of transport processes, information and computer technologies in transport, mathematical modeling of transport facilities, environmental safety in transport.

For researchers, teachers, students of higher educational institutions and transport and communications workers.

Редакційна колегія:

О.М. Горобченко, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», ДУІТ (головний редактор);

Н.С. Брайковська, кандидат технічних наук, професор, ректор ДУІТ (заступник головного редактора);

В.М. Твердомед, кандидат технічних наук, доцент, директор Київського інституту залізничного транспорту, ДУІТ (заступник головного редактора);

О.В. Фомін, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», ДУІТ (заступник головного редактора);

Ю.П. Дудник, кандидат педагогічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи, ДУІТ;

Е.І. Даніленко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», ДУІТ, академік Транспортної академії України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Заслужений діяч науки і техніки України;

О.І. Стасюк, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», ДУІТ, член-кореспондент Транспортної академії України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки;

В.К. Мироненко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Управління комерційною діяльністю залізниць», ДУІТ, академік ТАУ, академік Міжнародної академії життєдіяльності;

В.П. Ткаченко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», ДУІТ;

Л.І. Тимченко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Системи штучного інтелекту та телекомунікаційні технології», ДУІТ;

В.М. Самсонкін, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Управління процесами перевезень», ДУІТ;

С.Ю. Сапронова, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», ДУІТ;

М.Б. Кельріх, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», ДУІТ;

В.М. Іщенко, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри «Вагони та вагонне господарство», ДУІТ;

В.В. Косарчук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка», ДУІТ;

О.Г. Стрелко, доктор історичних наук, професор, декан факультету «Управління залізничним транспортом», ДУІТ;

О.А. Герцій, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», ДУІТ;

С.А. Ісаєнко, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри «Іноземні мови», ДУІТ;

О.Я. Пилипчук, доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри «Екологія та безпека життєдіяльності», ДУІТ;

В.І. Мацюк, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Торговельне підприємництво та логістика» Київського національного торговельно-економічного університету;

О.М. Шикун, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Комп'ютерні науки» Державного університету телекомунікацій;

Б.Г. Любарский, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електричний транспорт і тепловозобудування» НТУ «Харківський політехнічний інститут»;

А.П. Фалендиш, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортні технології підприємств» Приазовського державного технічного університету;

А.В. Прохорченко, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Управління експлуатаційною роботою» Українського державного університету залізничного транспорту;

В.Г. Пузир, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу» Українського державного університету залізничного транспорту;

А.В. Путьято, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Локомотиви» Білоруського державного університету транспорту (Республіка Білорусь);

С. Мечніковський (S. Mieszniowski), Dr. hab., Prof., кафедра ринку транспортних послуг, Гданський університет (Польща);

С. Андонова (S. Andonova), Assoc. Prof. Eng., PhD, декан інженерного факультету Південно-Західний університет "Неофіт Рилські" (Болгарія);

Ю. Герліці (J. Gerlici), Prof., Dr. Ing., завідувач кафедри транспорту та підйомно-транспортних машин Жилінського університету (Словацька Республіка);

В. Хаусер (V. Hauser), Ing., PhD, науковий співробітник кафедри транспорту та підйомно-транспортних машин Жилінського університету (Словацька Республіка);

Я. Діжо (J. Dižo), Ing., PhD, доцент кафедри транспорту та підйомно-транспортних машин Жилінського університету (Словацька Республіка);

Р. Кершис (R. Keršys), PhD, Assoc. Prof., кафедра транспортної інженерії, Каунаський технологічний університет (Литва);

Г.М. Голуб, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», ДУІТ (технічний секретар);

І.О. Саяніна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Системи штучного інтелекту та телекомунікаційні технології», ДУІТ (технічний секретар).

Статті збірника проходять обов'язкове сліпе рецензування членами редакційної колегії та залученими рецензентами, друкуються мовою оригіналу. Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився.

The articles of the collection undergo mandatory blind peer review by members of the editorial board and invited reviewers, and are printed in the original language. The editorial board does not necessarily share the author's opinion and is not responsible for the factual errors that he made.

Рекомендовано до друку Вченою радою ДУІТ (протокол № 6 від 31 травня 2022 р.).

Recommended for publication by the Academic Council of DUIT (Minutes № 6 of May 31, 2022).

Засновник і видавець – Державний університет інфраструктури та технологій
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23070-12910ПП від 27.12.2017

Founder and Publisher - State University of Infrastructure and Technologies
Certificate of state registration KB № 23070-12910PP dated 27.12.2017

Збірник внесено до Переліку наукових фахових видань України,
в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора та кандидата наук у технічній галузі

(Додаток 11 до наказу Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 № 1528)
та відноситься до категорії "Б" (відповідно до Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15 січня 2018 року № 32) періодичних фахових видань України.

<https://tst.duit.in.ua/>

© Державний університет інфраструктури та технологій, 2022

Володимир Демченко^{1*}, Сергій Гулак², Олексій Демченко³, Денис Заїка⁴

¹ Доцент, Кафедра Електромеханіка та рухомий склад залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-2478-364X>

² Доцент, Кафедра Електромеханіка та рухомий склад залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

³ Аспірант, Кафедра Залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-5344-9301>

⁴ Аспірант, Кафедра Електромеханіка та рухомий склад залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0693-9580>

* Автор, відповідальний за листування: dem4enko.vo@gmail.com

ВПЛИВ ПРОФІЛЮ КОЛЕСА ТА ТВЕРДОСТІ НА СТІЙКІСТЬ КОЛІЇ З РІЗНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ СКРІПЛЕНЬ

Анотація. Виконані експериментальні дослідження щодо встановлення технічних параметрів проміжних рейкових скріплень щодо забезпечення поздовжньої стійкості рейкових ниток, встановлення технічних параметрів проміжних рейкових скріплень щодо забезпечення поздовжньої стійкості рейкових ниток. Проаналізовані дослідження впливу технічних характеристик твердості при взаємодії рейки та колеса і їхнього впливу на рівень поздовжніх сил взаємодії між елементами колії та коліс рухомого складу в експлуатації на залізницях України. Після початку експлуатації колісних пар з збільшеним значенням твердості порушилося оптимальне співвідношення твердості рейкової і колісної сталі. З різних джерел щодо взаємодії рейки та колеса відомо, що кращу зносостійкість в парі тертя виявляють метали з приблизно однаковою твердістю. На основі отриманих даних виконані розрахунки та проведений їхній аналіз з розробкою рекомендацій щодо подальшої експлуатації.

Ключові слова: рейкова колія, стійкість руху, горизонтальні сили, поздовжні сили, проміжні скріплення.

Вступ. Залізничний транспорт України розвинута галузь господарства з потужною інфраструктурою. Крім того, на українських залізницях досить складні умови експлуатації, які характеризуються суміщеним рухом поїздів, при якому одними магістралями рухаються як пасажирські поїзди, так і вантажні поїзди. Все це ускладнює умови експлуатації. Тому проблема взаємодії рейок з колесами є досить актуальною і на даний час.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Підвищений знос пари «рейка – колесо», зменшення життєвого циклу бандажа, обумовило виникнення великої кількості досліджень з проблем зниження силової та фрикційної взаємодії в системі «колесо – рейка», яка на даний час окрім значної економічної складової має безпосередній вплив на безпеку руху. Наведено аналіз впливу змінних умов експлуатації та технічних характеристик взаємодії пари «рейка – колесо» на знос поверхні катання коліс та поверхні кочення рейок.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у визначенні впливу твердості взаємодіючих елементів на їхній знос, при різних конструкціях скріплень та різних ступенях зносу колісних пар. Із зміною значення твердості поверхні кочення колісних пар порушилось оптимальне співвідношення твердості рейки та коліс рухомого складу в результаті виникло

підвищення зношування елементів які мають менше значенням твердості. Відповідно до мети в роботі були поставлені такі завдання дослідження: встановлення технічних параметрів скріплень щодо забезпечення стійкості рейкових ниток. Дослідження проводились у декілька етапів:

1. Підбір ділянок для проведення експериментальних досліджень з різними конструкціями ВБК при різних експлуатаційних умовах.

2. Розробка методики проведення експериментальних досліджень щодо стійкості колії та зміни профілю колісних бандажів у процесі експлуатації.

3. Проведення експериментальних досліджень щодо стійкості колії та параметрів колісних пар локомотивів.

4. Обробка отриманих даних їх аналіз та розрахунки силової взаємодії.

Узагальнення результатів дослідження, формування висновків та розробка рекомендацій. Виходячи з мети дослідження основними критеріями для вибору експериментальних ділянок були: тип проміжного скріплення, вантажонапруженість, пропущений тоннаж.

Основні експериментальні дослідження проводились на безстиківій колії в межах магістральних ділянок залізниці та в локомотивному депо. Крім того частина експериментальних даних була отримана на контрольних ділянках розміщених на виробничо-навчальному полігоні університету, що містить ділянки колії зі скріпленнями типів: КБ, КПП-1(СБ-3), КПП-5.

Окремо підбрано ділянки з найбільшою вантажонапруженістю, які розглядалися при обґрунтуванні розширення сфер застосування скріплення КПП-5. Основними характеристиками ділянок були безстикова колія, рейки типу Р-65, УІС60, шпали залізобетонні, баласт щебеневий, проміжні рейкові скріплення типів: КБ, КПП-1(СБ-3), КПП-5, вантажонапруженість ділянок від 20 до 60 та вище млн. т км бруто/ км за рік, швидкість руху пасажирських від 100 до 160 км/год, вантажних – 70 і 80 км/год, рухомий склад який занходиться в експлуатації на залізницях України – типові конструкції вагонів; локомотиви ВЛ-80, ЧС-4, ЧС-8, ДС-3; електропоїзди: Hyundai Rotem, ЕКр1 «Тарпан».

У процесі експлуатації елементи проміжного рейкового скріплення піддаються постійному динамічному впливу в процесі чого виникають залишкові деформації.

Основною задачею є встановлення фактичного стану елементів проміжних скріплень і залізобетонних шпал, знаходження максимальної сили опору рейки поздовжньому переміщенню, які забезпечуються скріпленнями при різних умовах експлуатації [1].

Проаналізувавши динаміку сучасного розвитку вимірювальних систем профілю коліс, можна зробити висновок, що на теперішній час засоби, що застосовуються для контролю поверхні кочення колісних пар мають потужні джерела випромінювання, сприйняття фото зображень, швидкодіючі пристрої оброблення інформації, що дало змогу збільшити точність вимірювань [5, 6].

Основними елементами систем являються засоби обробки отриманої інформації та джерела випромінювання. Із наведеної таблиці 1 видно що значення швидкості рухомого складу для різних систем значно відрізняються і мають великий діапазон, але вони достатні щоб вимірювання проводились під час руху [7].

Таблиця 1. Технічні характеристики систем контролю параметрів колісних пар

Система	Параметри які вимірюються	Похибка вимірювання, мм	Швидкість руху рухомого складу, км/год
Tread View	Профіль колеса, висота и товщина гребеня	±0,5	8
WPMS	Висота и товщина гребеня, товщина обода, прокат на поверхні кочення		60
WheelSpec	Профіль колеса, висота и товщина гребеня, діаметр колеса, товщина обода, прокат на поверхні кочення, повзуни	Нема даних	100
WIS	Профіль и діаметр колеса, висота и товщина гребеня, товщина обода	>±0,2; для діаметра колеса ±0,4	80

Argus	Профіль и діаметр колеса, повзуни, форма коліс	$\pm 0,2$	12
WheelScan	Висота и товщина гребеня, товщина обода, ширина поверхні кочення яка зношується	$\pm 0,05$	30

Для безпосереднього проведення експериментальних досліджень розроблена методика виконання робіт на діючих ділянках залізничної колії. Для вимірювання параметрів колісних пар використовувався лазерний профілометр (рис. 1, а) [8, 9].

Щоб змоделювати роботу рейкових ниток на поздовжній зсув, потрібно створити відповідну силову дію, що відповідає характеру реальних процесів взаємодії колії і рухомого складу, для передавання сили на рейку було використано гідравлічний колійний пристрій створений на базі гідравлічного розгонщика стикових зазорів РЗ 25 110 (рис. 1, б).

Знаходження зусилля, яке передається на рейку визначалося за показаннями гідравлічного манометра який був підключений в гідравлічну систему приладу [14]. Через значення тиску знаходились відповідні величини сил. Навантаження поступово збільшувалось до того моменту поки не відбудеться зрив рейки і подальший її зсув по елементах скріплення, це значення і вважалося за критичну силу при якій втрачається поздовжня стійкість рейки.

На діючих ділянках безстикової колії виконувались на розрядних ланках між рейковими плітьми. З точки зору оцінки роботи скріплень такі ділянки більш виражено демонструють можливості скріплень оскільки піддаються найбільшим динамічним навантаженням і їх умови роботи є важчими [2].

Роботи із дослідження поділяються на підготовчі, основні та заключні. В підготовчий період виконується огляд колії, визначається стан баластного шару, шпал, елементів скріплення, визначається кількість непридатних та дефектних, перевіряється величина стикових зазорів. Результати огляду заносяться в журнал фіксації отриманих даних для подальшої обробки і узагальнення. Намічається певна кількість скріплень, що будуть задіяні у випробуваннях. Дані скріплення залишаються закріпленими і рівномірно розподіленими по довжині рейки.

Дослідження виконуються при температурі рейок близької до температури закріплення. Пристрій розміщується над стиком так, щоб середина приладу знаходилась над зазором, і виконуються вимірювання тиску тиску який збільшується до того моменту поки в контрольних перерізах відбудеться зміщення підшви рейки відносно фіксованих точок. Після фіксації значень тиску припиняється переміщення рейки, пристрій переміщується в інше місце для виконання досліджень.

При виконанні експериментальних вимірювань обробка отриманих результатів виконувалась за наведеним нижче алгоритмом:

1. Отримання показань тиску відповідно до розробленої технології проведення експерименту.

2. Виконується розрахунок поздовжньої сили опору переміщенню рейкових ниток.

3. Визначення поздовжнього утримуючого зусилля, що створюється одним скріпленням.

Розрахунок величини погонного опору поздовжньому зсуву рейкових ниток.

Особливості проведення досліджень, що враховуються при опрацюванні отриманих результатів:

навантаження створене спеціальним гідравлічним приладом передається на усі закріплені скріплення рівномірно, оскільки пружний перерозподіл діючих зусиль рейковою ниткою незначний;

відносною зміною довжини рейкової нитки можна знехтувати;

частина сили, необхідна для подолання сил тертя в накладках стикового скріплення не враховується, оскільки стикові болти розкручені та вибиті з потаїв;

для нівелювання впливу сил опору, що створюються розкріпленими проміжними скріпленнями між рейкою і підкладкою чи шпалою вкладаються коткові опори;

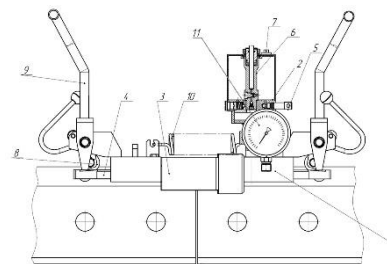
вимірювання проводились при температурі рейкових ниток близькій до температури закріплення при якій виключаються випадки злитих та надмірно розтягнутих зазорів в стиках й впливу температурних сил;

контроль переміщень рейкових ниток виконувався в розмічених перерізах відносно підрейкових опор

складність виконання розрахунків щодо впливу профілю та твердості поверхні колеса на силову взаємодію з рейками.



а)



б)

Рис. 1. Лазерний профілометр а) та схема спеціального гідравлічного пристрою для проведення експериментальних випробувань б)

1 – корпус, 2 – бак для масла, 3 – гідроциліндр, 4 – клини затискні, 5 – клапан перепускний, 6 – насос, 7 – сапун, 8 – ролик, 9 – важіль, 10 – пружина стяжна, 11 – манометр гідравлічний

Для більш повного і широкого дослідження роботи скріплення проведено вимірювання величини зносу елементів. Величини зносу елементів скріплення визначалися шляхом різниці натурних вимірювань і нормативних. Натурні вимірювання виконувались безпосередньо на колії шляхом їх тимчасового вилучення з колії.

Проводились безпосередні вимірювання геометричних розмірів підрейкових прокладок та ізолюючих вкладишів, оскільки вони виготовлені з найбільш зношувальних матеріалів та їх стан великою мірою впливає на працездатність скріплення в цілому [3]. Геометричні вимірювання пружної клеми в даних дослідженнях не виконувались, оскільки за геометричними показниками об'єктивно оцінити працездатність клеми неможливо.

На ділянках колії натурні вимірювання виконувались *при суцільній заміні елементів скріплення* типу КПП-5, що дозволило технологічно виконати велику кількість вимірювань.

При цьому одночасно виконувався технічний супровід, фіксація результатів досліджень. Перевірялися наявність пружних клем та щільність притискання ними рейкових ниток. Розміри вкладиша ізолюючого визначалися за допомогою штангенциркуля колійного товщина ніжки вкладиша та товщина вкладиша у перетині під клемою *визначалася у найбільш зношеному місці*. Всі результати дослідження були опрацьовані та узагальнені за відповідними ознаками.

Аналіз даних показує, на експериментальних ділянках часто зустрічається висока дефектність з/б шпал, крім того є велика кількість непридатних шпал – до 13 %, які потребують заміни, в процесі експлуатації відмічається відносно велика кількість непридатних скріплень та їх елементів, яка в деяких випадках складає від 9 до 20 і більше %; на переважній кількості досліджених ділянок в зоні стиків спостерігається підвищений вихід скріплень у непридатні, при різних типах скріплення КПП-1 (СБ-3), КПП-5, КБ відсоток непридатних скріплень при однакових умовах експлуатації у середньому має подібний рівень, також варто відмітити зростання рівня дефектності скріплення на ділянках з вищою вантажонапруженістю [4] та

експлуатацією коліс із збільшеною твердістю [11, 12, 13]. В роботі [15] на основі аналізу світового досвіду та експериментальних досліджень дійшли висновку: підвищення твердості колеса на 1 НВ в збільшує зношування взаємодіючої пари рейки та колеса на 1 – 2 %.

Оскільки основною метою експериментального дослідження є оцінка працездатності скріплень при їх роботі на утримання рейкових ниток в поздовжньому напрямку, відповідно й забезпечення поздовжньої стійкості безстикових плітей – виникає питання впливу кількості включених в роботу рейкових скріплень на величину сили опору поздовжньому зсуву [10].

Відповідно при виконанні експериментальних досліджень по довжині рейкових ниток до яких прикладалось поздовжнє зусилля залишалась різна кількість працездатних скріплень, що дає можливість співставити залежності сил опору від кількості прикріплювачів [14].

За отриманими результатами досліджень були побудовані залежності поздовжніх утримуючих сил від кількості проміжних рейкових скріплень для різних дослідних ділянок, які відрізняються експлуатаційними умовами та конструктивними особливостями колії (рис. 2, 3).

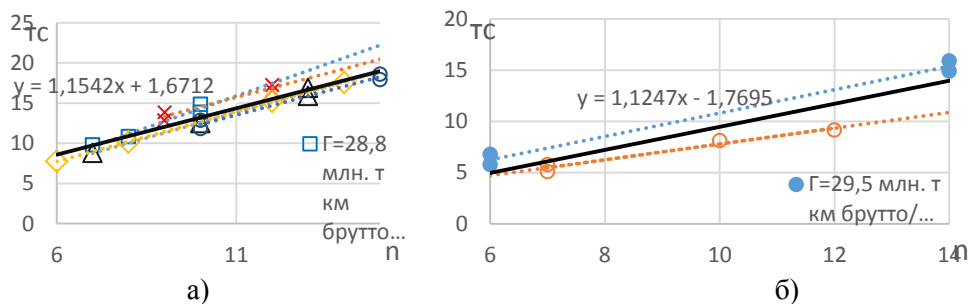


Рис. 2. Залежність поздовжніх утримуючих сил від кількості включених у роботу проміжних рейкових скріплень: а) типу КБ, б) типу КПП-1

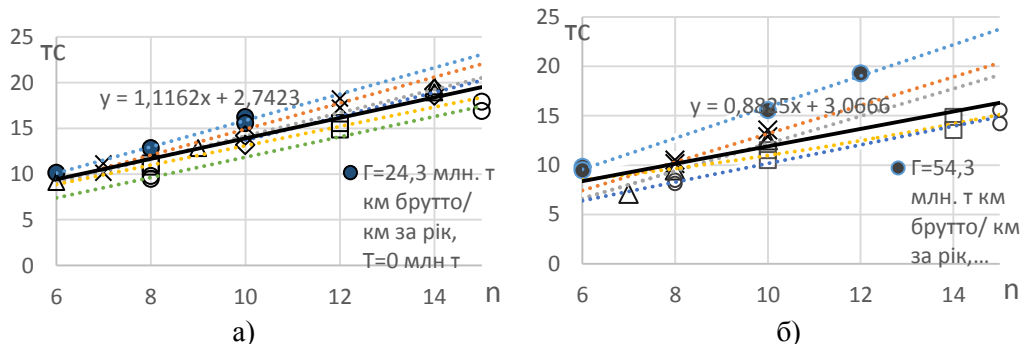


Рис. 3. Залежність поздовжніх утримуючих сил від кількості включених у роботу проміжних рейкових скріплень типу КПП-5 при вантажнапруженості більше: а) 30 млн.т км брутто/ км за рік б) 50 млн.т км брутто/ км за рік

Задача визначення горизонтальних сил взаємодії коліс і рейок в поєднанні із врахуванням профілю та твердості є досить складною, тому результати розрахунків виконувались з доповненням в алгоритм вже існуючої методики розрахунку геометричних характеристик зношеного профілю за спрощеним методом не завжди співпадали із результатами, які отримувались експериментальним шляхом [13].

Числові значення сил взаємодії отримані із використанням програмного пакету Maple. Розрахунки виконувались із врахуванням стану твердості та геометричної поверхні кочення колісних пар локомотивів, які були відповідно розділені на колеса з новим профілем, середньозношеним та зношеним. Всі розрахунки проводились із врахуванням взаємодії тягового рухомого складу із двома типами рейок Р65 і UIC60.

При розрахунках сумарних горизонтальних сил отримані результати наведено на рисунку 4. Для ділянок колії з однаковими умовами експлуатації та конструктивними характеристиками спостерігається практично лінійна залежність поздовжніх утримуючих сил від кількості включених у роботу проміжних рейкових скріплень [14]. На основі проведеного аналізу в роботі пропонується використання сучасного обладнання для вимірювання параметрів поверхні кочення коліс, що зменшить метрологічну помилку, яка призводить до необґрунтованого, поспішного обточування бандажів.

Оскільки дослідження проводились на експериментальних ділянках, що мають різні конструктивні характеристики та різні експлуатаційні умови, тому отримані результати були розподілені за відповідними ознаками.

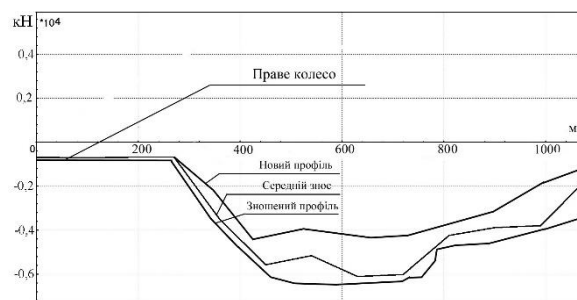


Рис. 4. Значення сумарної поперечної горизонтальної сили

Висновки. Проміжне скріплення типу КБ за умов правильної експлуатації забезпечує достатній погонний опір поздовжньому зсуву рейки, який при пропущеному тоннажі 293 млн т складає в середньому 25,4 кН/м, а при пропущеному тоннажі 488 млн т – 22,1 кН/м; на ділянках, де не забезпечуються встановлені норми утримання скріплень спостерігається зниження погонного опору на величину близько 12 %.

За результатами виконаного аналізу встановлено такі чинники: збільшилась потужність і маса конструкцій колії, збільшилась жорсткість підрейкової основи, збільшилась твердість поверхні взаємодії, колеса та рейки, але слід зауважити що зміна твердості відбулась не пропорційно. Відповідно збільшились величини контактних дотичних напружень у верхніх шарах головки рейки і внаслідок цього зростає інтенсивність накопичення контактно-втомлювальних дефектів верхніх шарів поверхні кочення залізничних рейок.

Проміжне скріплення типу КПП-1 (СБ-3) забезпечує погонний опір поздовжньому зсуву рейки на рівні, який при пропущеному тоннажі 220 млн т складає в середньому 19,3 кН/м, а при пропущеному тоннажі 400 млн т – 14,1 кН/м; в порівнянні з типовим скріпленням КБ спостерігається істотне зниження величини погонного опору поздовжнього зсуву рейкових ниток. Можна відмітити, що величина погонного поздовжнього опору 14,1 кН/м наближається до граничної розрахункової межі при якій може бути втрачена поздовжня стійкість рейкових плітей при застосуванні екстреного гальмування.

Проміжне скріплення типу КПП-5 на початковому періоді експлуатації забезпечує надійне притискання рейкової нитки до підрейкових опор нічим не поступаючись скріпленню типу КБ та забезпечує погонний опір поздовжньому зсуву рейки близько 29 кН/м. В процесі експлуатації даного скріплення виявлено різний характер зміни параметрів працездатності на ділянках з різним рівнем вантажонапруженості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Даніленко Е. І. Залізнична колія : Підручник. Київ: Інпрес. 2010. 455 с.
2. Даніленко Е.І., Яковлев В.О., Орловський А.М., Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України ЦП-0138. К. : Транспорт України, 2006. 336 с.

3. Slobodyanyuk M., Gorobchenko O. Structural analysis of territorial transport systems based on classification methods // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1 No. 4 (103), pp. 23–32. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194158> (last access: 02.12.2021)
4. Даніленко Е.І. Прискорений й швидкісний рух пасажирських поїздів потребує нових раціональних параметрів взаємодіючої пари «колесо-рейка» // *Залізничний транспорт України* 2012. № 5. С. 7-14.
5. Венедіктов А.З. Бесконтактный контроль параметров колесных пар URL:<http://www.css-rzd.ru/zdm/10-2004/04122-1.htm> (дата звернення : 17.03.2013).
6. Гаврилук В.И., Гончаров К.В., Вимірювальні системи на транспорті // *Залізничний транспорт України*, 2002. № 4, С. 28-30.
7. Оценка систем измерения колес // *Железные дороги мира*, 2003. № 11. С. 41 – 44.
8. Лазерный профилометр поверхности катания колесных пар. URL:<https://riftek.com/ru/roducts/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> (дата звернення: 21.05.2014).
9. Демченко В.О. Вплив профілю колісного бандажа на силову взаємодію з рейковою колією: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / ДЕДУТ. Київ, 2014. 184 с.
10. Демченко В.О., Демченко О.В. Вплив співвідношення твердості на технічні характеристики взаємодії пари «колесо-рейка». // *Актуальные научные исследования в современном научном мире* 2021. № 7 С. 150-153.
11. Бунькова, Т.Г. Об оптимальном соотношении твердости цельнокатаного колеса грузового вагона и железнодорожного рельса. // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2011. № 1. С. 86 – 90.
12. ДСТУ ISO 6001-2015 Колісні пари вантажних вагонів правила технічного обслуговування, ремонту та формування СТП 04-001:2015 [Чинний від 2015]. Київ : Держстандарт України, 2015. 154 с.
13. Демченко В.О. Вплив профілю колісного бандажа на силову взаємодію з рейковою колією: автореф. дис. ... техн. наук : 05.22.06 / ДЕДУТ. Київ, 2014. 25 с.
14. Демченко В.О., Демченко О.В., Експериментальні дослідження поздовжньої стійкості рейкових плітей з різними конструкціями рейкових скріплень *Актуальные научные исследования в современном научном мире* 2018. № 5 С. 70-79.
15. Марков, Д. П. Повышение твердости колес подвижного состава (предпосылки и перспективы) // *Вестник ВНИИЖТа*. 1995. № 3. С. 10 – 17.

REFERENCES

1. Danilenko E.I. (2010) *Zalipnychna kolyi* [Railway track] Kyiv: Inpress [in Ukrainian].
2. Danilenko E.I., & Yakovlev V.O., & Orlovsky A.M., (2006) *Instrykciy z ylahytvanny ta utymanny kolyi zaliznyc Ukraine* [Instruction on arrangement and maintenance of the railway track of Ukraine CP-0138] Kyiv: Transport [in Ukrainian].
3. . Slobodyanyuk M., Gorobchenko O.(2020) Structural analysis of territorial transport systems based on classification methods - *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1 No. 4 (103), 23–32. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194158> (last access: 02.12.2021)
4. Danilenko E.I. (2012). *Pruscorennyu ta chyvydkisnyu ruh pasagyrskyh poizdiv potrebye novyhracionalnyh parametriv vzayemodiychoy paru «koleso-reyka»* [Accelerated and high-speed movement of passenger trains requires new rational parameters of the interacting pair "wheel-rail"]. *Zaliznychnyyu transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 5, 7-14 [in Ukrainian].
5. Venediktov A.Z. (2013). *Bezkontaktnyyu control parametrov kolesnyx par* [Contactless control of wheelset parameters]. <http://www.css-rzd.ru/zdm/10-2004/04122-1.htm> [in Russian].
6. Gavriulyuk V.I., & Goncharov K.V. (2006) *Vumiryavalni sustemy na transporti – [Vimiruvalny systems on transport]* *Zaliznychnyyu transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 4, 28-30 [in Ukrainian].
7. Ozenka sistem izmerenuay koles, *Geleznye dorogi mira – Railways of the world*, 11,41-44.
8. *Lazernyyu profilometr poverhnosti kataniya kolesnyh par* [Laser profilometer of the rolling surface of wheelsets] [riftek.com/ru](https://riftek.com/ru/roducts/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp). Retrieved <https://riftek.com/ru/roducts/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> [in Ukrainian].
9. Demchenko V.O. (2014). *Vplyv profile kolisnogo bandazy na sulovy vzayemodiu z reukovou kolieu* [Influence of a profile of a wheel bandage on force interaction with a rail track]: dis. ... *Candidate's thesis* : Kyiv: DUIT [in Ukrainian].
10. Demchenko V.O., & Demchenko O.V.(2021) *Вплив співвідношення твердості на технічні характеристики взаємодії пари «колесо-рейка» Vplyv spivvidnoheny tverdosti na tehnicni charakterustuku*

paru «koleso-reyka» [Influence of hardness ratio on technical characteristics of wheel-rail interaction]. Aktualnie yauchnie issledovaniya v sovremennom nauchnom mire – Actual scientific research in the modern scientific world, 7, 150-150 [in Ukrainian].

11. Bunkova, T.G. (2011) Ob optimalnom sootnohenii tverdosti tselnokatanogo koleasa gruzovogo vagona i geleznodorogного relsa [On the optimal ratio of the hardness of a solid-rolled wheel of a freight car and a railroad rail]. Naychno-texnicheskiy vestnik Povolgya – Scientific and technical bulletin of the Volga region, 4, 86-90 [in Russian].

12. Kolisni paru vantagnux vagoniv pravula texnichnogo obslugovyvannya [Wheelsets of freight cars maintenance rules]. (2015). *DSTU ISO 6001-2015* Kyiv: [in Ukrainian].

13. Demchenko V.O. (2014). Profile kolisnogo bandagy na sulovy vzaemodiu z reukovou kolieu [Influence of a profile of a wheel bandage on force interaction with a rail track]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv: DUIT [in Ukrainian].

14. Demchenko V.O., & Demchenko O.V. (2018) Eksperementalni doslidgennya pozdovgnoistykyosti reykovix plitey z riznumu konstrukciyamu reikovuh skriplen [Experimental studies of the longitudinal stability of rail slabs with different designs of rail fasteners] Aktualnie yauchnie issledovaniya v sovremennom nauchnom mire – Actual scientific research in the modern scientific world, 5, 70-79 [in Ukrainian].

15. Markov, D.P. (1995) Povihenie tverdosti koles podvignogo sostava [Increasing the hardness of the wheels of rolling stock]. Vestnik VNIIGTa – VNIIZHT newspaper, 3, 10-17 [in Russian].

Volodymyr Demchenko^{1*}, Serhiy Hulak², Oleksii Demchenko³, Denys Zaika⁴

¹ Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-2478-364X>

² Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

³ Postgraduate, Department of Railway Track and Track Management, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://org/0000-0001-5344-9301>

⁴ Postgraduate, Department of Electromechanics and Rolling Stock, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0693-9580>

* **The corresponding author:** dem4enko.vo@gmail.com

INFLUENCE OF WHEEL PROFILE AND HARDNESS ON TRACK STABILITY WITH DIFFERENT CONSTRUCTIONS OF FASTENINGS

Experimental researches on establishment of technical parameters of intermediate rail fastenings concerning maintenance of longitudinal stability of rail threads, establishment of technical parameters of intermediate rail fastenings on maintenance of longitudinal stability of rail threads are carried out. The researches of influence of technical characteristics of hardness at interaction of a rail and a wheel and their influence on the level of longitudinal forces of interaction between elements of a track and wheels of a rolling stock in operation on the railways of Ukraine are analyzed. After the start of operation of wheel pairs with the increased value of hardness the optimum ratio of hardness of rail and wheel steel was broken. It is known from various sources regarding the interaction of the rail and the wheel that metals with approximately same hardness show better wear resistance in the friction pair. Based on the obtained data, calculations were performed and their analysis was carried out with the development of recommendations for further operation.

Keywords: rail track, stability of movement, horizontal forces, longitudinal forces, intermediate fastenings.

Олексій Фомін¹, Альона Ловська²

¹Професор кафедри “Вагони та вагонне господарство”, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

²Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

* Автор, відповідальний за листування: alyonalovskaya.vagons@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНИМИ БАЛКАМИ

Для зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах, зокрема маневрових співударяннях, запропоновано впровадження в її складові енергопоглинального матеріалу. Дане рішення реалізується шляхом створення замкненої конструкції хребтової та основних повздожніх балок, заповнених наповнювачем з пружно-в'язкими властивостями. Дослідження проведені стосовно вагона-платформи моделі 13-401. Для обґрунтування запропонованого рішення здійснено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи, звантаженого двома контейнерами-цистернами типорозміру ІСС при маневровому співударянні. Розв'язок математичної моделі проведений за методом Рунге – Кутта в програмному комплексі MathCad. Встановлено, що динамічна навантаженість несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованих рішень зменшується на 3,2% у порівнянні з несучою конструкцією без наповнювача.

Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Результати розрахунків показали, що максимальні еквівалентні напруження не перевищують допустимих значень та на 14% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції вагона-платформи. Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність.

Вступ. Перспективи інтеграції залізничного транспорту в систему міжнародних коридорів зумовлюють необхідність створення і впровадження в експлуатацію інноваційних конструкцій вагонів з покращеними техніко-економічними показниками. Найбільш поширеним типом вагона у міжнародному сполученні є вагони-платформи, це обумовлено можливістю перевезень на них мобільних транспортних засобів.

Основним несучим елементом вагона-платформи є рама. В умовах експлуатаційних режимів вона випробовує знакозмінні напруження. Це обумовлює пошкодження рами та необхідність здійснення позапланових видів ремонту. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень щодо можливості зменшення навантаженості рами вагона-платформи в експлуатації шляхом урахування принципів мультифункціональності при проектуванні.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. В публікації [1] проведено аналіз конструкції вантажного вагона для інтермодальних перевезень. Вагон призначений для перевезення вантажних автомобілів залізницею.

Аналіз конструкції вагона для перевезень великовагових вантажів наведений у роботі [2]. Висвітлені особливості розрахунку на міцність несучої конструкції вагона, які підтвердили доцільність запропонованих при проектуванні рішень.

Важливо сказати, що запропоновані конструкції вагонів-платформ не передбачають можливості зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації.

Заходи щодо модернізації рухомого складу для підвищення ефективності використання розглянуті у роботі [3]. Виконано оцінку міцності несучої конструкції платформи на підставі комплексу розрахункових і експериментальних досліджень.

Визначення показників міцності довгобазної конструкції вагона-платформи проводиться у роботі [4]. Розрахунок здійснений для двох варіантів завантаження, при яких було отримано найбільші згинальні моменти. Визначення максимальних еквівалентних напружень у основних несучих елементах рами здійснено за методом скінчених елементів.

Однак при цьому не розглянуті питання можливості зменшення навантаженості несучих конструкцій вагонів-платформ в експлуатації.

Питання щодо можливості застосування методів теоретичних і експериментальних досліджень міцності основних несучих елементів конструкцій довгобазних вагонів-платформ розглянуті у публікації [5]. Наведено результати розрахунку несучих елементів конструкції на втому з використанням обчислювального комплексу, що реалізує метод скінчених елементів стандарту IBM-PC.

Особливості проектування залізничного вагона для інтермодальних перевезень з адаптованою завантажувальною платформою розглянуті у роботі [6]. Прийняті конструкційні рішення обґрунтовані статичними та динамічними дослідженнями в програмних комплексах ANSYS та ADAMS/Rail.

Важливо сказати, що в даних роботах не розглянуті питання покращення міцності несучих конструкцій вагонів-платформ шляхом зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації.

В роботах [7 – 9] проводиться визначення навантаженості несучих конструкцій вантажних вагонів з наповнювачами в їх складових. Результати проведених розрахунків підтвердили доцільність запропонованого рішення. Однак авторами не приділялося уваги визначенню навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з наповнювачем в її складових, завантаженого контейнерами-цистернами.

Аналіз літературних джерел [1 – 9] дозволяє зробити висновок, що питання покращення показників міцності несучих конструкцій вагонів-платформ шляхом зменшення навантаженості при експлуатаційних режимах є актуальними та потребують дослідження і розвитку.

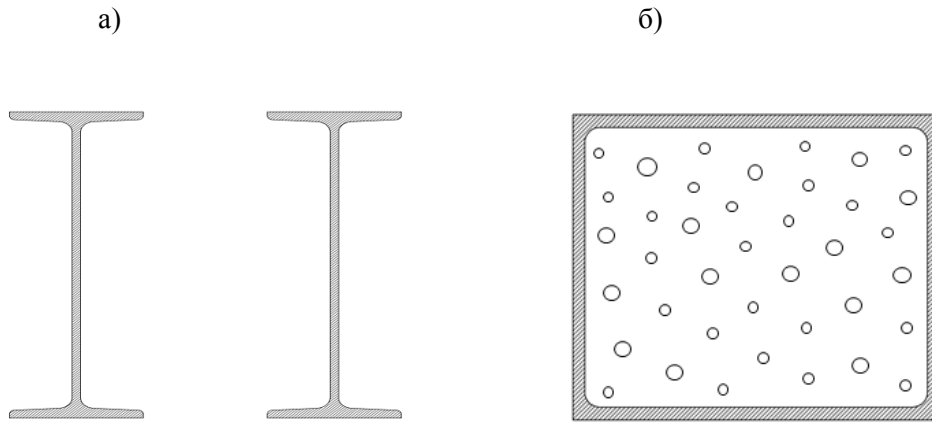
Мета і завдання дослідження. Метою статті є висвітлення результатів визначення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

провести математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні;

провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні.

Матеріали та методи дослідження. Для зменшення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах, зокрема маневрових співударяннях, запропоновано впровадження в її складові енергопоглинального матеріалу. Дане рішення реалізується шляхом створення замкненої конструкції хребтової та основних повздовжніх балок, заповнених наповнювачем з пружно-в'язкими властивостями (рис. 1, 2). Як прототип обрано вагон-платформу моделі 13-401 з урахуванням модернізації відповідно до проекту НВЦ

«Вагони шляхом постановки на несучу конструкцію фітингових упорів для можливості перевезення контейнерів.



*Рис. 1. Переріз хребтової балки рами вагона-платформи
а) типова; б) удосконалена*

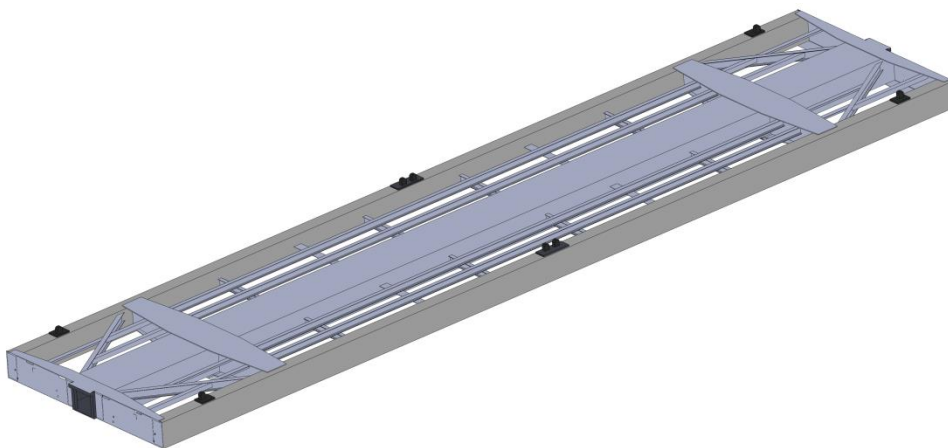


Рис. 2. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи

Визначення оптимальних параметрів профілю хребтової та повздовжніх балок здійснено за резервами міцності типової конструкції рами. З урахуванням запропонованого удосконалення стає можливим зменшення тари несучої конструкції на 3% у порівнянні з вагоном-прототипом.

З метою обґрунтування запропонованих рішень проведено визначення динамічної навантаженості вагона-платформи у повздовжній площині. Для цього використано математичну модель, розроблену проф. Богомазом Г. І., яка описує динамічну навантаженість довгобазного вагона-платформи, завантаженого чотирма контейнерами-цистернами при дії повздовжньої сили на задній упор автотягача [10]. Однак у рамках даного дослідження модель доопрацьовано шляхом врахування пружно-в'язких зв'язків в рамі. Розрахункова схема наведена на рис. 3.

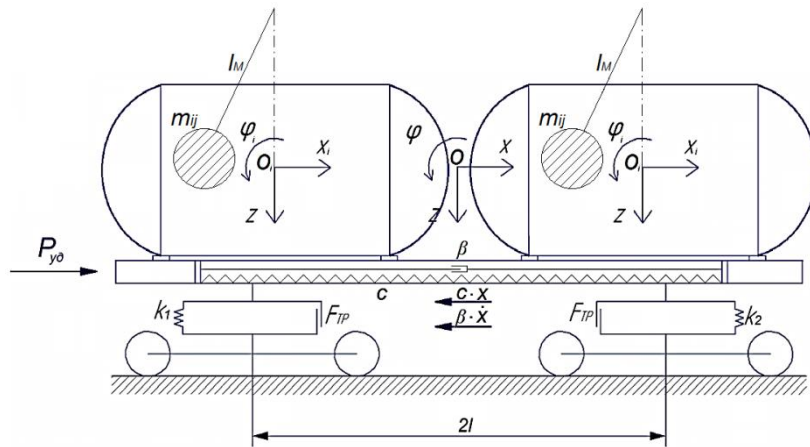


Рис. 3. Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого контейнерами-цистернами

Враховано, що вагон-платформа завантажений двома контейнерами-цистернами, типорозміру 1СС. Рух наливного вантажу в котлі описувався сукупністю математичних маятників [10]. Визначення гідродинамічних характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у [11]. Як наливний вантаж прийнятий бензин. На підставі проведених розрахунків для випадку максимально-допустимої завантаженості котла контейнера-цистерни у відповідності з [12], отримано значення $m_{ij} \approx 6,8$ т, $I_{ij} \approx 250$ т · м².

$$M'_{\Pi\Pi} \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i - \beta \cdot \dot{x} - c \cdot x, \quad (1)$$

$$I_{\Pi\Pi} \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi} - g \cdot \varphi_{\Pi\Pi} \cdot M_{\Pi\Pi} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_{\Pi\Pi} \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot (\ddot{x}_{\Pi\Pi} - \ddot{x}_i) + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} - \ddot{\varphi}_i) - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = S_i, \quad (4)$$

$$\left(I_{\varphi} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot (\ddot{\varphi}_{\Pi\Pi} - \ddot{\varphi}_i) + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\ddot{x}_{\Pi\Pi} - \ddot{x}_i) + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot (\varphi_{\Pi\Pi} - \varphi_i) = 0, \quad (5)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi} = 0, \quad (6)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_i + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij} = 0, \quad (7)$$

де

$$M'_{\text{пл}} = M_{\text{пл}} + 2 \cdot m_T + \frac{n \cdot I}{r^2}; \Delta_1 = z_{\text{пл}} - l \cdot \varphi_{\text{пл}}; \Delta_2 = z_{\text{пл}} + l \cdot \varphi_{\text{пл}}$$

$$S_i = f_{\text{мп}} \cdot \text{sign} \cdot (x_{\text{пл}} - x_i)'$$

$M_{\text{пл}}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{\text{пл}}$ – момент інерції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; S_a – величина повздовжньої сили удару в автозчеп; $f_{\text{мп}}$ – амплітудне значення сили сухого тертя; m_T – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r – радіус середнезношеного колеса; n – кількість осей візка; l – половина бази вагона-платформи; $F_{\text{ТР}}$ – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; k – кількість тонів коливань наливного вантажу; m_i – маса тіла, яке еквівалентне i -му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно котла; m_{ij} – маса j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни; c_{ij} – відстань від площини $z_i = 0$ до точки закріплення j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; l_{ij} – довжина j -го маятника; I_{θ} – приведений момент інерції i -го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла; I_{ij} – момент інерції маятника; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої осі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, φ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо повздовжньої осі переміщенню контейнера-цистерни; ξ_{ij} – кут відхилення j -го маятника від вертикалі.

При цьому $x_i < 30$ мм [10, 13], якщо $x_i \geq 30$ мм, тоді $x_i = x$. Вертикальні переміщення контейнера-цистерни відносно рами не враховувалися. Величина сили повздовжнього удару, що діє на вагон-платформу, прийнята рівною 3,5 МН.

При проведенні розрахунків враховано, що несуча конструкція вагона-платформи спирається на візки моделі 18-100. Розв'язання диференціальних рівнянь руху здійснено за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad [14, 15]. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [16, 17]. Враховано, що жорсткість енергопоглинального матеріалу, яким заповнена хребтова балка складає 78 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 105 кН·с/м. Максимальні прискорення склали 38,7 м/с² та виникають в момент удару (рис. 4).

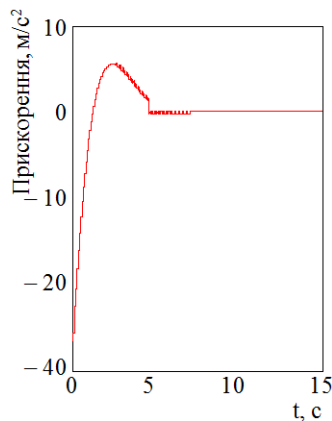


Рис. 4. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи при ударі

Далі величина прискорення має додатне значення та після невеликого стрибка затухає. Отримане прискорення на 3,2% нижче за те, що отримане для несучої конструкції вагона-платформи без наповнювача в рамі.

На наступному етапі дослідження проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи. В якості розрахункового використаний метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

Скінчено-елементна модель несучої конструкції вагона-платформи утворена ізопараметричними тетраедрами. Оптимальна кількість тетраедрів розрахована за графоаналітичним методом [18, 19]. Кількість елементів сітки склала 395117, вузлів – 131579. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 719,38, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 11,1, більше десяти – 18,8. Кількість елементів в колі склала 9. Співвідношення збільшення розміру елементів – 1,7.

При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конструкцію вагона-платформи діє вертикальне статичне навантаження P_e , яке прикладалося до фітингових упорів у вигляді дистанційного з урахуванням висоти центру ваги контейнерів-цистерн, а також повздовжнє навантаження P_n на задній упор автотягачу (рис. 5).

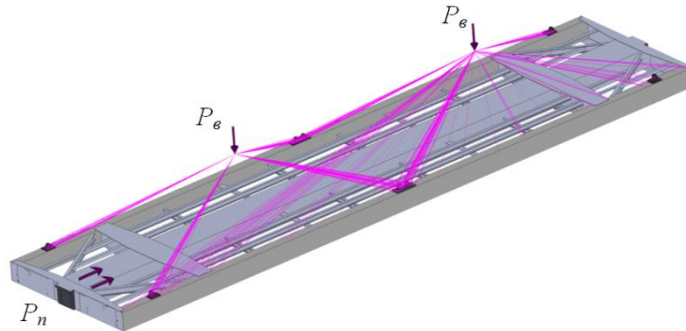


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

Матеріал металоконструкції – сталь марки 09Г2С. Закріплення моделі здійснювалося в зонах опирання рами на візки. Наявність пружно-в'язкого матеріалу в рамі моделювалася постановкою зв'язків з відповідними характеристиками за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation. Результати розрахунку наведені на рис. 6.

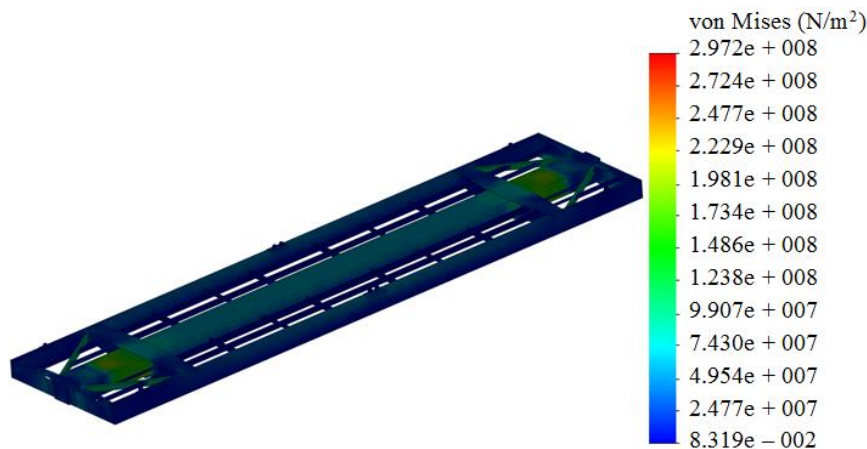


Рис. 6. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

Максимальні еквівалентні напруження при цьому зафіксовані в зоні взаємодії шворневої балки з хребтовою та склали 297,2 МПа. Отримана величина напружень не перевищує допустимі та на 14% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції [20].

Висновки. 1. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні. Максимальні прискорення склали 38,7 м/с² та виникають в момент удару. Отримана величина прискорення на 3,2% нижче за ту, що розрахована для несучої конструкції вагона-платформи без наповнювача в рамі.

2. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками при маневровому співударянні. При цьому максимальні еквівалентні напруження зафіксовані в зоні взаємодії шворневої балки з хребтовою та склали 297,2 МПа. Розрахована величина напружень не перевищує допустимі та на 14% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності використання залізничного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Krasoń Wiesław, Niezgodą Tadeusz, Stankiewicz Michał. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 615 – 624.
2. Divya Priya G., A. Swarnakumari. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *Intern. J. of Innovative Technology and Research*. 2014. Vol. 2. Issue 6. P. 1568 – 1580.
3. О. Н. Reidemeister, V. O. Kalashnyk, O. A. Shykunov. Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 2 (62). С. 148 – 156.
4. Кельріх М. Б., Федосов-Ніконов Д. В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. *Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля*. 2016. № 1 (225). С. 90 – 94.
5. Донченко А. В., Федосов-Ніконов Д. В. Методика розрахунково-експериментальних досліджень конструкції довгобазної платформи. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія : Транспортні системи і технології*. 2016. Вип. 28. С. 53 – 60.
6. Pavol Šfastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235(2): 00030.
7. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В., Лебідь Г. О. Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71). № 4, 2021. С. 255 – 259.*
8. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В. Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона з пружно-в'язким наповнювачем в хребтовій балці. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2021. №3 (93). С. 59 – 66. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242038>
9. Фомін О. В., Ловська А. О., Рибін А. В. Дослідження повздовжньої навантаженості вагона-платформи з наповнювачем в несучій конструкції. *Наукові вісті Даліського університету*. 2021. №21. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17>
10. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипенко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Зб. наук. праць “Динаміка та керування рухом механічних систем” – Київ: АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87 – 95.*
11. Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.22.07 “Подвижной состав железных дорог и тяга поездов” / Ю. П. Кривовязюк. Днепропетровск, 1986. 157 с.
12. Правила перевозок опасных грузов. К соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении. Том 3. ОСЖД, 2011. 531 с.
13. Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах при перевозках их по железным дорогам колеи 1520 мм стран-участниц СМГС. Ч. 1. Общие положения. ОСЖД, 2012. 681 с.
14. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. Київ: КУЕТТ, 2003. 269 с.
15. Кирьянов Д. В. Mathcad 13. Петербург: БХВ, 2006. 608 с.
16. Шишацький А. В., Лютов В. В., Жук О. Г., Животовський Р. М. Удосконалена методика оцінювання параметрів сигналів з цифровими видами модуляції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. №4(25). С. 117 – 121.

17. Шишацький А. В., Ольшанський В. В., Животовський Р. М. Алгоритм вибору робочих частот для засобів військового радіозв'язку в умовах впливу навмисних завад. Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 2. С. 62 – 66.
18. Vatulia G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 301–307.
19. Kitov Y., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Y., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 133(1–3). 03001.
20. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.

REFERENCES

1. Krasoń Wiesław, Niezgodą Tadeusz, Stankiewicz Michał. (2016). Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*, 14. 615 – 624. (in English).
2. Divya Priya G., A. Swarnakumari. (2014). Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *Intern. J. of Innovative Technology and Research*, 2. 6. 1568 – 1580. (in English).
3. O. H. Reidemeister, V. O. Kalashnyk, O. A. Shykunov. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 2 (62). 148 – 156. (in English).
4. Kel'rih, M. B., Fedosov-Nikonov, D. V. (2016). Doslidzhennya na micnist' konstrukcii dov gobaznoї platformi [Research on the strength of the long-base platform]. *Visnik Skhidnoukrains'kogo Nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya*, 1 (225). 90 – 94. (in Ukrainian).
5. Donchenko A. V., Fedosov-Nikonov D. V. (2016). Metodika rozrahunkovo-eksperimental'nih doslidzen' konstrukcii dov gobaznoї platformi [Methods of computational and experimental studies of the design of long-base platform]. *Zbirnik naukovih prac' Derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universitetu transportu. Seriya: Transportni sistemi i tekhnologii*, 28. 53 – 60. (in Ukrainian).
6. Pavol Šťastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235(2): 00030. (in English).
7. Lovska A. O., Fomin O. V., Ribin A. V., Lebid G. O. (2021). Vznachennya dinamichnoi navantazhenosti napivvagona z zamknoy hrebtovoyu balkoyu, zapovnenoyu napovnyuvachem [Determination of dynamic load of a gondola car with a closed ridge beam filled with filler]. *Vcheni zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo universitetu imeni V.I. Vernads'kogo. Seriya: Tekhnichni nauki*, 32 (71). 4. 255 – 259. (in Ukrainian).
8. Lovska A. O., Fomin O. V., Ribin A. V. (2021). Doslidzhennya dinamichnoi navantazhenosti nesuchoi konstrukcii napivvagona z pruzhno-v'yazkim napovnyuvachem v hrebtovij balci [Investigation of the dynamic load of the load-bearing structure of a gondola car with an elastic-viscous filler in the spine beam]. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, (93). 59 – 66. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2021/242038> (in Ukrainian).
9. Fomin O. V., Lovska A. O., Ribin A. V. (2021). Doslidzhennya povzdovzhn'oi navantazhenosti vagona-platformi z napovnyuvachem v nesuchij konstrukcii [Investigation of the longitudinal load of a car-platform with a filler in the load-bearing structure]. *Naukovі visti Daliv's'kogo universitetu*, 21. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17> (in Ukrainian).
10. Bogomaz G. I., Mehov D. D., Pilipchenko O. P., Chernomashenceva Yu. G. (1992). Nagruzhenost kontejnerov-cistern, raspolozhennyh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepku [Loading of tank-containers located on the railway platform in case of impacts on the coupler]. *Zb. nauk. prac "Dinamika ta keruvannya ruhom mehanichnih sistem"*, 87–95. (in Russian).
11. Krivovyazyuk Yu. P. (1986). Ocenka ekvivalentnoj nagruzhenosti chetyrehosnyh zheleznodorozhnyh cistern s zhidkimi gruzami razlichnoj plotnosti pri prodolnyh udarah [Estimation of the equivalent loading of four-axle railway tanks with liquid cargoes of various densities during longitudinal impacts]: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.22.07 "Podvizhnoj sostav zheleznyh dorog i tyaga poezdov", Dnepropetrovsk, 157. (in Russian).
12. (2011). Pravila perevozok opasnyh gruziv. K soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshenii [Rules for the transport of dangerous goods. To the agreement on international rail freight traffic]. Tom 3, OSZhD, 531. (in Russian).
13. (2012). Pravila razmescheniya i krepleniya gruzov v vagonah i konteynerah pri perevozkah ih po zheleznyim dorogam kolei 1520 mm stran-uchastnits SMGS [Rules for the placement and securing of goods in wagons and containers during their transportation by 1520 mm gauge railways of the member countries of the Agreement on International Railway Freight Traffic]. Ch. 1. Obschie polozheniya. OSZhD, 681. (in Russian).
14. Domin, Yu. V., Chernyak, G. Yu. (2003). Osnovi dinamiki vagoniv [Basics of wagon dynamics]. Kyiv: KUETT, 269 s. (in Ukrainian).
15. Kiryanov, D. V. (2006). Mathcad 13. Peterburg: BHV, 608 s. (in Russian).

16. Shishackij A. V., Lyutov V. V., Zhuk O. G., Zhivotovskij R. M. (2016). Udoskonalena metodika ocinyuvannya parametriv signaliv z cifrovimi vidami modulyacii [Improved method for estimating signal parameters with digital types of modulation]. *Nauka i tekhnika Povitryanih Sil Zbrojnih Sil Ukraini*, 4(25). S. 117 – 121. (in Ukrainian).

17. Shishackij A. V., Olshanskij V. V., Zhivotovskij R. M. (2016). Algoritm viboru robochih chastot dlya zasobiv vijskovogo radiozvyazku v umovah vplivu navmisnih zavrad [Algorithm for selecting operating frequencies for military radio communications in the event of intentional interference]. *Sistemi ozbroennya i vijskova tekhnika*, 2. S. 62 – 66. (in Ukrainian).

18. Vatulia, G., Falendysh, A., Orel, Y., Pavliuchenkov, M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*, 187, 301–307. (in English).

19. Kitov, Y., Verevicheva, M., Vatulia, G., Orel, Y., Deryzemlia, S. (2017). Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*, 133(1–3), 03001. (in English).

20. Vagony vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih) [Freight wagons. General requirements for the calculation and design of new and upgraded 1520 mm (non-self-propelled) railcars]. 162. DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian).

Oleksij Fomin¹, Alyona Lovska²

¹Professor of Department of Cars and Carriage Facilities, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

²Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

DETERMINATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF A FLATCAR WITH ENERGY-DEPENDENT BEAMS

In order to reduce the load of the load-bearing structure of the flat wagon during operating conditions, in particular shunting operations, the use of energy-globalizing material in its composition was suggested. This solution is implemented by creating a closed design of the backbone and the main restrained beams filled with a reinforcement with pipe-in-noise properties. Investigations were carried out with regard to the flat car model 13-401. In order to substantiate the suggested solution the mathematical modeling of dynamic load-carrying capacity of the flat wagon loaded with two tank-containers of ICC size at shunting coupling was carried out. The mathematical model was developed by the Runge-Kutt method in the MathCad software. It was found that dynamic load of the flat car load-bearing structure with the suggested solutions reduced by 3.2% in comparison with the load-bearing structure without a surge suppressor.

The strength of the load-bearing structure of the flat wagon was calculated by the method of joined elements, which was implemented in the SolidWorks Simulation program complex. The results of calculations showed that the maximum equivalent loads do not exceed the permissible values and are 14% lower than those occurring in the typical flatcar design. The conducted research will contribute to the creation of innovative designs of freight cars as well as to the increase of efficiency of rail transport utilization.

Keywords: transport mechanics, flatcar, load-bearing structure, dynamic load, strength.

Дмитро Волошин^{1}, Людмила Волошина²*

¹Доцент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-5207>

²Асистент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>

*Автор відповідальний за листування: dmivol777@gmail.com

УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ РИЗИКАМИ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ ВАГОНОРЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВ

На поточний момент актуальною науково-технічною задачею на залізничному транспорті України є модернізація вагоноремонтного комплексу. Лінійні підприємства з ремонту вагонів характеризуються недостатнім темпом розвитку у часі. Це виражається у значному фізичному та моральному зносі основних фондів підприємств, великими матеріальними втратами в процесі ремонту вагонів, підвищеною собівартістю ремонту, низькою механізацією та автоматизацією основних та допоміжних процесів виробництва та ін. Маючи на увазі, що залізничний транспорт є критичною за значенням складовою транспортного комплексу України, створення прогресивних виробничих систем на основі принципів виробничої логістики вважається необхідним кроком для подальшого розвитку галузі.

У представленій статті проведено аналіз сучасного стану вагоноремонтних підприємств. Зроблено висновок про необхідність аналізу ризику у виробничих процесах з огляду на складні умови функціонування. Наведено приклад алгоритму реалізації системи управління ризиками та її основних складових. Проведено аналіз основних методів впливу на ризик у виробничій системі. Запропоновано практичні рішення по отриманню кількісних показників оцінювання ризику у виробничих процесах ремонту вагонів за допомогою Марковського аналізування. В цілому система управління ризиками дозволить значно знизити матеріальні втрати при ремонті вагонів.

Ключові слова: вагоноремонтні підприємства, виробнича логістика, система управління ризиками, стан виробничої системи.

Вступ. Вагоноремонтні підприємства України функціонують в складних техніко-економічних умовах. На поточний момент у залізничній галузі мають місце несприятливі фактори для розвитку вагоноремонтної бази. Окрім відомих наслідків відсутності реальної програми модернізації залізничного транспорту за роки існування України – критичний моральний та фізичний знос парку рухомого складу, застарілі виробничі фонди, зниження професійного рівня штату виконавців в технологічних системах підприємств, на перше місце вийшли проблеми ресурсних обмежень на всіх етапах експлуатації вагонів.

Дієвим механізмом нівелювання негативного впливу економічних коливань може бути використання модернізованих виробничих систем, які формуються на основі логістичних принципів з одночасним створенням логістичних систем як локального рівня (окремі вагоноремонтні підприємства), так і загальних, у межах всієї залізничної інфраструктури.

Розвиток логістичних систем в різних державах, у неоднорідних промислових секторах показує їх ефективність в порівнянні з традиційними системами організації виробництва.

Досвід застосування методів та підходів виробничої логістики дає змогу стверджувати, що модернізація виробництва потребує не лише початкових умов сприяння новому напрямку управління виробництвом. Виникає необхідність постійного моніторингу у часі всіх процесів виробничої системи з метою контролю виробничих втрат та удосконаленню елементів виробництва, що забезпечить необхідний розвиток підприємства. Ключовим елементом забезпечення вказаного контролю може бути система управління виробничими ризиками на підприємстві.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. За останні роки питання оцінювання ризиків в складних техніко-економічних системах викликають підвищену зацікавленість з боку наукової спільноти. В першу чергу це пов'язано з погіршенням економічних умов функціонування промислових підприємств та необхідності забезпечення їх динамічної стійкості у часі.

Так, загальні підходи до аналізу ризиків в промислових системах розглядаються в [1]. Основні принципи та настанови до управління ризиків в умовах підприємств та організацій з урахуванням впливу ризикових ситуацій на якість продукції у [2-4]. Впливи виникнення ризиків на економічний стан підприємств у [5-12]. У [13, 14, 17, 18] проведено взаємозв'язок між прийняттям рішень в процедурах управління інженерними системами та критичністю їх відмов.

Проблема забезпечення стійкості ієрархічних систем з огляду на існуючі невизначеності при аналізі ризику наведено у [15]. Питання використання ймовірнісного оцінювання ризиків в елементах критичних інфраструктур розглянуто в [16]. Аналіз ризиків інженерних систем з використанням методу Тагучі для забезпечення максимальної якості готової продукції наведено у [19]. Практичні приклади оцінювання ризиків розглянуто в [20]. Питання використання показників важливості у розроблених моделях оцінювання ризиків розглянуто в [21].

Особливості забезпечення необхідного рівня надійності підприємств залізничної галузі в складних умовах функціонування розглянуто в [22-23].

Мета і завдання дослідження. Метою статті є розробка практичних заходів щодо створення на вагоноремонтному підприємстві системи управління ризиками з точки зору виконання виробничих завдань при мінімальних витратах та максимальній якості готової продукції. Для досягнення вище зазначеної мети були поставлені такі задачі:

1. Розглянути особливості створення системи управління ризиками на основі існуючих підходів.
2. Розробити практичні рекомендації з отримання показників кількісного оцінювання ризиків у виробничій системі.

Матеріали та методи дослідження. Вагоноремонтні підприємства (ВРП) України функціонують в складних економічних умовах. На сучасний момент процеси управління, матеріально-технічного постачання та підтримання технологічної бази характеризуються нестабільністю та невизначеністю [23]. Ситуація, що склалася, потребує розробки та впровадження дієвих механізмів впливу на виробничі системи з метою зниження незапланованих виробничих втрат та нівелювання негативних факторів.

Виробнича діяльність в умовах ринкових відносин характеризується постійним ризиком отримання негативного результату. На практиці це можливо навести у вигляді сукупності ймовірнісних наслідків обраних управлінських рішень. Система з оцінювання і аналізу ризиків у виробничій системі може бути використана при ремонті вагонів для забезпечення необхідного рівня якості готової продукції при мінімальних витратах всіх видів ресурсів (рис. 1).

Ризик – це добуток імовірності заподіяння шкоди та величини цієї шкоди у кількісному вимірі. Ризики, які виникають в процесі виробничої діяльності мають вплив як на саме підприємство, так і на замовника продукції. Управління ризиками – це процес ідентифікації та аналізу ризиків з подальшим прийняттям рішень щодо корегувальних та попереджувальних дій по мінімізації ризикових подій, зниження ймовірності виникнення несприятливого результату з негативними наслідками та матеріальними втратами.

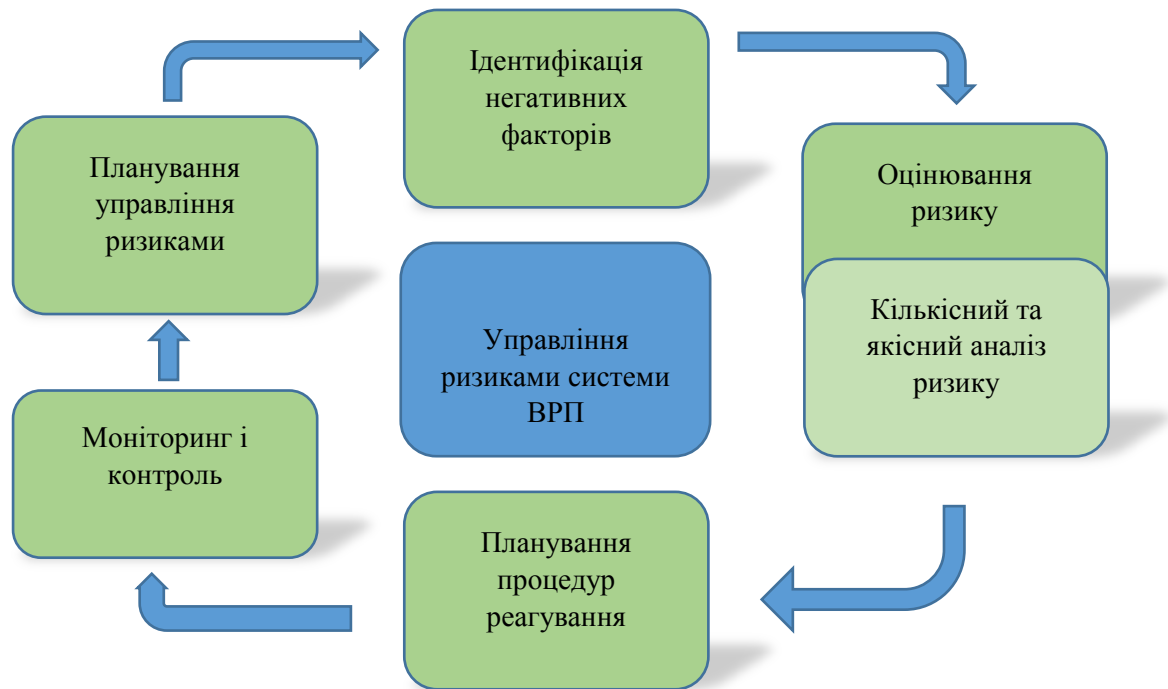


Рис. 1. Приклад системи управління ризиками в умовах ВРП

За останні роки процедури управління різними соціально-економічними системами в складних умовах функціонування створили окрему галузь управління – ризик-менеджмент. Ризик-менеджмент – це сукупність усіх видів робіт, пов’язаних із плануванням, реалізацією, контролем та покращенням діяльності з управління ризиком. Процедури управління ризиками та підходи, засновані на їх оцінці, можуть використовуватися для виконання різних завдань. Тому, насамперед, має бути визначена загальна мета та задачі проведення такого аналізу.

Система управління ризиками для забезпечення якості на вагоноремонтному підприємстві використовується такими підрозділами:

відділом контролю якості (ВТК) для оцінювання якості матеріалів та запасних частин, контролю якості проміжних технологічних етапів, а також відремонтованої продукції при випуску та у процесі збереження;

відділом матеріально-технічного постачання при виборі та оцінюванні постачальників матеріальних ресурсів;

технічним відділом при проектуванні технологічних процесів, розробці норм витрат матеріалів в процесі виробництва, для оптимізації технологічних процесів;

відділом управління якістю при складанні щорічних оглядів по якості, при розробці програм навчання, аудиті технологічного обладнання.

Для управління ризиками можна використовувати класичну модель, яка містить такі етапи:

ініціювання процесу управління ризиками;

загальне оцінювання ризиків (ідентифікація, оцінка і аналіз ризику);

контроль ризиків (зниження рівня ризику або повне їх усунення);

інформування про ризики (всередині підприємства);

аналіз отриманих результатів (моніторинг).

Згідно аналізу більшості джерел з оцінювання ризику в умовах різних соціально-економічних систем можна вказати такі методи впливу на ризик у виробничій системі:

1. Зниження ризику – даний метод полягає в розробці і впровадженні заходів для зниження імовірності виникнення і подальшого впливу наслідків ризику до прийнятного рівня (капітальний ремонт технологічного обладнання ВРП, впровадження систем оптимізації виробничих процесів – 5S, TPM, VSM та ін.).

2. Передача ризику – метод полягає в переадресації наслідків реалізації ризикової ситуації третій стороні (наприклад, страхування елементів виробничої системи).

3. Відхилення від ризику – усунення схильності до ризику шляхом впровадження заходів по запобіганню майбутніх небажаних подій (наприклад, технічне переоснащення цехів та дільниць).

4. Прийняття ризику – в даному випадку відбувається збереження ризику на існуючому рівні при його постійному моніторингу і розробці плану дії на випадок реалізації ризикової ситуації.

Всі види ризиків у виробничій системі та випадки їх прояву з урахуванням результатів оцінки їх імовірності і наслідків, а також вибору засобів контролю фіксуються в реєстрі ризиків (табл. 1).

Таблиця 1. Приклад реєстру ризиків для ВРП

№ поз.	Найменування позиції реєстру	Зміст позиції реєстру
1	Аналіз ризику	Опис можливих обставин виникнення ризику
2	Вид ризику	Вид ризику відповідно до прийнятого на ВРП класифікатора ризиків
3	Локалізація ризику	Структурний підрозділ, у межах діяльності якого виявлений ризик
4	Оцінювання ризику	Величина імовірності події і аналіз впливу різних наслідків (в одиницях у залежності від використовуваних методів оцінки)
5	Попередній досвід наслідків від ризику	Попередні відмови у виробничій системі і досвід реагування на наслідки
6	Відношення до ризику	Обраний метод управління ризиком (передача, зниження або прийняття)
7	Дії по зниженню і контролю ризику	Обраний контрольний механізм і дія (ремонт обладнання, впровадження додаткових методів контролю та ін.)
8	Терміни заходів	Встановлені терміни проведення заходів по мінімізації негативних наслідків
9	Відповідальний	Відповідальні за реалізацію дій по контролю і зниженню ризику у системі

Майбутній стан виробничої системи прямо залежить від її поточного стану з огляду на надійність складових виробничого процесу. Маючи на увазі, що функціонування системи контролю ризиків у загальному вигляді повинно забезпечити стійкість процесів ремонту вагонів [22], можна використовувати Марковське аналізування [4]. Даний метод дозволяє визначати готовність виробничої системи до проведення технологічних операцій з урахуванням достатнього рівня матеріальних складових (запасних частин, технологічних ресурсів та ін.).

Виробнича система у випадковий момент часу може бути в одному з трьох можливих станів:

- стан повної працездатності (готовності) – в системі достатній рівень необхідних ресурсів, працездатний стан технологічного обладнання та оснащення та ін.;
- стан часткової працездатності (зниження ефективності) – в системі відсутні некритичні ресурси, які можуть вплинути на загальний час проведення технологічних операцій, має місце зниження ефективності експлуатації обладнання в результаті пошкоджень та ін.;

➤ стан відмови – неможливість виконання виробничого завдання внаслідок відсутності критичних за значенням ресурсів, аварійна відмова технологічного обладнання та ін.

Концепція станів дає можливість отримати стохастичну матрицю імовірності переходу з одного стану в інший з отриманням кількісних показників ризику. Як вихідні дані можна використовувати інтенсивність відмов – λ , частоту ремонту – μ (для безперервних подій) або ймовірність зміни станів у виробничому процесі.

На першому етапі будується граф станів системи. Якщо кількість станів дорівнює 3, то графічно система матиме вигляд:

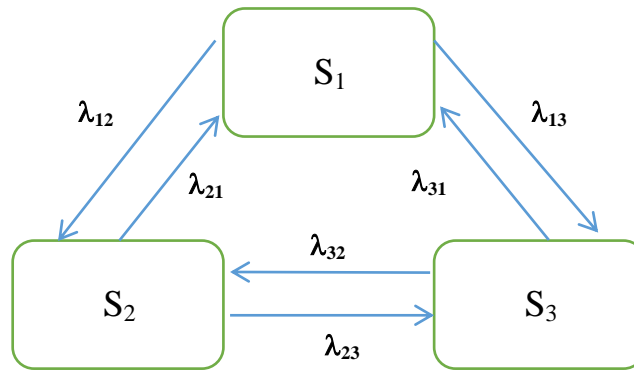


Рис. 2. Приклад графу станів системи

Якщо P_i – імовірність перебування виробничої системи в стані i ($i = 1, 2, 3$), то можна записати систему диференціальних рівнянь Колмогорова, яка буде мати такий вигляд:

$$\begin{cases} P_1' = \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 - (\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1, \\ P_2' = \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3 - (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2, \\ P_3' = \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - (\lambda_{31} + \lambda_{32})P_3, \end{cases} \quad (1)$$

Кожне з вказаних рівнянь може бути вилучене, а відповідна йому імовірність виражена через інші за допомогою нормувальної умови:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1 \quad (2)$$

Якщо прийняти припущення, що виробничий процес стаціонарний, то похідні ймовірностей приймаються дорівнюючими 0. І тоді система рівнянь прийме вигляд:

$$\begin{cases} (\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1 = \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3, \\ (\lambda_{21} + \lambda_{23})P_2 = \lambda_{12}P_1 + \lambda_{32}P_3, \\ (\lambda_{31} + \lambda_{32})P_3 = \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2, \end{cases} \quad (3)$$

Вирішення вказаної системи рівнянь з урахуванням нормувальної умови дозволяє отримати середні значення ймовірностей або часу знаходження виробничої системи в тому чи іншому стані.

Висновки. Технічний розвиток вагоноремонтних підприємств вимагає нових підходів до їх управління. Додатковим елементом модернізованих виробничих систем може бути система управління виробничими ризиками. Вона дозволить проводити постійний моніторинг станів

виробничих процесів з огляду на працездатність елементів системи. Результатом впровадження буде мінімізація виробничих втрат та підвищення якості готової продукції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bilal M. Ayyub. Risk Analysis in Engineering and Economics. A Chap-man & Hall Book, 2014. 640p.
2. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) [Чинний від 2016-07-01]. ДП НДІ «Система», Львів, 2015. 39с. (Національні стандарти України).
3. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT) [Чинний від 2019-01-01] Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 33 с. (Національні стандарти України).
4. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT) [Чинний від 2014-07-01]. ДП НДІ «Система», Львів, 2013. 80 с. (Національні стандарти України).
5. Свідерська А. Поняття та класифікація ризиків у зовнішньоекономічній діяльності підприємства // Галицький економічний вісник. Тернопіль : ТНТУ. 2014. Т. 46. № 3. С. 113-121.
6. Балджи М.Д. Економічний ризик та методи його вимірювання. Навчальн. посібник. Харків : Промарт, 2015. 300 с.
7. Кучеренко В.Р., Карпов В.А., Карпов А.В. Економічний ризик та методи його вимірювання : Навчальний посібник. Одеса, 2011. 200 с.
8. Посохов І.М. Управління ризиками у підприємстві : навчальний посібник. Харків : НТУ «ХП», 2015. 220с.
9. Вишневецька В. А., Ніколаєв І. В. Вплив ризиків на показники ефективності діяльності промислових підприємств // Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки. 2018. Вип. 33. С. 211–218.
10. Івченко І. Ю. Економічні ризики: навч. посіб. Київ: Центр навчальної літератури, 2014. 304 с
11. Старостіна А. О., Кравченко В. А. Ризик-менеджмент : теорія та практика : Навчальний посібник. К. : ІВЦ „Видавництво „Політехніка”, 2015. 200 с.
12. Desheng Wu, David L.Olson, Alexandre Dolgui Decision making in enterprise risk management: A review and introduction to special issue. Volume 57, Part A, December 2015, Pages 1-4.
13. Saleh A. D., Fakhariya I., Sainab F., Imad A. Integration of failure mode, effects, and criticality analysis with multi-criteria decision-making in engineering applications: Part I // Manufacturing industry Engineering Failure Analysis, Volume 122, April 2021, 105264. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105264>
14. Hang Zhou Thiago, Augusto Lopes, Genez Alexandra Brintrup, Ajith Kumar Parlikad. A hybrid-learning decomposition algorithm for competing risk identification within fleets of complex engineering systems //Reliability Engineering & System Safety. Volume 217, January 2022, 107992. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107992>
15. Armin Tabandeh, Neetesh Sharma, Paolo Gardoni. Uncertainty propagation in risk and resilience analysis of hierarchical systems // Reliability Engineering & System Safety. Volume 219, March 2022, 108208 <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108208>
16. Caroline A. Johnson, Roger Flage, Seth D. Guikema. Feasibility study of PRA for critical infrastructure risk analysis // Reliability Engineering & System Safety. Volume 212, August 2021, 107643 <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107643>
17. Gorbunov V. Risk Analysis in Engineering Projects : Risk Management/ M. Sarfraz, L. Ivascu, Intech Open, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.98197. <https://www.intechopen.com/chapters/77337>
18. Pinto, C.A., & Garvey, P.R. (2012). Advanced Risk Analysis in Engineering Enterprise Systems (1st ed.). CRC Press. 2012. 464p. <https://doi.org/10.1201/b13100>
19. Emovon, I., Norman, R. Risk analysis of engineering systems for sustainable industrial development using the Taguchi approach // Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 26 No. 4, 2020. pp. 611-624. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2019-0060>
20. Rykov V., Ivanova N. Farhadov M. On principles of risk analysis with a practical example //RT&A, Special Issue № 3 (66) Volume 17, January 2022, p.p.38-41.
21. Fang C., Marle F., Xie M. Applying Importance Measures to Risk Analysis in Engineering Project Using a Risk Network Model // IEEE Systems Journal, vol. 11, no. 3, pp. 1548-1556, Sept. 2017, doi: 10.1109/JSYST.2016.2536701.
22. Волошин Д.І., Волошина Л.В. Підвищення динамічної стійкості підприємств транспортної інфраструктури // III Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету. Квітень 2021. <http://2021.depas.od.ua/>, <https://drive.google.com/file/d/1O7Zwwr0HRnmHiY1MlnCFs-zaZxxMc64p/view>.
23. Волошин Д.І. До питання підвищення надійності роботи виробничих підрозділів підприємств з ремонту вагонів // 36. наук.праць. Харків : УкрДУЗТ, 2015. Вип.157. С. 128-131.

REFERENCES

1. Bilal M. Ayyub. (2014) Risk Analysis in Engineering and Economics. A Chap-man & Hall Book. 640p.
2. Systemy upravlinnya yakistyu. Vymohy [Quality management systems. Requirements] (2015) *DSTU ISO 9001:2015 from 01 July 2016*. Lviv: DP NDI «Systema» [in Ukrainian]
3. Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy [Risk management. Principles and guidelines] (2018) *DSTU ISO 31000:2018 from 01 January 2019*. Kyiv : DP «UkrNDNTS» [in Ukrainian]
4. Keruvannya ryzykom. Metody zahal'noho otsynuyvannya ryzyku [Risk management. Methods of general risk assessment] (2013) *DSTU IEC/ISO 31000:2018 from 01 July 2014*. Lviv: DP NDI «Systema» [in Ukrainian]
5. Sviderska A. (2014) Ponyattya ta klasyfikatsiya ryzykiv u zovnishn'oekonomichniy diyal'nosti pidpryyemstva [The concept and classification of risks in foreign economic activities of an enterprise]. *Halyts'kyi ekonomichnyy visnyk - Galician economic journal* (V. 46. № 3). (pp. 113-121) Ternopil : The Ternopil Ivan Puluj National Technical University [in Ukrainian]
6. Baldji M.D. (2015) *Ekonomichnyy ryzyk ta metody yoho vymiryuvannya [Economic risk and methods of its measurement]* Kharkiv : Promart [in Ukrainian]
7. Kucherenko V.R., Karpov V.A., Karpov A.V. (2011) *Ekonomichnyy ryzyk ta metody yoho vymiryuvannya [Economic risk and methods of its measurement]* Odessa: ODUVS [in Ukrainian]
8. Posokhov I.M. (2015) *Upravlinnya ryzykamy u pidpryyemnytstvi [Enterprise Risk Management]* Kharkiv: NTU "KhPI [in Ukrainian]
9. Vyshnevskaya V., Nikolaiev I. (2018) Vplyv ryzykiv na pokaznyky efektyvnosti diyal'nosti promyslovykh pidpryyemstv [Risk Influence on the Indicators of Performance of Industrial Enterprises] *Naukovi pratsi Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky – Scientific works of Kirovograd National Technical University. Economic sciences.* (V.33) (pp. 211–218) Kirovograd : KNTU [in Ukrainian]
10. Ivchenko I.Y. (2014) *Ekonomichni ryzyky [Economic risks]* Kyiv : Center for Educational Literature [in Ukrainian]
11. Starostina A.A., Kravchenko V.A. (2015) *Ryzyk-menedzhment : teoriya ta praktyk [Risk management: theory and practice]* Kyiv : IPC "Polytechnic Publishing House" [in Ukrainian]
12. Desheng Wu, David L.Olson, Alexandre Dolgui (2015) Decision making in enterprise risk management: A review and introduction to special issue. Vol. 57, Part A, December 2015, Pages 1-4.
13. Saleh A. D., Fakhariya I., Sainab F., Imad A. (2021) Integration of failure mode, effects, and criticality analysis with multi-criteria decision-making in engineering applications: Part I. *Manufacturing industry Engineering Failure Analysis*, Vol. 122, April 2021, 105264. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105264>
14. Hang Zhou Thiago, Augusto Lopes, Genez Alexandra Brintrup, Ajith Kumar Parlikad. (2022) A hybrid-learning decomposition algorithm for competing risk identification within fleets of complex engineering systems. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 217, January 2022, 107992. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107992>
15. Armin Tabandeh, Neetesh Sharma, Paolo Gardoni. (2022) Uncertainty propagation in risk and resilience analysis of hierarchical systems. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 219, March 2022, 108208 <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108208>
16. Caroline A. Johnson, Roger Flage, Seth D. Guikema. (2021) Feasibility study of PRA for critical infrastructure risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 212, August 2021, 107643 <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107643>
17. Gorbunov V. (2021) *Risk Analysis in Engineering Projects : Risk Management/* M. Sarfraz, L. Ivascu, Intech Open, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.98197. <https://www.intechopen.com/chapters/77337>
18. Pinto, C.A., Garvey, P.R. (2012) *Advanced Risk Analysis in Engineering Enterprise Systems* (1st ed.). CRC Press. 2012. 464p. <https://doi.org/10.1201/b13100>
19. Emovon, I., Norman, R. (2020) Risk analysis of engineering systems for sustainable industrial development using the Taguchi approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 26 No. 4, 2020. pp. 611-624. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2019-0060>
20. Rykov V., Ivanova N. Farhadov M. (2022) On principles of risk analysis with a practical example //RT&A, Special Issue № 3 (66) Vol. 17, January 2022, p.p.38-41.
21. Fang C., Marle F., Xie M. (2017) Applying Importance Measures to Risk Analysis in Engineering Project Using a Risk Network Model. *IEEE Systems Journal*, Vol. 11, no. 3, pp. 1548-1556, Sept. 2017, doi: 10.1109/JSYST.2016.2536701.
22. Voloshyn D.I., Voloshyna L.V. (2021) Pidvyshchennya dynamichnoyi stiykosti pidpryyemstv transportnoyi infrastruktury [Increasing the dynamic resilience of transport]. *III Mizhnarodna naukovo-praktychna mors'ka konferentsiya kafedry SEU i TE Odes'koho natsional'noho mors'koho universytetu – III International Scientific and Practical Marine Conference of the Department of SEU and TE Odessa National Marine University*. April 2021. <http://2021.depas.od.ua/>, <https://drive.google.com/file/d/1O7Zwwr0HRnmHiY1MlnCFs-zaZxxMc64p/view>. [in Ukrainian]
23. Voloshyn D.I. (2015) Do pytannya pidvyshchennya nadiynosti roboty vyrobnychych pidrozdiliv pidpryyemstv z remontu vahoniv [Prior to nutrition, the need for robots has been adjusted for robotic workers of enterprises for the repair of wagons] *Zbirnyk naukovykh prats' UkrDUZT – Collected scientific works of USURT*. (V. 157) (Pp. 128-131). Kharkiv : UkrSURT. [in Ukrainian]

Dmytro Voloshyn¹, Liudmyla Voloshyna²

¹Assistant professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine

²Assistant, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine

MANAGEMENT OF PRODUCTION RISKS IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF WAGON REPAIR ENTERPRISES

At the moment, the modernization of the wagon repair complex is an urgent scientific and technical task on the railway transport of Ukraine. Wagon repair companies are characterized by insufficient pace of development over time. This is expressed in significant physical and moral depreciation of fixed assets of enterprises, large material losses in the process of repairing wagons, high cost of repair, low mechanization and automation of basic and auxiliary production processes, etc. Bearing in mind that railway transport is a critical component of the transport complex of Ukraine, the creation of advanced production systems based on the principles of production logistics is considered a necessary step for further development of the industry.

The presented article analyzes the current state of wagon repair companies. The conclusion is made about the need for risk analysis in production processes given the difficult operating conditions. An example of an algorithm for implementing a risk management system and its main components is given. The analysis of the main methods of influencing the risk in the production system is carried out. Practical solutions for obtaining quantitative indicators of risk assessment in the production processes of wagon repair with the help of Markov analysis are proposed. In general, the risk management system will significantly reduce material losses when repairing wagon.

Keywords: *of wagon repair enterprises, production logistics, risk management system, state of the production system.*

**Валерій Косарчук^{1*}, Микола Чаусов², Володимир Твердомед³, Андрій Пилипенко⁴,
Олександр Азарков⁵**

¹ Професор, Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2703-3542>

² Професор, Кафедра механіки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6790-6216>

³ Доцент, Кафедра залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

⁴ Доцент, Кафедра механіки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3154-8306>

⁵ Доцент, Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2703-3542>

* Автор, відповідальний за листування: kosarcuk_vv@gsuite.duit.edu.ua

МАСТИЛЬНА КОМПОЗИЦІЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ПАР ТЕРТЯ

Запропоновано спосіб виготовлення мастильної композиції, яка дозволяє суттєво зменшити зношування рейок залізничної колії та коліс рухомого складу у процесі напрацювання, запобігає електрохімічній корозії металу пар тертя «колесо – рейка», а також стабілізує величину коефіцієнта тертя на оптимальному рівні через досить короткий час напрацювання.

Експериментальні дослідження зносостійкості проведені на парі тертя «зразок матеріалу бандажу залізничного колеса – зразок матеріалу залізничної рейки» при співвідношенні твердості матеріалу бандажу (твердість за Роквеллом, шкала HRC-35,3) до твердості матеріалу рейки 1,1. Результати випробувань свідчать, що у випадку використання мастильної композиції «промислове мастило марки Bio Rail з добавкою наноматеріалу рейки» зношування зразка із металу рейки після трьох годин напрацювання практично не спостерігалось. Причому середнє значення коефіцієнта тертя протягом трьох годин напрацювання підтримувалось на рівні 0,25, що є оптимальним для пари тертя «колесо – рейка».

Ключові слова: мастильна композиція, зносостійкість, залізничні рейки, колеса рухомого складу, наноматеріал.

Вступ. Створення і впровадження ресурсозберігаючих технологій є однією із найважливіших актуальних проблем сучасного машинобудування. Стосовно залізничного транспорту важливою задачею є пошук способів підвищення зносостійкості гребенів бандажів коліс рухомого складу й бічних граней рейок у кривих ділянках колії.

Процес зношування вказаних елементів є досить складним і інтенсивність його залежить не тільки від характеру механічної взаємодії колеса із рейкою, який визначається формою контактуючих деталей, механічними властивостями матеріалів контактуючих деталей, швидкістю руху, особливостями будови залізничної колії та конструкції візків рухомого складу тощо. На цей процес впливає і низка інших факторів, які часом досить важко формалізувати – наявність вологи, пилу, мастильних плям, локальних геометричних нерівностей рейок і бандажів коліс тощо. Тому можливості теоретичного вирішення даної проблеми, скажімо, шляхом

математичного моделювання контактної взаємодії рейок з колесами, є досить обмеженими. До того ж зміна конструкції колії й рухомого складу потребує досить великих капітальних вкладень і часу, тому на сьогодні пріоритетним напрямком вирішення проблеми підвищення зносостійкості є лубрикація рейок і коліс [1]. Оскільки вказані пари тертя є парами відкритого типу, то мастильні матеріали, які використовуються для їхнього змащування повинні відповідати певним вимогам, із яких основними є: висока ефективність змащування поверхні контакту у досить широкому діапазоні кліматичних температур, простота нанесення і здатність утримуватись у зоні тертя протягом певного часу, високий опір контактним навантаженням, запобігання корозії металу, забезпечення оптимального значення величини коефіцієнту тертя і його стабільності у процесі напрацювання, пожегобезпечність і мінімальний вплив на довкілля, доступність і помірна вартість.

Мастильні композиції, які наразі використовуються в Україні й світі, не відповідають повною мірою наведеним вимогам. Тому розробці нових мастильних матеріалів для підвищення зносостійкості важконавантажених пар тертя приділяється велика увага.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Протягом багатьох років зусилля науковців спрямовані на встановлення закономірностей фізичних явищ, що протікають у поверхневих шарах металевих пар тертя. За умов тертя у поверхневих шарах матеріалів контактуючих деталей виникають і переміщуються дислокації, створюються і самоорганізуються нові структури, що пов'язані із подрібненням кристалітів та зміною орієнтації зерен відповідно до напрямків дії сил, виникають певні текстури, змінюються величини характеристик механічних властивостей структурних складових на усіх рівнях – від мікро- до макро- [2, 3]. Ці процеси суттєво залежать від сумісності матеріалів пари тертя. Внесення у зону тертя мастильних матеріалів може радикально змінити характер і інтенсивність вказаних процесів, завдяки чому з'являється можливість певною мірою управляти їх протіканням використовуючи мастила різного хімічного складу, консистенції, різноманітні присадки до мастил тощо.

Найбільші очікування, у даному напрямі, пов'язані із використанням як присадки наноматеріалів і нанофункціональних присадок із високою дисперсністю (10 ... 200 нм) і розвиненою питомою поверхнею (до 600 м² / г). Численні наукові дослідження показують, що ультрадисперсні матеріали, які складаються з надмалих морфологічних елементів – кристалів, зерен, пор, дисперсних включень, що знаходяться у термодинамічно нерівноважному стані, мають унікальні фізичні властивості, які недосяжні для традиційних матеріалів. Зокрема механічні властивості нанорозмірних порошоків сильно відрізняються від властивостей масивних матеріалів аналогічного хімічного складу. Внаслідок відсутності протяжних дефектів структури (дислокацій, мікротріщин, мікрокаверн) висока твердість наноматеріалів зазвичай поєднується з високою пластичністю [4, 5].

Наразі виділяють чотири основних механізми впливу наноматеріалів на зношування пар тертя із металевих матеріалів [6, 7]. Перший пов'язаний із виникненням на дефектах поверхонь тертя активних центрів зародження і розвитку специфічних нанокристалічних структур у вигляді мікропокриття, причому цей процес контролюється енергією, що виділяється під час тертя [8]. У результаті на поверхні контакту виникає так звана сервовитна плівка, яка складається переважно з ультрадисперсних частинок матеріалу. Сама сервовитна плівка є досить пористою, тому у порах затримується мастильний матеріал. Контактні поверхні деталей мають певний рельєф і дійсний контакт відбувається на порівняно невеликій площі навіть за умови деформації поверхневих шарів. Сервовитна плівка збільшує у десятки разів фактичну площу контакту деталей і значно зменшує рівень контактних напружень. Така плівка захищає поверхні тертя від зношування і за певних умов реалізує механізм вибіркового переносу частинок металу із шару мастила на поверхні тертя деталей [8], тим самим підвищує їх довговічність за рахунок так званого ремонтно-відновлювального ефекту. У випадку сталевих деталей така плівка може утворюватись при використанні мастильних матеріалів, молекули яких включають приєднані атоми металів із невисокою твердістю – міді,

олова, свинцю, цинку, алюмінію, срібла, золота й ін. Тому для внесення металевих наноматеріалів у мастильну композицію часто використовують солі жирних кислот або комплексні сполуки полівалентних металів [9].

Проте увагу дослідників привертають й інші, технологічно простіші та часто дешевші способи створення металовмісних присадок до мастил, а саме безпосереднє використання у якості добавок металевих нанопорошків різної дисперсності. Причому використовуються не тільки нанопорошки згаданих м'яких металів, але й сполук хрому, нікелю, заліза, кобальту та ін., надпластичних сплавів типу Bi-PbSn, Pb-Sn, Zn-Sn, Pb-SbSn, а також неметалевих матеріалів природного або штучного походження (графіт, алмаз, силікати та ін.) [10 – 16]. На теперішній час розроблено досить багато технологій промислового виготовлення таких порошків, серед яких найбільше поширеними є газофазний синтез, електричний вибух провідників, катодне розпилення, механічне та ультразвукове диспергування [17 – 19]. В залежності від вибраної технології та особливостей устаткування розміри частинок матеріалу можуть відрізнятися у десятки разів, крім того твердість таких частинок може перевищувати твердість матеріалів пари тертя. Все це суттєво впливає на перебіг процесів у зоні контакту деталей.

Ще один механізм підвищення зносостійкості (перекочування по твердим частинкам) досить рідко реалізується у чистому вигляді. Він проявляється у тих випадках, коли твердість частинок порошку приблизно дорівнює твердості поверхонь тертя, а їхній об'ємний вміст у змащувальній композиції високий.

Інші два механізми впливу (зрізання виступів та заповнення впадин) пов'язані з наявністю відносно твердих нанорозмірних частинок у зоні контакту. У цьому випадку суцільна сервовітна плівка не створюється, а тверді частинки сприяють інтенсифікації процесів пластичного деформування нерівностей на поверхнях тертя, що призводить до виникнення дрібнодисперсної (субзеренної) структури у поверхневих шарах деталі. Частинки порошку сильно деформуються, подрібнюються і також стають елементами субзеренної структури [20, 21]. Частина їх заповнює мікрокаверни на поверхнях тертя, за рахунок чого загальна шорсткість поверхонь зменшується. Така структура забезпечує підвищені характеристики міцності матеріалу, включаючи твердість, опір руйнуванню і тріщиностійкість, за рахунок чого і підвищується зносостійкість пар тертя. Звісно, що перебіг цих процесів залежить від сумісності матеріалів пар тертя, мастил і нанопорошків, що використовуються у якості присадок. Тому для встановлення загальних закономірностей цих фізичних явищ потрібно проводити подальші дослідження.

У даній роботі розглянуто результати експериментальних досліджень зносостійкості рейкової сталі за умов сухого тертя та тертя із змащуванням промисловим мастилом, а також запропонованою мастильною композицією на його основі.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення експериментів на тертя використовували серійну випробувальну установку 2070 СМТ-1 із додатковим обладнанням для автоматичної фіксації моменту і сили тертя, температури у зоні контакту та зношування зразків (аналого-цифровий модуль «Triton 2402U»), а також для автоматизованої обробки експериментальних даних (програмний комплекс «T2402 Reader»).

Експериментальні зразки (рис. 1) виготовляли із рейкової сталі марки К74, що мала такий хімічний склад за основними компонентами: вуглець – 0,67%, кремній – 0,32%, марганець – 0,94%, залізо – основа. Для виготовлення контр тіла використовували середнє вуглецеву колісну сталь 2 [22].

Експерименти проводили за таких умов: частота обертання – 300 об/хв., сила нормального тиску – 555 Н, час безперервної роботи – 3 год.

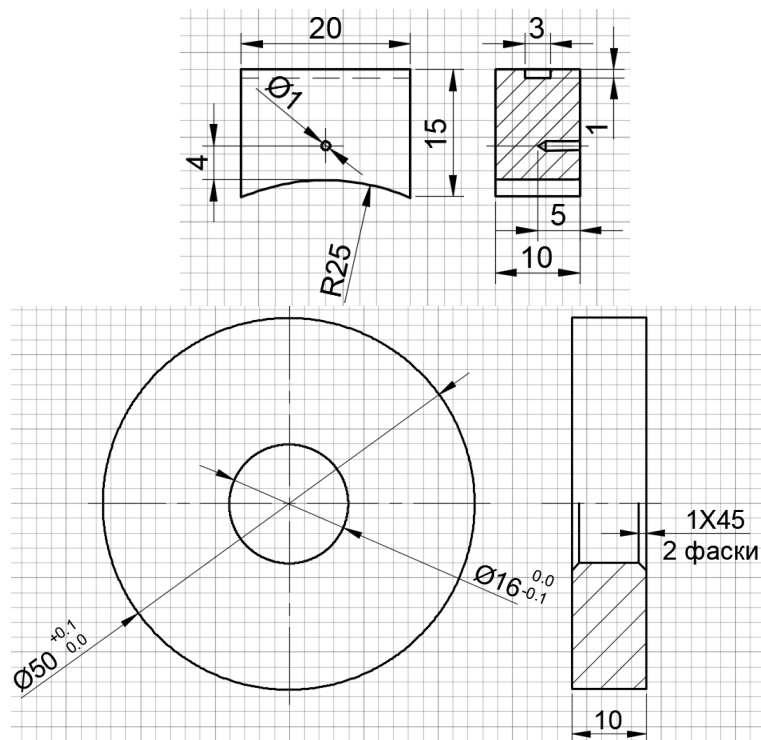


Рис. 1. Схеми: (а) зразка і (б)контртіла

Перед початком експериментів на бічних (неробочих) гранях зразків і контр тіла визначали твердість матеріалів. Вимірювання твердості (за Роквеллом, шкала HRC) здійснювали портативним твердоміром COMPUTEST SC виробництва фірми ERNST (Швейцарія) із використанням підставки, як показано на рис. 2. Навантаження на алмазний індентор у вигляді конуса з кутом при вершині 110° становило 49 Н.

Встановлено, що співвідношення твердості матеріалу контр тіла (твердість за Роквеллом, шкала HRC-35,3) до твердості зразків матеріалу рейки складає 1,1.

Величину зношування зразка визначали за допомогою безконтактного індуктивного датчика переміщення у мінімальному перерізі зразка.



Рис. 2. Твердомір COMPUTEST SC

Досліджували зношування зразків в умовах сухого тертя та тертя із змащуванням мастилом та запропонованою мастильною композицією, усі режими наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Режими тертя, що досліджувалися

Матеріал зразку	Режими тертя		
	Сухе тертя	Мастило Bio Rail	Мастило Bio Rail + нанопорошок сталі K74
Сталь K74	+	+	+

Наразі для лубрикації рейок на деяких ділянках Південно-Західної залізниці України використовують мастило марки Bio Rail фірми AIMOL [23] і тому саме воно було вибране для проведення досліджень.

Авторами патенту [24] запропоновано як присадки до промислових мастил, які використовуються для змащування важко навантажених пар тертя (зокрема, колесо – рейка) додавати нанометал складової пари тертя з меншою твердістю (у даному випадку нанометал рейки). Тому для створення мастильної композиції у мастило марки Bio Rail додавали нанопорошок сталі K74. Нанопорошок сталі K74 виготовляли методом електроерозійного диспергування гранул матеріалу присадки у 40% спиртовому середовищі [19]. В якості гранул використовували стружку із відходів механічної обробки при виготовленні зразків із сталі K74.

Отриману вказаним способом суспензію витримували у витяжній шафі до повного випаровування рідини. Висушений нанопорошок мав дисперсність 100 ... 300 нм. Вміст добавки у мастильній композиції складав приблизно 10 мас. %.

Змащування контактної пари здійснювали одноразово шляхом нанесення двох крапель чистого мастила або мастильної композиції на контактну поверхню зразка.

Результати експериментів. На думку багатьох дослідників ефективність застосування традиційних мастильних матеріалів для високонавантажених пар тертя із металевих матеріалів (наприклад, колесо – рейка) є незначною, оскільки бажаний ефект суттєвого підвищення зносостійкості досягається лише за умови одночасного значного зниження величини коефіцієнту тертя. Для пар тертя типу колесо – рейка оптимальні значення коефіцієнта тертя на поверхні кочення головки рейки знаходяться у діапазоні 0,3 ... 0,35, а на бічній грані головки рейки – 0,2 ... 0,25 [25, 26]. Оскільки при зменшенні статичного коефіцієнта тертя f коефіцієнт зчеплення коліс локомотива з рейками також зменшується (ця залежність є близької до параболічної [26]), то при суттєвому зниженні величини f режими тяги можуть стати нестаціонарними, що вплине на безпеку руху, особливо на кривих ділянках колії. Тому розглянемо, як змінюється величина коефіцієнту тертя в процесі експерименту залежно від режиму випробувань.

У режимі сухого тертя коефіцієнт тертя стрімко зростає (рис. 3) і досягає значення 0,9. Це призводить до появи на поверхні зразка дефектів, що пов'язані із значною пластичною деформацією поверхневих шарів.

Зовсім інший характер зміни коефіцієнта тертя f при змащуванні. При змащуванні чистим мастилом він спочатку дещо зменшується від початкового значення 0,22 до 0,15 (за рахунок розігріву зразка і зменшення в'язкості мастила), а потім поступово зростає до 0,3.

Добавка до мастила нанопорошку сталі K74 сприяє швидкій стабілізації величини коефіцієнта тертя на оптимальному рівні 0,25, що підтверджує можливість використання такої добавки для підвищення зносостійкості залізничних рейок.

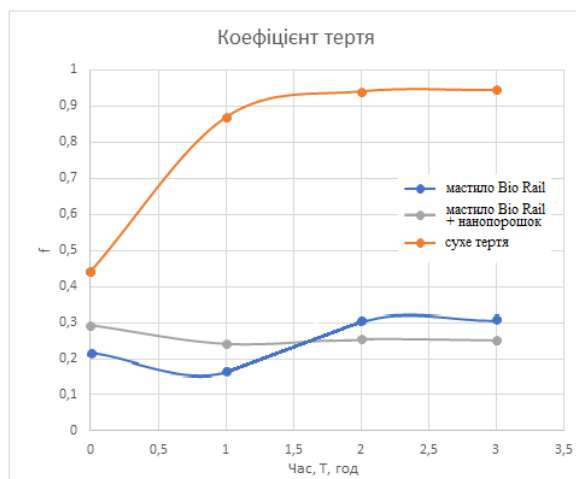


Рис. 3. Зміна у часі коефіцієнта тертя для зразків із сталі К74

На рис. 4 наведені діаграми зношування рейкової сталі для вибраних режимів тертя (див. табл. 1). Величина Δh є абсолютним показником зношування, це різниця між початковим і поточним значенням товщини зразку у мінімальному перерізі (див. рис. 1). У режимі сухого тертя зразки розігрівались майже до 330°C, це певним чином могло впливати на точність визначення величини зношування безконтактним датчиком. Проте, зважаючи на невеликі розміри зразків, їх температурне розширення можна не брати до уваги. Контрольні заміри розмірів зразків після закінчення експериментів показали, що похибки у визначенні величини зношування зразків не перевищували 4%.

Змащування значно знижує швидкість зношування зразка рейкової сталі – після трьох годин тертя його розмір у мінімальному перерізі змінився на 0,09 мм. У випадку використання мастильної композиції «мастило Bio Rail + нанопорошок сталі К74» зношування зразка за вищевказаних умов проведення експерименту взагалі не зафіксовано.

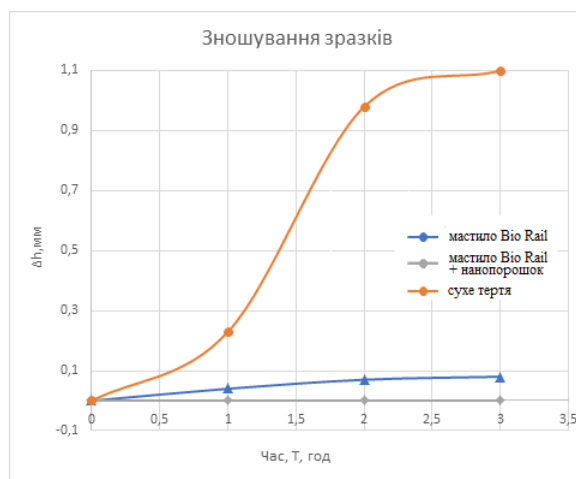


Рис. 4. Діаграми зношування зразків із сталі К74

Аналіз результатів експериментів. Для пояснення отриманих результатів була використана відома методика визначення ступеня пошкодження мікроструктури матеріалу

поверхневих шарів за параметрами розсіювання значень твердості після випробувань [27, 28], на базі якої розроблено Державний стандарт України [29]. Як основний параметр у даному нормативному документі прийнято величину m у розподілі Вейбулла, яка має сенс коефіцієнта гомогенності матеріалу. Цю величину можна визначити за формулою Гумбеля, яка при використанні чисел твердості за Роквеллом має вигляд:

$$m = 0,4343 d(n) \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

де величину $d(n)$ визначають за номограмою [29] залежно від кількості вимірювань n ; H_i – значення твердості за i -м вимірюванням; $\overline{\lg H}$ – середнє значення логарифма твердості за результатами n вимірювань. Згідно стандарту [29] значення коефіцієнта гомогенності m визначали за результатами 30 вимірювань, у цьому випадку $d = 1,1124$. Точність визначення m складала $\pm 0,05$.

Фізичне обґрунтування згаданої методики полягає в такому: дисперсія характеристик механічних властивостей притаманна всім матеріалам, а ступінь їх розсіювання залежить в основному від їх структурного стану. Тому за величиною параметрів закону розподілу, який описує розсіювання певних характеристик механічних властивостей (а саме – твердості) матеріалу можна оцінити характер і ступінь зміни структурного стану поверхневих шарів матеріалу конструкції в результаті термомеханічного напрацювання.

Великим значенням коефіцієнта гомогенності відповідає низький рівень розсіювання характеристик мікротвердості і, відповідно, краща організація мікроструктури поверхневих шарів матеріалу.

Оскільки у нашому випадку початкові значення коефіцієнта гомогенності та середньої (за результатом 30 вимірювань) твердості дещо відрізнялись для різних зразків (адже вони вирізались із різних частин головки рейки), то для подальшого аналізу результати вимірювань мікротвердості і обчислень ступеню пошкодження структури матеріалу представляли у відносних величинах: $\Delta H = \frac{\bar{H} - \bar{H}_0}{\bar{H}_0} \cdot 100\%$ та $\Delta m = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%$, де індекс 0 відповідає початковому (умовно непошкодженому) стану матеріалу.

Вимірювання мікротвердості для визначення відносних величин ΔH і Δm здійснювали портативним твердоміром COMPUTEST. Результати аналізу наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Зміна середньої твердості робочої частини зразка та коефіцієнта гомогенності за різних режимів тертя

Параметри	Режими тертя		
	Сухе тертя	Мастило Bio Rail	Мастило Bio Rail + нанопорошок сталі K74
Зміна середньої твердості, ΔH , %	+8,5	+9,8	+14,7
Зміна коефіцієнту гомогенності, Δm , %	72	31	29

Наведені дані свідчать про те, що внаслідок тертя поверхневі шари матеріалу пошкоджуються, а їхня твердість збільшується. Режим тертя суттєво впливає на ці процеси. В умовах сухого тертя ступінь пошкодження матеріалу за оцінкою зміни коефіцієнта гомогенності є найбільшою – 72%, при цьому твердість внаслідок поверхневого деформаційного зміцнення збільшується лише на 8,5%. Найменше пошкодження і водночас

найбільше зміцнення спостерігається у випадку тертя із використанням мастильної композиції «мастило Bio Rail + нанопорошок сталі K74» (див. табл. 2).

При аналізі отриманих результатів слід звернути увагу на дуже важливу деталь. При використанні як добавки до промислових мастил нанопорошків таких матеріалів як мідь, латунь, бронзи [30, 31] можуть створюватися електрохімічні пари через значну різницю електрохімічних потенціалів матеріалів деталі і добавки. Для відкритих сталевих пар тертя (наприклад, колесо – рейка) використання таких добавок є неприйнятним, оскільки на відкритому повітрі це приведе до корозії контактуючих деталей. Запропоноване використання як добавки в мастило нанопорошку із матеріалу пари тертя із меншою твердістю запобігає виникненню електрохімічної корозії.

Ще однією перевагою використання нанопорошку рейкової сталі як зносостійкої добавки до промислових мастил є його помірна вартість, оскільки вихідною сировиною для його виготовлення є відходи при виготовленні рейок.

Висновки. Запропоновано спосіб створення мастильної композиції для підвищення зносостійкості важконавантажених пар тертя, у якій як присадки для промислових мастил використовується наноматеріал пари тертя з меншою твердістю.

Результати експериментів на парах тертя «зразок матеріалу бандажу залізничного колеса – зразок матеріалу залізничної рейки» показали, що у разі використання промислового мастила марки Bio Rail з добавкою наноматеріалу пари тертя з меншою твердістю, тобто із металу рейки, зношування зразку із металу рейки після трьох годин напрацювання практично не спостерігалось. Аналогічні досліди із використанням тільки мастила промислової марки Bio Rail показали гірші результати.

Встановлено, що із використанням запропонованої мастильної композиції середнє значення коефіцієнта тертя протягом трьох годин напрацювання підтримується на рівні 0,25, що є оптимальним для пари тертя «колесо – рейка».

Також до переваг запропонованої мастильної композиції слід віднести запобігання виникненню електрохімічної корозії у відкритих сталевих парах тертя «колесо – рейка» та її помірну вартість.

Визначити необхідну концентрацію масової частки запропонованої присадки нанометалу до мастил промислових марок з метою отримання максимального ефекту підвищення зносостійкості важко навантажених пар тертя можна за зміною величини нормального тиску у зоні контакту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпущенко Н.И. Смазка – единственный способ предупреждения износа // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 2. С. 15–18.
2. Д.Н. Гаркунов. Триботехника: износ и безызносность: Учебное пособие для ВУЗов. Москва, Издательство МСХА, 2001. 605 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.: М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
4. В.М.Бузник. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 192с.
5. Наноматеріали і нанотехнології: навчальний посібник / Азаренков М. О. та ін. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. 316 с.
6. Waqas, M.; Zahid, R.; Bhutta, M.U.; Khan, Z.A.; Saeed, A. A Review of Friction Performance of Lubricants with Nano Additives. Materials 2021, 14, 6310. <https://doi.org/10.3390/ma14216310>.
7. Singh, A.; Chauhan, P.; Mamatha, T. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. Mater.Today Proc. 2020, 25, 586–591.
8. Д.Н. Гаркунов. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения: М.: Машиностроение, 1982. 207 с.
9. Иванов С.П., Афанасенко В.Г., Боев Е. В., Николаев Е.А. Композиция металлосодержащей присадки. Патент РФ № 2355922. Заяв. 18.06.2007; Оpubл. 20.05.2009, Бюл. № 14.
10. Сафонов В. В., Добринский Э. К., Гороховский А. В., Буйлов В. Н., Сафонов К. В., Галкин А. А. Смазочная композиция. Патент РФ № 2525238. Заяв. 09.04.2013; Оpubл. 10.08.2014, Бюл. № 22.

11. Бабель В.Г., Гаркунов Д.Н., Лаптева В.Г. Смазка для тяжело нагруженных узлов трения. Патент РФ № 2338777. Заяв. 01.08.2007; Опубли. 20.11.2008, Бюл. 32.
12. Kokhanovskii, V. A.; Glazunov, D. V. Selection of lubricant composition for open contact systems in rolling stock. *Russian Engineering Research*, 2016, 36(6), 449-451. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X16060113>.
13. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil / S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper // *Wear*. 2002, vol. 252. – S. 63-69.
14. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky, *Advances in Mechanics Research. Volume 1* / Editors: Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011, 1-78.
15. В. В. Алисин, Г. А. Симакова. Новые смазки для лубрикации рельсов высокоскоростного железнодорожного транспорта // *Техника железных дорог*. 2013. № 4. С. 48 – 51.
16. Беляев С. А., Тарасов С. Ю., Колупаев А. В., Лернер М. И. Повышение эффективности смазочного действия путем добавления нанопорошков металлов в масло // *Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти генерального конструктора аэрокосмической техники, академика Н.Д. Кузнецова. Сборник трудов*. Самара, 2001. Ч.2. С. 204 – 211.
17. Морохов И.Д., Трусов Л.Л., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды: М.: Атомиздат, 1977. 264 с.
18. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
19. Наноматериалы и нанотехнологии в ветеринарной практике. / В.Б.Борисевич, и др: Киев, Авицена, 2012. 512 с.
20. Tarasov S. Yu., Belyaev S. A., Lerner M. I. Wear Resistance of Structural Steel in Lubricants Bearing Metal Nanopowders // *Metal Science and Heat Treatment*. 2005. Vol. 47. November 11 – 12. P. 560 – 565.
21. Ghaednia, H.; Jackson, R. L. The effect of nanoparticles on the real area of contact, friction and wear. *J. Tribol.*, **2013**, 135, 041603.
22. ГОСТ 10791 – 2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006. 28 с.
23. Сайт компанії Aimol. URL: <http://www.aimol.nl> (дата звернення: 15.10.2021)
24. Чаусов М.Г., Косарчук В.В., Пилипенко А.П., Твердомед В.М. Спосіб підвищення зносостійкості пар тертя із металевих матеріалів. Патент України № 149049, Заяв. 07.05.2021; Опубли. 13.10.2021.
25. Харрис У. Дж. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис и др., пер. с англ. М.: Интекст, 2002. 408 с.
26. Майба И.А., Ананко А.М., Бекетов А.С., Никитина М.И. Обоснование технических требований к активаторам трения в зоне контакта «колесо – рельс» // *Вестник РГУПС*. 2016. № 4. С. 54-61.
27. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Косарчук В.В. Методика оценки уровня поврежденности материала конструкций. Перша науково - практична конф. “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління”, Тези доповідей, Київ. 4-5 грудня 2003 р. с. 30-31
28. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Косарчук В.В., Волчек Н.Л. Метод оценки поврежденности материала конструкций // *Збірник наукових праць КУЕТТ, серія “Транспортні системи і технології”*. 2003. вип. 3. с.99-103.
29. ДСТУ 7793:2015. Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом LM-твердості, Київ, ДП “УкрНДНЦ”. 2016. 15 с.
30. Tarasov, S. Yu.; Belyaev, S. A.; Lerner, M. I. Wear resistance of structural steel in lubricants bearing metal nanopowders. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005, 47(11 – 12), 560-565.
31. С.Н. Комаров, В.Ф. Пичугин. Металлоплакирующие смазочные материалы для пар трения сталь-сталь // *Долговечность трущихся деталей машин*. М.: Машиностроение, 1990. Т. 5. С. 70–85.

REFERENCES

1. Karpuschenko N.I.(2000) *Smazka – edinstvennyiy sposob preduprezhdeniya iznosa [Lubrication is the only way to prevent wear]*. Put i putevoe hozyaystvo. 2. S. 15–18. [in Russian]
2. D.N. Garkunov. (2001) *Tribotekhnika: iznos i bezyznosnost: Uchebnoe posobie dlya VUZov [Tribotechnics: Wear and Wearlessness: Textbook for Universities]*. Moskva, Izdatelstvo MSHA, 605 s. [in Russian]
3. A.V. Chichinadze, E.M. Berliner, E.D. Braun i dr (2003) *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) [Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics)]*. М.: Mashinostroenie. 576 s. [in Russian]
4. V.M.Buznik (2009). *Ultradispersnyie i nanorazmernyye poroshki: sozdanie, stroenie, proizvodstvo i primeneniye [Ultrafine and nanoscale powders: creation, structure, production and application]*. Tomsk: Izd-vo NTL. 192s. [in Russian]
5. Azarenkov M. O. & in (2014). *Nanomateriali i nanotekhnologiyi: navchalnyy posibnik [Nanomaterials and nanotechnologies: a textbook]*. Н. : HNU ImenI V. N. Karazlna, 316 s. [in Ukrainian]
6. Waqas, M.; Zahid, R.; Bhutta, M.U.; Khan, Z.A.; Saeed, A. A Review of Friction Performance of Lubricants with Nano Additives. *Materials* 2021, 14, 6310. <https://doi.org/10.3390/ma14216310>.
7. Singh, A.; Chauhan, P.; Mamatha, T. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Mater.Today Proc*. 2020, 25, 586–591.
8. D.N. Garkunov (1982). *Izbratelnyiy perenos v tyazhelonagruzhennyih uzlah treniya [Selective transfer in heavily loaded friction units]*. М.: Mashinostroenie. 207 s. [in Russian]

9. Ivanov S.P., Afanasenko V.G., Boev E. V., Nikolaev E.A. *Kompozitsiya metallosoderzhasey prisadki [The composition of the metal-containing additive]*. Patent RF # 2355922. Zayav. 18.06.2007; Opubl. 20.05.2009, Byul. # 14. [in Russian]
10. Safonov V. V., Dobrinskiy E. K., Gorohovskiy A. V., Buylov V. N., Safonov K. V., Galkin A. A. *Smazochnaya kompozitsiya [Lubricant composition]*. Patent RF # 2525238. Zayav. 09.04.2013; Opubl. 10.08.2014, Byul. # 22. [in Russian]
11. Babel V.G., Garkunov D.N., Lapteva V.G. *Smazka dlya tyazhelonagruzennykh uzlov treniya [Lubricant for heavy-duty friction units]*. Patent RF # 2338777. Zayav. 01.08.2007; Opubl. 20.11.2008, Byul. 32. [in Russian]
12. Kokhanovskii, V. A.; Glazunov, D. V. Selection of lubricant composition for open contact systems in rolling stock. *Russian Engineering Research*, 2016, 36(6), 449-451. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X16060113>.
13. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil / S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper // *Wear*. 2002, vol. 252. – S. 63-69.
14. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky, *Advances in Mechanics Research*. Volume 1 / Editors: Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011, 1-78.
15. V. V. Alisin, G. A. Simakova (2013). *Novyye smazki dlya lubrikatsii relsov vyisokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [New lubricants for the lubrication of rails of high-speed rail transport]*. *Tehnika zheleznykh dorog*, 4. S. 48 – 51. [in Russian]
16. Belyaev S. A., Tarasov S. Yu., Kolupaev A. V., Lerner M. I. (2001). *Povyshenie effektivnosti smazochnogo deystviya putem dobavleniya nanoporoshkov metallov v maslo [Increasing the efficiency of the lubricating action by adding metal nanopowders to the oil]*. *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, posvyaschennaya pamyati generalnogo konstruktora aerokosmicheskoy tekhniki, akademika N.D. Kuznetsova. Sbornik trudov*. Samara, Ch.2. S. 204 – 211. [in Russian]
17. Morohov I.D., Trusov L.L., Chizhik S.P. (1977). *Ultradispersnyie metallicheskie sredy [Ultradisperse metal media]*. M.: Atomizdat. 264 s. [in Russian]
18. Burtsev B.A., Kalinin H.B., Luchinskiy A.V. (1990). *Elektricheskyy vzryiv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh [Electric explosion of conductors and its application in electrophysical installations]*. M.: Energoatomizdat, 1990. 288 s. [in Russian]
19. V.B. Borisevich & dr. (2012). *Nanomaterialy i nanotekhnologii v veterinarnoy praktike [Nanomaterials and nanotechnologies in veterinary practice]*. Kiev, Avitsena, 512 s. [in Russian]
20. Tarasov S. Yu., Belyaev S. A., Lerner M. I. Wear Resistance of Structural Steel in Lubricants Bearing Metal Nanopowders // *Metal Science and Heat Treatment*. 2005. Vol. 47. November 11 – 12. P. 560 – 565.
21. Ghaednia, H.; Jackson, R. L. The effect of nanoparticles on the real area of contact, friction and wear. *J. Tribol.*, 2013, 135, 041603.
22. GOST 10791 – 2011. *Kolesa tselnokatanyie. Tehnicheskie usloviya [Wheels are solid-rolled. Specifications]*. M.: Standartinform, 2006. 28 s. [in Russian]
23. Sayt kompaniyi Aimol. Retrieved from <http://www.aimol.nl>
24. Chausov M.G., Kosarchuk V.V., Pilipenko A.P., Tverdomed V.M. Sposib pidvischennya znosostiykosti par tertya iz metalevikh materialiv [Method of increasing wear resistance of friction pairs made of metallic materials]. Patent Ukrainy # 149049, Zayav. 07.05.2021; Opubl. 13.10.2021. [in Ukrainian]
25. Harris U. Dzh. (2002) *Obobscheniye peredovogo opyita tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i relsa [Summarizing the best practices of heavy haul traffic: wheel-rail interaction issues]* per. s angl. M.: Intekst. 408 s. [in Russian]
26. Mayba I.A., Ananko A.M., Beketov A.S., Nikitina M.I. (2016). *Obosnovaniye tehnikeskikh trebovaniy k aktivatoram treniya v zone kontakta «koleso – rels» [Substantiation of technical requirements for friction activators in the wheel-rail contact zone]*. *Vestnik RGUPS*. 4. S. 54-61. [in Russian]
27. Lebedev A.A., Muzyika N.R., Kosarchuk V.V. (2003). *Metodika otsenki urovnya povrezhdennosti materiala konstruksiy [Methodology for assessing the level of damage to the material of structures]*. Persha naukovu - praktichna konf. “Problemi ta perspektivi rozvitku transportnih sistem: tekhnika, tekhnologiya, ekonomika i upravlinnya”, Tezi dopovidey, KiYiv. 4-5 grudnya 2003 r. s. 30-31 [in Russian]
28. Lebedev A.A., Muzyika N.R., Kosarchuk V.V., Volchek N.L. (2003). *Metod otsenki povrezhdennosti materiala konstruksiy [Methodology for assessing the level of damage to the material of structures]*. Zbirnik naukovih prats KUETT, seriya “Transportni sistemi i tekhnologiyi”. 3. s.99-103. [in Russian]
29. DSTU 7793:2015. (2016) *Materiali metalevi. Vznachennya rivnya rozsiyanih poshkodzhen metodom LM-tverdosti [Metallic materials. Determination of the level of scattered damage by LM-hardness method]*, Kyiv, DP "UkrNDNTs". 15 s. [in Ukrainian]
30. Tarasov, S. Yu.; Belyaev, S. A.; Lerner, M. I. Wear resistance of structural steel in lubricants bearing metal nanopowders. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005, 47(11 – 12), 560-565.
31. S.N. Komarov, V.F. Pichugin. (1990). *Metallolpakiruyushchie smazochnyie materialy dlya par treniya stal-stal [Metal-cladding lubricants for steel-to-steel friction pairs]*. *Dolgovechnost truschihsya detaley mashin*. M.: Mashinostroenie. T. 5. S. 70–85. [in Russian]

*Valerii Kosarchuk¹, Mykola Chausov², Volodymyr Tverdomed³, Andriy Pilipenko⁴,
Oleksandr Aharkov^{5*}*

¹ Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

² Professor, Department of Mechanics, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony str., 03041, Kyiv, Ukraine

³ Assistant professor, Railway Track and Track Facilities Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

⁴ Assistant professor, Department of Mechanics, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony str., 03041, Kyiv, Ukraine

⁵ Assistant professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

LUBRICANT COMPOSITION FOR INCREASING WEAR RESISTANCE OF HEAVY-LOADED FRICTION PAIRS

The proposed new lubricating composition, which significantly reduces the wear resistance of the rails and wheels of rolling stock during operation, prevents electrochemical corrosion of friction pairs “wheel – rail” and, most importantly, stabilizes the coefficient of friction at the optimum level after a relatively short operating time.

The experiments performed on the friction pair “sample of the bandage material of the railway wheel – a sample of the rail material” at the ratio of hardness at the bandage material (Rockwell hardness, HRC scale - 35.3) to the hardness of the rail material 1,1. Test results show that in the case of industrial lubricant, the BioRail brand, with the addition of nanomaterial friction pair with lower wear hardness of the rail metal sample after three hours in operation was practically not observed. Moreover, the average value of the friction coefficient for three hours of operation had been maintained at the level 0.25, which is optimal for the friction pair “wheel – rail”.

Keywords: *lubricating composition, wear resistance, rails, wheels of rolling stock, nanomaterial.*

Олена Крайнюк^{1*}, Юрій Буц², Павло Лоцман³, Віталій Барбашин⁴

¹ Доцент, к.т.н., доцент, Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вулиця Ярослава Мудрого, 25, Харків, Харківська область, 61002 Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9524-040X>

² Завідувач, проф. д.т.н., Кафедра технологій та безпеки життєдіяльності, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, проспект Науки, 9А, Харків, Харківська область, 61166, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0450-2617>

³ Доцент, к. геогр. н., Кафедра суспільно-економічних дисциплін і географії, Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди, вулиця Валентинівська, 2, Харків, Харківська область, Україна, 61168 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-5728>

⁴ Доцент, к.т.н., Кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вулиця Маршала Бажанова, 17, Харків, Харківська область, Україна, 61002 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3262-8305>

* Автор, відповідальний за листування: alenuvarova@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛОШЛАКІВ У ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ З ПОЗИЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

У роботі досліджується практика застосування золошлаків та золи-виносу теплових електростанцій у дорожньому будівництві, як один із способів утилізації промислових відходів.

Метою дослідження є визначення хімічного складу золошлаків ТЕС для вивчення можливості використання їх як сировину для дорожнього будівництва. Для досягнення мети були поставлені такі завдання: визначити основні фізико-хімічні властивості золи та золошлаків ТЕС, надати екологічну оцінку використання даних відходів у дорожньому будівництві.

Хімічний аналіз золошлаків Зміївської, Криворізької, Трипільської, Слов'янської ТЕС проводився для визначення основних компонентів: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O і K_2O . Вміст важких металів (ВМ) визначено за допомогою методу атомно-адсорбційного аналізу.

Досліджено міграційну здатність сполук важких металів із дорожнього полотна при використанні золошлаків при будівництві автомобільних доріг за допомогою побудови концентраційно-логарифмічних діаграм. Для прогнозування міграції сполук важких металів у довкілля при їх використанні у дорожньому будівництві побудовано окремо залежність концентрації найбільш вірогідних іонів (на прикладі купруму) $[Cu(OH)_n^{2-n}]$ від рН середовища. Доведено відсутність міграції сполук купруму у нейтральному та лужному середовищі, що робить їх використання безпечним. Аналогічні розрахунки виконано для інших важких металів.

Ключові слова: золошлаки ТЕС, міграційна здатність, важкі метали, дорожні основи.

Вступ. В Україні вже накопичено у відвалах ТЕС понад 360 млн. т золошлаків. При цьому утилізується приблизно 0,5...0,7 млн. т золошлакових відходів, що становить 8,3...11,7%. Такими темпами до 2035 року обсяг золовідвалів досягне 415 млн. т. Дана проблема буде ще актуальною тривалий час, оскільки вугілля залишиться важливим енергоносієм в Україні щонайменше на найближчі декілька десятків років [1].

Практика Європейського Союзу у цьому питанні кардинально відрізняється. В ЄС щорічно утилізується не менше 44% золошлакових відходів. У Данії, Італії та Нідерландах один з видів золи утилізується на 100%, зокрема використовується у будівництві замість піску (рис. 1) [1].

Навіть при нормальній експлуатації золошлаковідвалів мають місце прояви несприятливих геоекологічних процесів і явищ, які порушують екологічну рівновагу в районах їх розміщення.

Складування такого обсягу золошлакових матеріалів має негативні екологічні аспекти: споживання води, забруднення ґрунту, стічні води, негативний вплив на ґрунтові води, забруднення повітря при пиленні відвалів [2, 3]. Тому вирішення проблеми утилізації золошлаків є дуже актуальним.

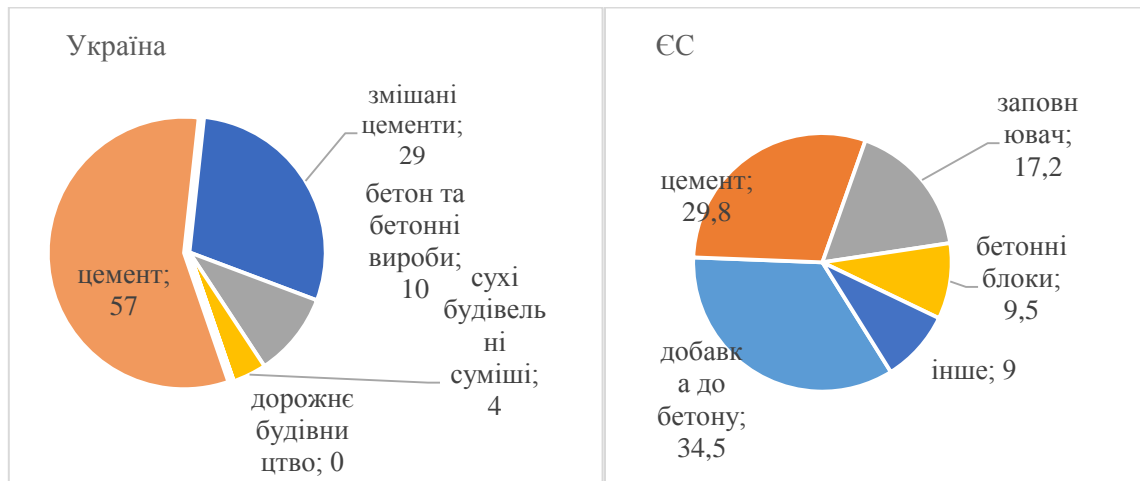


Рис. 1. Напрями використання золошлакових відходів [1]

Вміст компонентів у золошлаках може значно перевищувати значення їх концентрацій у земній корі: CaO може перевищувати значення у 4...12 разів, Al₂O₃ – у 2 рази, Fe₂O₃ – у 1,5...3 рази, MgO – у 2...3 рази. Часто у вугільних відходах України присутні свинець, мідь, цинк, кадмій, хром, нікель та ін., а також радіонукліди. Токсичні та мінеральні компоненти присутні у мінеральній фазі та в органічних частинках. Найбільшу небезпеку вони становлять при впливі на повітря у складі пилу (кварц, муліт, токсичні елементи-домішки, конденсовані ароматичні вуглеводні) та/або у водній фазі (токсичні мікроелементи у рухомій, водорозчинній формі). Крім того шкідливі речовини, що перебувають у складі золошлакових відходів, можуть мати кумулятивну дію. Вони можуть призвести до деградації екосистеми та виникнення різних захворювань людини, у тому числі онкологічних [3].

Золошлакові відходи ТЕС (ЗШВ) – це тверді продукти згоряння вугілля, що складаються в основному з породоутворюючих компонентів. Мінеральна частина вугільного палива на 85...95% складається з глинистих мінералів, аргілітів, алевролітів. Інші 5...15% – сполуки, головним чином, заліза, кальцію та мікроелементів. Золошлакові відходи є дрібнозернистим матеріалом, третина зерен якого має розміри 1...5 мм. Характеристики золошлакових відходів відрізняються на різних теплоелектростанціях, оскільки залежать від особливостей мінералогічного складу вугілля, способу підготовки палива до спалювання, технології спалювання, системи очищення димових газів від золи та способу її транспортування в золовідвали.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Аналіз закордонного досвіду свідчить, що однією з найперспективніших сфер утилізації ЗШВ може і має бути дорожнє будівництво, проте в Україні золошлакові відходи використовують вкрай рідко. Так Компанія ДТЕК Енерго доповіла про реалізацію унікального для країни проекту – будівництві 900 м дороги в районі Бурштинської ТЕС з використанням золошлаків.

З країн Західної Європи перспективні технології щодо використання золошлаків при будівництві автомобільних доріг використовує Франція, яка застосовує «сухе» видалення. Зола ТЕС використовується у всіх елементах дорожньої конструкції: як у верхніх шарах основи як компонент в'язучого, так і в нижніх прошарках дорожнього одягу як мінеральний матеріал, укріплений гідравлічним в'язучим. Також ЗШВ застосовують для укріплення ґрунту. Для

організації процесу утилізації у Франції існують державні пільги для бізнесу, що використовує золу, та запроваджено заборони на використання інших, більш витратних будівельних матеріалів, таких як ґрунт і пісок. Тому майже 100% золи йде на подальшу переробку та утилізацію [5].

У США зола використовується у портландцементі в бетоні, як заповнювач для дорожніх основ і насипах. При цьому покращуються деякі характеристики бетонів: підвищується міцність і збільшується довговічність бетонного виробу. Масштабне застосування золи в будівництві доріг почалося з 1986 р. Зараз, щоб стимулювати ширше використання продуктів згоряння вугілля, Федеральне агентство з охорони навколишнього середовища, міністерство енергетики та Федеральне управління автомобільних доріг, а також Американська асоціація з виробництва золи вугілля та Група з утилізації твердих побутових відходів спільно спонсорують «Партнерство використання продуктів спалювання вугілля». Проект призначений для демонстрації екологічних переваг та потенційних наслідків використання золошлаків [6].

У Німеччині для продуктивного використання ЗШВ на багатьох електростанціях зводять силоси ємністю 40...60 тис. т і обов'язково будують невеликі силоси з добовою та дводобовою ємністю, з яких відбирають проби для лабораторного аналізу золи, що обов'язково для золи, яка використовується у будівельній індустрії. Щорічно у Німеччині 3,1 млн. т цементу замінюється золою. За рахунок цього економляться ресурси та енергія, необхідна для виробництва цементу [7, 8].

Аналіз та оцінка глобальних експериментальних даних щодо використання золи у дорожньому будівництві виконана авторами [9]. Проте утилізація золошлакових відходів у будівництві має певні технічні й організаційні проблеми. Зола неоднорідна за своїм складом та розміром частинок, а будівельна промисловість висуває жорсткі вимоги до характеристик сировини. Також, через неоднорідність свого походження, у складі золи можуть бути компоненти, небажані для тих чи інших виробництв, зокрема токсичні ВМ.

У більшості випадків потрібно, щоб матеріал був сухим, а у золовідвалах він завжди вологий, що також додає труднощів будівельним організаціям. Золошлаки, що утворюються при спалюванні вугілля з різних родовищ, мають мінералогічний та хімічний склад, що істотно відрізняється, і, тому, вимагають індивідуального вибору процесу переробки і раціональних напрямів експлуатації. Ці процеси мають на увазі трудомісткі лабораторні та заводські випробування.

Мета і завдання дослідження. У даній роботі досліджується практика застосування в дорожньому будівництві золошлаків та золи-виносу теплових електростанцій, як один із способів утилізації промислових відходів.

Метою дослідження є визначення хімічного складу золошлаків ТЕС для вивчення можливості використання їх як сировину для дорожнього будівництва. Для досягнення мети були поставлені такі завдання: визначити основні фізико-хімічні властивості золи та золошлаків ТЕС, надати екологічну оцінку використання даних відходів у дорожньому будівництві.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні як компонент сировинної суміші вивчалися золошлаки відвалів Зміївської, Криворізької, Трипільської, Слов'янської ТЕС. Гранулометричний склад золи-виносу, її питома поверхня визначалися відповідно до нормативних і методичних вимог СОУ 42.1-37641918-104:2013, ДСТУ Б В.2.7-119-2003, ДСТУ Б В.2.7-205:2009, ДСТУ Б В.2.7-211:2009, ДБН В.2.3-4:2007, ГБН В.2.3-37641918-554:2013, ДСТУ Б В.2.7-30:2013.

Хімічний аналіз золи проводився для визначення основних компонентів: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O і K_2O . Вміст важких металів визначено за допомогою методу атомно-адсорбційного аналізу.

Розглянемо склад золошлаків ряду ТЕС України, що виконано у рамках даного дослідження та іншими авторами [10-15] (табл. 1).

Крім наведених макроелементів, що складають основну масу відходів, золошлакові відходи містять мікродомішки таких елементів як цинк, талій, свинець, хром, марганець, кобальт, нікель, ртуть, миш'як, сурма, ванадій, стронцій, германій, бор, берилій, фтор та ін. [16].

За допомогою петрографічного аналізу нами доведено присутність у золошлаку Зміївської теплоелектростанції оплавлених зерен кварцу, що мають відповідні показники заломлення. В периферії ізотропно з $N=1,470-1,490$, а в центральній частині зерна подібні до кварцу з $N_e=1,554$, $N_0=1,543$. Можна спостерігати присутність непрозорих бурих зі слабким металевим блиском зерен гідроксидів феруму. Також виявлено білі, напівпрозорі зерна, імовірно, воластоніту $CaSiO_3$ з $N_q=1,632$, $N_p=1,619$. Знайдені жовто-бурі зерна з $N_m=1,645$ ймовірно вказують на присутність алюмосилікатів феруму. Склоподібні зерна з $N=1,625-1,638$ вказують на залізоалюмосилікатний склад. Співвідношення мінеральної фази і скла змінюється, але можна зазначити, що переважають у золошлаку алюмосилікати, силікати кальцію і скла (рис. 2). Важкі метали зосереджені головним чином у аморфізованих глинистих частинках, у меншій мірі у шлаковому склі та ще менше у зернах кварцового піску. Співвідношення «зола: шлакові частинки: кварцовий заповнювач» можна визначити у співвідношенні як 8...12 : 61...64 : 20...31%.

Таблиця 1. Середній хімічний склад золошлакових відходів ТЕС

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Власні дослідження								
Зміївська	40-60	10,7-20,4	4,0-10,2	2,5-9,9	0,5-5,0	-	-	0,06-2,0
Криворізька	50,8	21,8	10,8	2,4	1,3	-	-	2,1
Трипільська	38-42	20-25	12,1	10,0	1,4	-	-	1,1
Слов'янська	48-53	22-26	8	2-4	1,5	-	-	2,4
Аналіз літературних даних								
Бурштинська [10, 11]	52,1-56,7	22,6-26,6	9,3-13,0	2,5-4,1	1,9-2,4	0,5	1,5-4,5	0,2-0,4
Старобешівська [12]	44-50	24-30	6-8	2,5-4,6		-	-	1,2
Краматорська ТЕЦ [12]	49,4	22,5	17,1	10,1		-	-	-
Вуглегірська [12]	16,7	40,6	23,0	8,4		-	-	0,02
Миронівська [12]	67,8	19,8	10,9	5,5		2,8		2,1-7,0
Ладижинська [13]	46-55	19-25	9-12	1-1,6	-	-	-	0,5-0,7
Добровірська [14]	46,7	21,4	17,4	4,4	2,0	0,5	1,8	0,4
Запорізька [15]	53-57	18-22	17-20	2-3	1,2-1,6	-		1,5
Кларк у земній корі	55,3	14,3	6,7	4,8	3,3	3,2	3,2	-

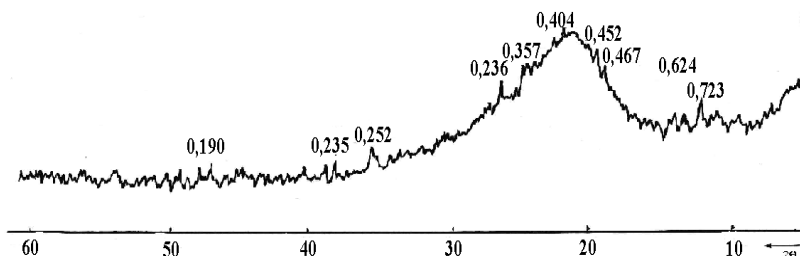
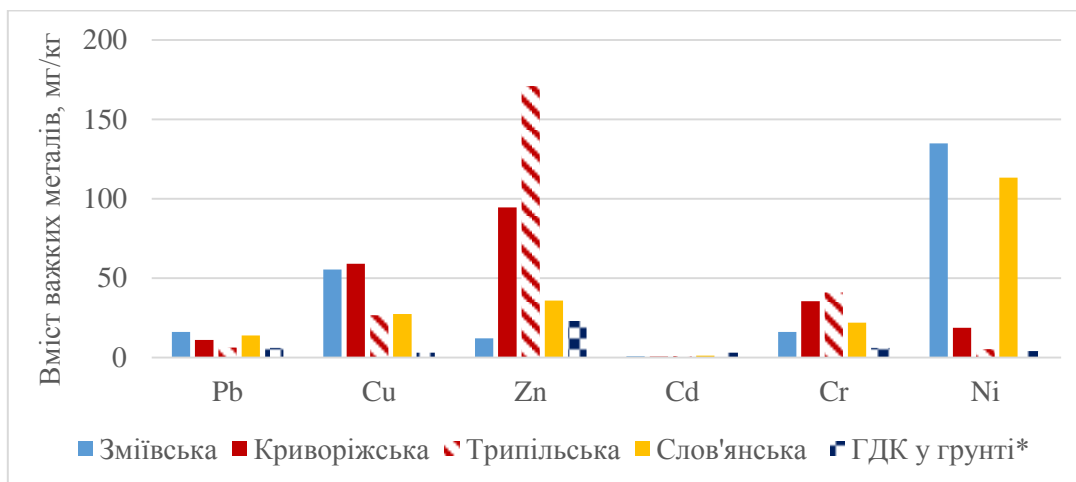


Рис. 2. Рентгенограма золошлаку Зміївської ТЕС

Аналіз золошлаків Зміївської, Криворізької, Трипільської, Слов'янської ТЕС підтверджує наявність у зразках рухомих форм свинцю, курпуму, цинку, хрому, нікелю (рис. 3) у кількості, що у декілька разів перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК).

У золовідвалі відбуваються два процеси. Перший – це випаровування води та утворення так званих «пляжів» у золовідвалі. «Пляж» є сухою ділянкою частинок пилу. Другий процес – інфільтрація води та надходження розчинених форм токсичних компонентів золошлаків у підземні води та водойми поза золовідвалу [4]. Нами також було раніше досліджено міграцію важких металів із золовідвалу Зміївської ТЕС [2]. Тому можна припустити, що подібний процес із міграцією важких металів у докільля матиме місце і при використанні золошлакових відходів у дорожньому будівництві наприклад при будівництві основи дорожнього полотна, укріпленні ґрунтів, при прокладанні шарів дорожнього одягу.



* Наказ МОЗУ 14.07.2020 № 1595 Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті

Рис. 3. Вміст важких металів у золошлаках ТЕС (рухлива форма)

Очевидно, що цей спосіб дозволяє утилізувати відходи ТЕС, вирішує екологічні проблеми із накопиченням золошлаків та звільненням території, що відводиться під золовідвали, а також знижує вартість будівництва дороги. Необхідність утилізації золошлаків ТЕС диктується економічними міркуваннями та вимогами охорони довкілля. Золошлаковідвали забруднюють повітряний та водний басейни, змінюють хіміко-мінеральний склад ґрунтів. Пиління відвалів негативно впливає на здоров'я людей та продуктивність сільськогосподарських угідь. Заміна природної сировини на золошлаки сприяє охороні надр, а ліквідація золошлаковідвалів сприятливо позначається на екологічному стані. Однак слід вивчити доцільність використання тих чи інших видів золи та шлаків на різних типах ґрунтів для того, щоб не зіткнутися з проблемою міграції токсичних компонентів із дорожнього полотна на прилеглі сільськогосподарські угіддя.

Досліджені зразки золошлаку автори [17] відносять до відходів з високим вмістом горючих речовин, що унеможливує їх застосування у будівництві дорожніх покриттів. Втрати при прожарюванні становлять 60...76%. Дане ствердження не є умовою для відмови від використання золи та шлаків ТЕС, але підстава для додаткових досліджень золошлаків як з екологічної точки зору, так і з урахуванням питань безпеки та доцільності.

При вивченні можливості міграції важких металів із шарів дорожнього одягу слід враховувати рН середовища. Оскільки рухливі форми можуть утворюватися у окремих умовах.

На підставі побудованих нами концентраційно-логіфімічних діаграм можна прогнозувати рухливість сполук важких металів у залежності від рН середовища (рис. 4). Діаграма вказує на утворення іонів $[Cu(OH)_n]^{2-n}$. У кислому середовищі будуть присутні іони Cu^{2+} , кількість яких зі збільшенням рН в ґрунтового розчині різко зменшується. Наприклад, при рН=4,5 концентрація іонів $[Cu^{2+}]$ може досягати 1 моль/л, при рН=5 $lg[Cu^{2+}]=-1$, тобто концентрація іонів $[Cu^{2+}]$ не буде перевищувати 0,1 моль/л, а при рН=6 $lg[Cu^{2+}]=-3$, тобто концентрація іонів

$[Cu^{2+}]$ не буде перевищувати 0,001 моль/л, далі при рН більше 7 кількість $[Cu^{2+}]$ стає незначною, утворюється нерозчинний $Cu(OH)_2$ і тільки при рН близькому до 14 в незначній кількості утворюються іони $[Cu(OH)_3^-]$, розчинність яких трохи більше, ніж розчинність $Cu(OH)_2$, однак теж незначна.

Для спрощення прогнозування міграції сполук купруму побудовано окремо залежність концентрації найбільш вірогідних іонів $[Cu(OH)_n^{2-n}]$ від рН середовища та створено лінію тренду. За допомогою останньої представимо тенденції у даній моделі і зробимо імовірнісний прогноз (рис. 4). Залежність розчинних сполук купруму від рН піддається такій закономірності:

$$\lg[Cu(OH)_n^{2-n}] = 0,0068 \cdot pH^3 - 0,0089 \cdot pH^2 + 2,2185 \cdot pH + 9,251 \quad (1)$$

Дана залежність дуже добре узгоджується із побудованою концентраційно-логічною діаграмою, про що говорить достовірність апроксимації $R^2=0,99$. При рН ґрунту більше 6,5...7 купрум утворює важкорозчинні сполуки, що не будуть мігрувати у навколишнє середовище, у прилеглих до дорожнього полотна ґрунті та ґрунтових водах не будуть присутні розчинні та легкодоступні для рослин сполуки купруму. Тобто навіть при наявності у золошлаку купруму у нейтральному та лужному ґрунтах міграція не матиме місце.

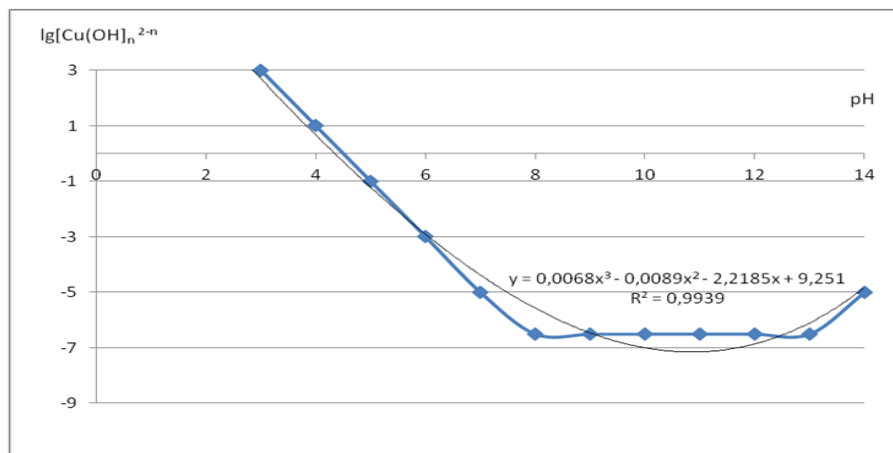


Рис. 4. Залежність утворення частинок $[Cu(OH)_n^{2-n}]$ від рН ґрунтового середовища

Аналогічні залежності нами побудовано для інших сполук металів: плумбуму, цинку, кадмію, хрому, нікелю та ін., на підставі яких можна судити про можливість міграційних процесів сполук важких токсичних металів у довкіллі [17]. Наприклад при $pH < 6,5$ плумбум буде знаходитися у розчинній формі у вигляді Pb^{2+} . При $pH=9-13$ утворюються нерозчинні частинки $[Pb(OH)_n^{2-n}]$, головним чином $Pb(OH)_2$, міграція сполук плумбуму не відбувається, спостерігається його накопичення. У таких умовах використання золошлаків, що мають у своєму складі плумбум не представляє небезпеки для довкілля. Розчинні сполуки цинку, хрому, нікелю здатні утворюватися як у кислому, так і у нейтральному середовищі, лише у лужному ці ВМ знаходяться у важкорозчинній формі і не відбувається їх міграція у навколишнє середовище.

Оскільки часто у складі відходів вугільних ТЕС (ТЕЦ) України присутні Pb, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni тощо, а також радіонукліди автори підкреслюють важливість поставлених питань як з позицій екологічної безпеки, так і в зв'язку з перспективами використання золошлакових матеріалів.

З урахуванням світового досвіду можна запропонувати такі заходи щодо активізації застосування золошлакових відходів у дорожньому будівництві:

1. З метою скорочення обсягів золовідвалів ТЕС мають відпускати їх споживачам безоплатно, що слід встановити на законодавчому рівні.

3. Необхідно виконати регіональні дослідження з вивчення екологічних та будівельних властивостей золошлаків ТЕС України для надання проектним організаціям необхідної інформації.

4. На регіональному рівні зобов'язати проектні організації передбачати використання золошлаків у проектах автомобільних шляхів.

5. Необхідно передбачити заходи економічної підтримки дорожніх організацій, що застосовують золошлаки, та їх економічного стимулювання.

Висновки. Зола від вугілля різних родовищ країни суттєво відрізняється хімічним складом, вмістом і співвідношенням головних елементів, а також присутністю та кількістю важких металів, що є визначальним для аналізу доцільності промислового використання золошлаків у дорожньому будівництві. Тому у кожному конкретному випадку необхідне комплексне дослідження хімічного складу золошлаків. Дослідження, спрямовані на моніторинг й оцінювання впливу золошлаків на навколишнє середовище, мають привернути увагу фахівців щодо вирішення проблеми утилізації золошлакових відходів з урахуванням світового досвіду та зменшення шкідливого впливу цих відходів в майбутньому.

Необхідність утилізації золошлаків диктується економічними міркуваннями та вимогами охорони довкілля. Золошлаковідвали забруднюють повітряний та водний басейни, змінюють хіміко-мінеральний склад ґрунтів. Пиління відвалів негативно впливає на здоров'я людей та продуктивність сільськогосподарських угідь. Заміна природної сировини на золошлаки сприяє охороні надр, а ліквідація відвалів сприятливо позначається на екологічній обстановці.

Але використовувати золошлаки слід тільки після ретельного дослідження його складу. Досліджений склад золошлаків Зміївської, Криворізької, Трипільської, Слов'янської ТЕС, встановлено присутність таких металів як Pb, Cu, Zn, Cd, Ni, у кількостях, що у десятки разів перевищують ГДК у ґрунті. Досліджено міграційну здатність сполук важких металів із дорожнього полотна при використанні золошлаків при будівництві автомобільних доріг за допомогою побудови концентраційно-логіарифмічних діаграм. На прикладі купрум доведено, що при використанні золошлаків у нейтральному та лужному середовищі міграція у довкілля не матиме місце, що дає змогу використовувати золи та золошлаки ТЕС для влаштування дорожньої основи. Аналогічні розрахунки виконано і для інших важких металів.

Авторами досліджено карту ґрунтів України для аналізу можливості використання золошлаків у дорожньому будівництві, що планується обговорювати у наступних публікаціях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григоренко Ю. З двох зол: Україна може наростити утилізацію золошлаків в 11 разів // GMK Center, 26 травня 2021. – URL: <https://gmk.center/ua/posts/z-dvoh-zol-ukraina-mozhe-narostiti-utilizaciju-zoloshlakiv-v-11-raziv>
2. Krainiuk O.V., Buts Y.V., Ponomarenko R.V., Asotskyi V.V., Kovalev P.A. The geoecological analysis performed for the geochemical composition of ash and slag waste obtained at Zmiiv thermal power plant // Journ. Geol. Geograph. Geoecology, 2021. 30(2). P. 298-305. DOI: <https://doi.org/10.15421/112126>.
3. Крайнюк О. В., Буц Ю. В., Пономаренко Р. В., Барбашин В. В., Лоцман П. І. Техногенний вплив складу золошлакових відходів Зміївської теплоелектростанції на педосферу // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія», 2021, Вип. 25. С. 70-80. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-06>
4. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Radchenko, O., Romanenko, Effect of Power Plant Ash and Slag Disposal on the Environment and Population Health in Ukraine // Journal of Health Pollution 11.31 (2021): 210910. DOI: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-11.31.210910>
5. XU, Gang; SHI, Xianming. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review // Resources, Conservation and Recycling, 2018, 136: 95-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010>
6. Lindon, K. A. Properties and use of coal fly ash: Use of fly ash for road construction, runways and similar projects. – London, 2015. – 132 p.
7. Vateva, Iveta, and David Laner. Grain-size specific characterisation and resource potentials of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash: A German case study // Resources, 2020. 9(6). P. 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources9060066>

10. Koshlak H. V., Pavlenko A. M. (2021) Perspektyvy vykorystannia zoly TES dlia vyhotovlennia budivelnykh materialiv [Prospects for the use of TPP ash for the production of building materials] *Ecological safety and balanced resource use: Scientific and technical journal*, 1. 92–101. [in Ukrainian] DOI: 10.31471/2415-3184-2021-1(23)-92-101.
11. Myroniuk I.F., Tatarchuk T.R., Vasylieva H.V., Yaremii I.P., Mykytyn I.M. (2018) Morfolohiia, fazovyi sklad ta radiolohichni vlastyvyosti zoly vynosu Burshtynskoi teplovoi elektrostantsii [Morphology, phase composition and radiological properties of fly ash from the Burshtyn thermal power plant] // *PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE*, 19(2). 171-178 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.19.2.171-178> .
12. Iatsyshyn A. V., Matvieieva I. V., Kovach V. O., Artemchuk V. O., Kameneva I. P. (2018) Osoblyvosti vplyvu zolovidvaliv pidpriemstv teploenerhetyky na navkolnyshnie seredovyshe [Peculiarities of environmental impact of ash disposals of thermal power plants] *Problems of emergency situations*, 2(28). 57–68. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2594489>.
13. Vozniuk I. M. Postolatii M. O., Kovalskyi V. P. (2019) Vykorystannia vidkhodiv promyslovosti v tekhnologii vyrobnnytstva budivelnykh materialiv. [The use of industrial waste in the technology of production of building materials] *Actual tasks of modern technologies Collection of theses of reports of the VIII International scientific and technical conference of young scientists and students*. 1. 54–55. [in Ukrainian].
14. Zvit shchodo provedennia analizu sytuatsii z zolozhuzhelovymy vidvalamy na terytorii Lvivskoi ta Ivano-Frankivskoi oblasti v ramkakh realizatsii Proektu Prohramy Transkordonnoho Spivrobotnytstva Polshcha-Bilorus-Ukraina 2007 – 2013 «Rozvytok pidpriemnytstva shliakhom pokrashchennia dostupu do investytsiinykh dilianok u misti Liubachiv ta gmini Liubachiv, a takozh vidnovlennia dehradovanykh zemel Yavorivskoho raionu ta m. Novyi Rozdil (2015) [Report on the analysis of the situation with rock dumps in the territory of Lviv and Ivano-Frankivsk regions in the framework of the implementation of the Project of the Cross-Border Cooperation Program Poland-Belarus-Ukraine 2007 - 2013 "Development of entrepreneurship by improving access to investment sites in the city of Lyubache and restoration of degraded lands of Yavorivsky district and the city of New Section]» 1.- URL: <http://institute.org.ua/doc/zvitzola1Final.pdf> [in Ukrainian].
15. Tishchenkova M. O. (2021) Pokrashchennia ekolohichnoho stanu atmosferneho povitria navkolo zoloshlakovidvalu TOV «devro-Rekonstruktsiia» shliakhom zastosuvannia poliakrylamidnoi kompozytsii [Improving the ecological state of the atmospheric air around the ash and slag doors of Euro-Reconstruction LLC by using a polyacrylamide composition]. Dis. ... cand. tech. sciences on special 06/21/01 "Environmental safety", Kyiv. 126. [in Ukrainian].
16. Serdiuk V. R. Rudchenko D. H. Hudz D. V. (2021) Vykorystannia zoly vynosu Burshtynskoi TES v tekhnologii vyrobnnytstva avtoklavnoho hazobetonu [Use of fly ash from Burshtynskaya TPP in autoclaved aerated concrete production technology] *Bulletin of the Vinnytsa Polytechnic Institute*. 2. 24–31. [in Ukrainian].
17. Buts Y., Asotskyi V., Krainyuk O., Ponomarenko R., Kovalev P. (2019) Dynamics of migration property of some heavy metals in soils in Kharkiv region under the influence of the pyrogenic factor *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 28(3). 409-416. DOI <https://doi.org/10.15421/111938>

Olena Krainiuk¹, Yuri Buts², Pavel Lotsman³, Vitaly Barbashyn⁴

¹ Assistant professor, Department of Metrology and Life Safety, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo st, 25, Kharkiv, 61002, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9524-040X>

² Professor, Department of Technology and Life Safety, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, prosp. Nauky, 9A, 61001, Kharkiv, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0450-2617>

³ Assistant professor, Department of Socio-Economic Disciplines and Geography, H.S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University, Valentynivska St, 2, Kharkiv, Ukraine, 61168. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-5728>

⁴ Assistant professor, Department of labor protection and life safety, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Bazhanov Street, Kharkiv, 61002, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3262-8305>

THE USE OF ASH AND SLAG IN ROAD CONSTRUCTION IN THE POSITION OF ENVIRONMENTAL SAFETY

This paper explores the practice of using ash and slag and fly ash from thermal power plants in road construction as one of the ways to dispose of industrial waste.

The purpose of the study is to determine the chemical composition of TPP ash and slag to study the possibility of using it as a raw material for road construction. To achieve the goal, the following

tasks were set: to determine the main physical and chemical properties of ash and ash and slag from thermal power plants, to give an environmental assessment of the use of these wastes in road construction.

Chemical analysis of ash and slag from Zmievskaya, Krivorozhskaya, Trypilskaya, Slavyanskaya TPPs was carried out to determine the main components: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O and K_2O . The content of heavy metals was determined using the method of atomic absorption analysis.

The migration ability of heavy metal compounds from the roadway using ash and slag in the construction of roads has been studied using the construction of concentration-logarithmic diagrams. To predict the migration of heavy metal compounds into the environment when they are used in road construction, a separate dependence of the concentration of the most probable ions was plotted (for example, cuprum) $[\text{Cu}(\text{OH})_n^{2-n}]$ on the pH of the environment. The lack of migration of cuprum compounds in a neutral and alkaline environment has been proven, which makes their use safe. Similar calculations were made for other metals.

Keywords: TPP ash and slag, migration capacity, heavy metals, road bases.

УДК 656.2

Андрій Сулим^{1*}, Павло Хозя², Андрій Стринжа³, Владислав Речкалов⁴, Володимир Федоров⁵

¹ Заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

² Завідувач науково-дослідної лабораторії, Науково-дослідна лабораторія експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»,

вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

³ Завідувач науково-дослідної лабораторії, Науково-дослідна лабораторія вантажного та спеціального рухомого складу, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-7006>

⁴ Старший науковий співробітник, Науково-дослідна лабораторія експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-1307>

⁵ Науковий співробітник, Науково-дослідна лабораторія вантажного та спеціального рухомого складу, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33 м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0963-7265>

* Автор, відповідальний за листування: sulim1.ua@gmail.com

ШЛЯХИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ УДОСКОНАЛЕННЯ ВАГОНІВ-ДУМПКАРІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИМИ КОЛІЯМИ 1520 ММ

У статті розглянуто моделі вагонів-думпкарів, які складають основну частку у вагонному парку магістрального залізничного транспорту колії 1520 мм. Наведено технічні характеристики найбільш поширених моделей вагонів-думпкарів магістрального призначення. Представлено конструктивні особливості вагона-думпкара моделі 31-638, призначеного для транспортування та механізованого розвантаження сипких і кускових вантажів. Наведено сучасні моделі вагонів-думпкарів вітчизняного та іноземного виробництва для магістрального залізничного транспорту колії 1520 мм, які були створенні та поставлені у серійне виробництво протягом останніх років. За результатами порівняльного аналізу технічних характеристик вагонів-думпкарів минулого покоління до сучасних моделей вагонів-думпкарів встановлено, що одними з головних переваг останніх є зниження маси тари, підвищення вантажопідйомності і об'єму кузова, підсилення міцності і надійності окремих вузлів та систем. Визначено проблемні вузли та системи існуючих моделей вагонів-думпкарів магістрального призначення за результатами їх експлуатації, які потребують подальшого підсилення. Визначено основні напрямки вдосконалення конструкції сучасних моделей вагонів-думпкарів для магістрального залізничного транспорту колії 1520 мм.

Запропоновано технічні вимоги до вагонів-думпкарів наступного покоління, які планується створити та впровадити до серійного виробництва у найближчі роки для експлуатації на коліях магістрального залізничного транспорту. Сформовано технічні вимоги з урахуванням результатів досліджень конструкцій сучасних вагонів-думпкарів магістрального призначення,

огляду технічної та конструкторської документації на ці вагони, а також аналізування вимог та побажань замовників. Обґрунтовано необхідність проведення відповідних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт з розроблення вагонів-думпкарів нового покоління для магістрального залізничного транспорту.

Матеріали статті сприятимуть створенню нових моделей вагонів-думпкарів для магістрального залізничного транспорту та глибокій модернізації існуючих моделей, а також підвищенню ефективності їх експлуатації.

Ключові слова: вагон-думпкар, конструкція, магістральний залізничний транспорт, міцність, ресурс, технічні характеристики.

Вступ та постановка проблеми. Вагон-думпкар – вантажний вагон з пристроєм для механізованого розвантаження сипких та кускових вантажів. Для забезпечення необхідної міцності підлоги кузова думпкара зроблена багатошаровою і складається з покладеного на раму нижнього сталевго листа, амортизуючого прошарку, і верхнього сталевго листа (паketу листів). На відміну від інших вантажних вагонів думпкар має кузов, що нахиляється під час розвантаження, і борти, які відкидаються під час нахилу кузова. Нахил кузова забезпечується пневматичними циліндрами, шарнірно підвішеним на кронштейнах нижньої рами вагона. Стиснене повітря до пневматичних циліндрів подається від компресора локомотива. У вихідне положення після розвантаження кузов встановлюється під дією власної ваги або примусово за допомогою посадочних пневматичних циліндрів.

Вагони-думпкари складаються з таких систем та комплектуючих вузлів:

ходової частини (2-, 3-, 4-осьові візки, рами візків з поперечною балкою та боковинами, колісні пари з буксами на підшипниках, ресорні комплекти);

верхньої рами з кузовом, оснащеним бортами, що піднімаються, відкидаються або комбінованими;

нижньої рами: хребтова балка, буферні бруси, шворневі балки, циліндричні балки;

автозчепних пристроїв;

ударно-тягових пристроїв;

гальмівної системи;

пневматичного (або гідравлічного) обладнання для нахилу кузова;

важільної системи механізму відкривання бортів.

Вагони-думпкари в основному застосовуються для транспортування розкритих порід у відвали, корисних копалин на склади або збагачувальні фабрики, порід для будівництва залізниць.

В цій роботі запропоновано більш детально зосередитися на вагонах-думпкарах, призначених для експлуатації магістральними коліями залізниць з шириною 1520 мм.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми. В Україні станом на середину 2021 року налічувалось 2085 вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями. При цьому на середину 2020 року вантажний парк налічував 2336 вагонів-думпкарів [1], тобто за рік кількість вагонів-думпкарів зменшилась на 251 одиниці (близько 11 %). Рівень зносу цього типу рухомого складу один з найбільших і складає 98 % [2].

На даний час в експлуатації АТ «Укрзалізниця» та операторів приватних компаній знаходиться понад 15 різних моделей вагонів-думпкарів та їх модифікацій [3]. Аналіз існуючого вітчизняного парку вагонів-думпкарів магістрального призначення дозволив встановити, що його основу складають вагони моделей 5BC-60, 31-638, 31-656, 31-673, 31-675, 31-676, 31-945 та їх модифікації, які побудовані ще у 60-90 роках минулого століття [1–5]. Вагони-думпкари зазначених моделей серійно виготовлялись на ВАТ «Калінінградський вагонобудівний завод», ВАТ «Деміхівський машинобудівний завод», ВАТ «Стахановський вагонобудівний завод» [3, 4]. Слід зазначити, що деякі із вище перелічених підприємств продовжують серійний випуск зазначених моделей. Основні технічні характеристики цих моделей вагонів-думпкарів зображено в таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики вагонів-думпкарів магістрального призначення [3, 4]

Найменування характеристики	Модель вагона-думпкара						
	5BC-60	31-638	31-656	31-673	31-675	31-676	31-945
Вантажопідйомність, т	60	60	60	66	67	67	66
Об'єм кузова, м ³	26,3	26,2	32	35	35,2	35,2	36
Маса тари вагона, т	29	27	27,8	27,5	26,4	26,7	28
Коефіцієнт тари	0,48	0,45	0,46	0,42	0,4	0,4	0,42
Питомий об'єм, м ³ /т	0,44	0,44	0,53	0,53	0,53	0,53	0,55
Розрахункове навантаження від колісної пари на рейку, кН (тс)	215,1 (22,0)	212,7 (21,7)	214,9 (21,9)	230,5 (23,5)	230,3 (23,5)	230,3 (23,5)	230,5 (23,5)
Погонне навантаження, кН/м (тс/м)	74,4 (7,6)	72,1 (7,35)	72,6 (7,41)	-	77,4 (7,9)	73,5 (7,5)	78,0 (8,0)
Конструкційна швидкість, км/год на магістральних коліях; на промислових коліях	120 75	120 70	120 70	120 70	120 70	120 70	120 70
База вагона, мм	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
Довжина по осях зчеплення, мм	11720	11830	11830	11830	11830	12450	11830
Кількість розвантажувальних циліндрів, шт	4	4	4	4	4	4	4
Максимальна ширина кузова, мм	3210	3210	3204	3197	3185	3185	3240
Кут нахилу кузова під час розвантаження, °	45	45	45	45	45	45	45
Мінімальний радіус вписування в криву, м	80	80	80	80	80	80	80
Нормативний строк служби, років	22	22	22	22	22	22	22
Рік постановки на серійне виробництво	1962	1971	1978	1988	1990	1993	1992
Рік зняття з серійного виробництва	1972	-	1988	1995	-	-	-
Габарит	1-Т	1-Т	1-Т	1-Т	1-Т	1-Т	1-Т

Значний внесок у розробку, створення та впровадження вагонів-думпкарів магістрального призначення зробили співробітники ВАТ «Калінінградський вагонобудівний завод», ВАТ «Деміхівський машинобудівний завод», ВАТ «Стахановський вагонобудівний завод», ПрАТ «Дніпровагонмаш» та ряду інших підприємств. Результати праці цих колективів висвітлено в роботах Логінова О.І., Афанаскіна М.Є. [4], Каблукова В.А., Савчука О.М. [5], Калмикова В.Г., Кузнецова О.Г. [6], Шадура Л.А. [7]. Слід зазначити, що впровадження вагонів-думпкарів дозволило підвищити продуктивність праці та суттєво знизити витрати на навантажувально-розвантажувальні роботи.

За даними з відкритих джерел інформації відомо, що серед перелічених моделей на вітчизняних залізницях найбільшу частку складають вагони-думпкари моделі 31-638, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 1. Тому конструкційні особливості вагонів-думпкарів для експлуатації магістральними коліями пропонується розглянути саме на прикладі цієї поширеної моделі.



а)



б)

Рис. 1. Зовнішній вигляд вагона-думпкара моделі 31-638:

а – у порожньому стані; б – у завантаженому стані

Вагон-думпкар моделі 31-638 представляє собою суцільнометалеву зварну конструкцію, яка складається з наступних основних вузлів: кузова, нижньої рами, системи розвантаження, автоматичного гальма, двох двовісних візків та ударно-тягових приладів. Нижня рама призначена для сприйняття ударно-тягових зусиль та передачі навантажень від кузова на візки. Верхня рама з настилом підлоги, два відкидних поздовжніх борта та лобові стінки з внутрішньо розміщеними механізмами відкривання бортів складають кузов вагона-думпкара.

Конструкцію вагона-думпкара моделі 31-638 запропоновано розглянути на прикладі кресленника, який зображено на рис. 2.

Кузов вагона складається з верхньої рами з настилом підлоги (2), двох лобових стінок (8) та двох поздовжніх бортів (3). В лобових стінках монтуються механізми відкривання бортів (9). На нижній рамі (1) розміщуються трубопроводи та обладнання автоматичного гальма (4) та системи розвантаження (5), автозчепний пристрій (7). Нижня (1) та верхня рами з настилом підлоги (2) вагона опираються на візки (6).

Нижня рама складається з хребтової балки, двох буферних стінок, двох шворневих та чотирьох циліндрових балок з кронштейнами (рис. 2). Хребтова балка має коробчастий переріз та виконана з двох двотаврів (№ 45), перекритих зверху та знизу листами товщиною 12 мм та шириною 450мм. Шворневі кронштейни зварні складаються з вертикальних штампованих ребер товщиною 10 мм. Циліндрові кронштейни зварні коробчастого перерізу, складаються з штампованих вертикальних ребер товщиною 10 мм, перекритих зверху та знизу листами товщиною 14 мм.

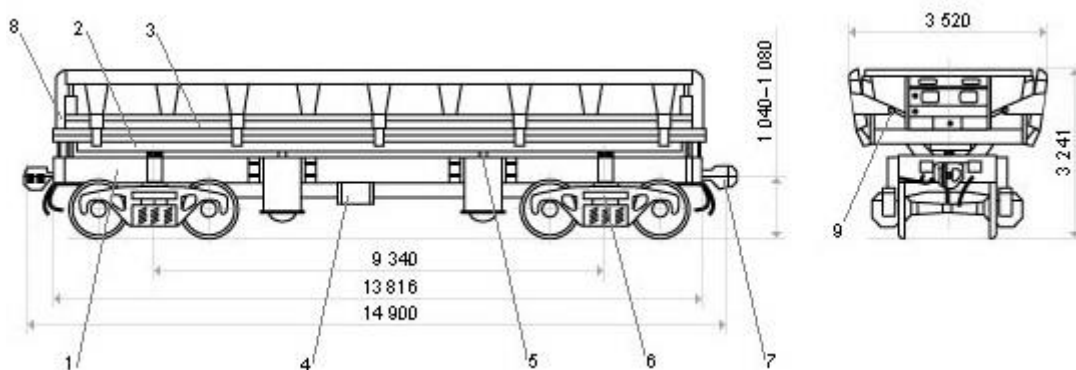


Рис. 2. Кресленник вагона-думпкара моделі 31-638

Верхня рама зварна та складається з центральних поздовжніх, бокових, шворневих, циліндрових та проміжних поперечних балок. Шворневі, циліндрові та проміжні поперечні

балки встановлені на поздовжні центральні балки, а своїми кінцями на зетоподібну полицю бокових балок.

Поздовжній борт складається з верхнього та нижнього поясів, внутрішнього листа та вертикальних зовнішніх коритоподібних штампованих листів, розміщених по всій довжині борта. Верхній пояс складається з швелера (№20) та штампованого козирка, підсиленого верхнім та внутрішнім листами. Нижній пояс являє собою швелер (№24), підсилений знизу косинками. До нижнього швелера по його контуру приварено п'ять петель з штампованого листа товщиною 22 мм.

Лобова стінка складається з внутрішнього листа товщиною 8 мм, який розміщений під нахилом до верхнього листа настилу підлоги кузова та чотирьох вертикальних стійок з внутрішнім та зовнішнім кронштейнами. Вертикальні стійки виконані з відігнутими краями, які мають виріз шириною 160 та довжиною 510 мм. Кронштейни виконані штампозварними з листа товщиною 10 мм.

Основні несучі елементи нижньої рами та кузова виготовляються з низьколегованих сталей 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 09Г2СД-12.

Вагони-думпкари моделі 31-638 обладнані двовісними візками моделі 18-100 або 18-109.

Вагон-думпкар моделі 31-638 має механізм відкривання бортів та пневматичну систему. Механізм відкривання бортів монтується усередині лобової стінки і складається з двох литих важелів, шарнірно закріплених на центральному валику, двох регулювальних тяг, з'єднуючих литі важелі та петлі бортів, двох упорних тяг, з'єднуючих литі важелі з кронштейнами на нижній рамі. За допомогою регулювальних тяг здійснюється регулювання зазору між поздовжнім бортом та лобовою стінкою. Механізм відкривання борта запроектовано з кузовом таким чином, що борт зі сторони розвантаження відкривається вниз, аз протилежної сторони залишається в закритому положенні.

Пневматична система думпкара складається з двох самостійних, незалежних одна від іншої систем: гальмівної та пневматичного розвантаження. Гальмівна система призначена для гальмування вагона-думпкара і складається з гальмівної магістралі, гальмівного циліндра, горизонтальних тяг, авторегулятора, авторежиму, горизонтальних важелів, запасного резервуара, повітродозподільника, затяжки, роз'єднувального крана, кінцевих кранів.

Система пневматичного розвантаження призначена для нахилу кузова вагона-думпкара під час розвантаження на будь-яку сторону залізничної колії та складається з живильної розвантажувальної магістралі, повітродозподільника, циліндрів нахилу кузова, кранів керування розвантаженням. Циліндри нахилу кузова забезпечують нахил кузова вагона-думпкара шляхом його повороту відносно нижньої рами на кут 45° .

Дійсно, протягом тривалого часу за конструкцією та техніко-економічними характеристиками зазначені моделі вагонів-думпкарів задовольняли потреби залізниць та промислових вітчизняних підприємств. Однак, на даний час залізниці та промислові вітчизняні підприємства потребують використання сучасних інноваційних вагонів-думпкарів удосконаленої конструкції з покращеними техніко-економічними характеристиками. До основних недоліків конструкції вищезазначених моделей вагонів-думпкарів, в тому числі вагона-думпкара моделі 31-638, слід віднести: низькі вантажопідйомність та питомий об'єм, що зумовлює високе значення коефіцієнта тари, використання в конструкції вагонів сталей минулого покоління з недостатніми фізико-хімічними (міцносними та корозієстійкими характеристиками) порівняно з сучасними марками сталей та сплавів, складна технологія виготовлення вагонів (підвищена матеріаломісткість та трудомісткість), недостатня надійність роботи механізму розвантаження у зимовий період за низьких температур навколишнього середовища та інші.

Слід зазначити, що роботи останнього періоду за цим напрямком в основному зосереджені на підвищення надійності та удосконалення конструкції існуючих моделей вагонів-думпкарів та визначення їх залишкового ресурсу [8-11]. В роботі [8] з метою удосконалення вагонів-

думпкарів запропоновано проєкт підсилення основних елементів конструкції. В дослідженнях [9, 10] запропоновано підхід з продовження терміну служби існуючих моделей вагонів-думпкарів. Дослідження, проведені в роботі [11], направлені на удосконалення верхньої рами вагона-думпкара. При цьому дослідно-конструкторських та науково-дослідних робіт, направлених на розробку нових конструкцій вагонів-думпкарів з поліпшеними показниками та дослідження їх характеристик останнім часом приділено недостатньо уваги.

Аналіз наявних літературних джерел, факт старіння парку вагонів-думпкарів магістрального призначення та необхідності його термінового оновлення, підтвердив актуальність проведення досліджень з модернізації існуючих та створення принципово нових моделей вагонів-думпкарів для експлуатації магістральними коліями. Отже, для оновлення парку рухомого складу залізниць в цілому та вантажних вагонів зокрема, необхідне створення вагонів-думпкарів нового покоління. Тому, тема даного дослідження, направлена на розгляд конструктивних особливостей і технічних характеристик сучасних вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями 1520 мм, а також шляхи та перспективи їх удосконалення з урахуванням сучасних досягнень науки і техніки, є важливою і актуальною для розвитку вітчизняного парку залізничного транспорту.

Мета – розглянути технічні характеристики сучасних вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями шириною 1520 мм; проаналізувати пошкодження елементів несучої конструкції та кузовів вагонів-думпкарів в процесі експлуатації для визначення основних шляхів та перспектив удосконалення; запропонувати технічні вимоги до вагонів-думпкарів магістрального призначення наступних поколінь.

Матеріал та результати досліджень. За результатами аналізу даних з відкритих джерел, конструкторської і технічної документації різних виробників вагонів-думпкарів встановлено, що протягом останніх років вітчизняними підприємствами поставлено на виробництво дві нові моделі вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями. Це вагон-думпкар моделі 31-4154 виробництва ПрАТ "Дніпровагонмаш" та моделі 32-8525 виробництва ТОВ ДМЗ "Карпати" (рис. 3). Технічні характеристики зазначених вагонів-думпкарів вітчизняного виробництва представлено в таблиці 2.



а)



б)

Рис. 3. Зовнішній вигляд вагонів-думпкарів для магістральних колій моделі 31-4154 (а) та моделі 32-8525 (б)

Таблиця 2. Основні технічні характеристики вагонів-думпкарів

Найменування характеристики	Модель вагона-думпкара	
	31-4154	32-8525
1	2	3
Вантажопідйомність, т	68,5	68
Об'єм кузова, м ³	38	36
Маса тари вагона, т	25,5	26,0

Закінчення таблиці 2

1	2	3
Коефіцієнт тари	0,372	0,382
Питомий об'єм, м ³ /т	0,555	0,529
Розрахункове навантаження від колісної пари на рейку, кН (тс)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)
Погонне навантаження, кН/м (тс/м)	77,0 (7,85)	54,94 (5,6)
Розрахункове ударне навантаження	2 т з висоти 2 м на підсіпку вантажу товщиною не менше 0,3 м	2 т з висоти 2 м на підсіпку вантажу товщиною не менше 0,3 м
Ширина колії, мм	1520	1520
Конструкційна швидкість, км/год	120	120
База вагона, мм	7750±5	7800±5
Довжина по осях зчеплення, мм	11970±20	12020±20
Модель візка	18-100, 18-1750, 18-7055	18-1750, 18-7055
Габарит по ГОСТ 9238	1-Т	1-Т
Мінімальний радіус вписування в криву, м	80	80
Нормативний строк служби, років	22	22
Рік постановки на серійне виробництво	2015	2020
Підприємство-виробник	ПрАТ «Дніпровагонмаш»	ТОВ ДМЗ «Карпати»

В країнах Митного Союзу протягом останнього періоду поставлено на серійне виробництво вагони-думпкери моделей 32-9792 (ВАТ «Русхіммаш», Російська Федерація, м. Саранськ, 2014 р.), 32-5188 (АТ «НВК «Уралвагонзавод», Російська Федерація, м. Нижній Тагіл, 2018 р.), 32-626, 32-626-01 (ВАТ «Завод металокопункцій», Російська Федерація, м. Енгельс, 2019 р.), 32-6982, 32-6982-01 (ЗАТ «ТихвінСпецМаш», Російська Федерація, м. Тихвін, 2019 р.), що призначені для експлуатації магістральними коліями 1520 мм.

Порівняльний аналіз технічної документації на вагони-думпкери минулого покоління та сучасних моделей вітчизняного і іноземного виробництва, призначених для експлуатації магістральними коліями, дозволив встановити, що останні мають переваги завдяки: зниженню маси тари; підвищенню вантажопідйомності та об'єму кузова; покращенню показників міцності та надійності окремих вузлів; покращенню ходових динамічних, гальмівних та інших експлуатаційних характеристик; зниження матеріалоемності і трудомісткості виготовлення вагонів; застосування сучасних технологій зварювання; скорочення експлуатаційних витрат на ремонт та технічне обслуговування.

На даний час основними документами, які встановлюють вимоги до проектування та виготовлення сучасних вагонів-думпкарів для їх експлуатації на території України, є ДСТУ 7598 [12], ДСТУ 7776 [13], ДСТУ ГОСТ 33211 [14], ЦШ-0001 [15], ЦВ-ЦЛ-0013 [16], Норми-83 [17], Норми-86 [18], Норми-96 [19], РД 24.050.37 [20].

Для подальшої модернізації існуючих моделей та розроблення принципово нових моделей вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями 1520 мм,

проаналізовано пошкодження елементів несучої конструкції та кузовів цих типів вантажних вагонів в експлуатації. Основною метою такою аналізу є виявлення малонадійних елементів несучої конструкції існуючих моделей вагонів-думпкарів, які потребують першочергового удосконалення, та розроблення вимог до технічних характеристик цих типів вантажних вагонів.

Тому, спеціалісти ДП «УкрНДІВ», а саме науково-дослідної лабораторії вантажного та спеціального рухомого складу, провели технічні обстеження та сформувавши основні види пошкоджень елементів несучої конструкції та кузовів, які мають бути усунені під час виконання назначених видів ремонту. Також додатково проаналізовано причини позапланових видів ремонту вагонів-думпкарів з використанням бази даних ГІОЦ АТ "Укрзалізниця". Під час проведення досліджень аналізуванню та технічному обстеженню піддавались вагони-думпкари моделей та їх модифікацій, які наведено в табл. 1, так як ці моделі є найбільш поширеними і складають основу парку вагонів-думпкарів в країні.

Всього технічне обстеження проведено 155 вагонам-думпкарим різних моделей. Деякі з виявлених пошкоджень і дефектів під час виконання технічних обстежень зазначених моделей чотиривісних вагонів-думпкарів наведено на рис. 4.

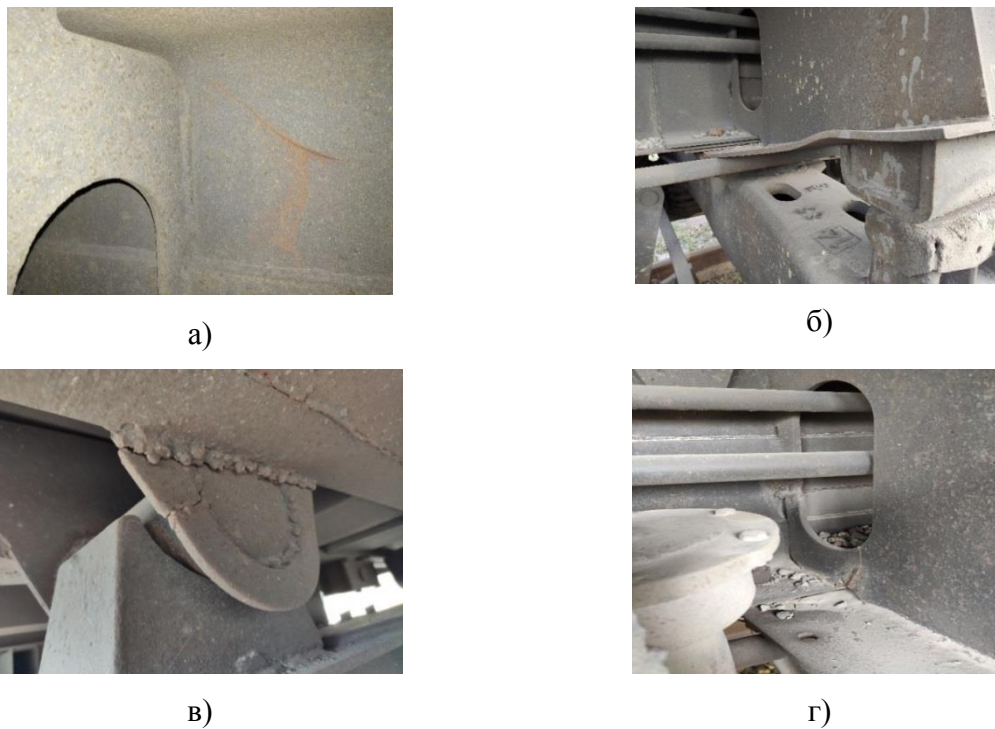


Рис. 4. Зовнішній вигляд пошкоджень елементів несучих конструкцій та кузовів вагонів-думпкарів:

а – тріщина вертикального листа хребтової балки в місці з'єднання з шворневою; б – дефект нижнього листа шворневої балки; в – відрив та тріщина упора кронштейна від нижнього поясу поздовжнього борта; г – тріщина вертикального листа шворневого кронштейна

За результатами аналізування даних виявлених пошкоджень в процесі експлуатації та технічного обстеження чотиривісних вагонів-думпкарів встановлено таке:

малонадійними елементами несучої конструкції та кузова, які найчастіше пошкоджуються та виходять з ладу, є елементи борта поздовжнього, циліндрові та шворневі кронштейни, циліндри розвантаження, лобова балка рами, упори кузова;

характерними пошкодженнями борта поздовжнього є вм'ятини на внутрішній та зовнішній сторонах, деформація стійок, тріщини в деталях та зварних швах, прогини елементів борта; циліндрових та шворневих кронштейнів – тріщини в корпусі та відриви в місцях їх кріплення до рами кузова; циліндрів розвантаження – корозія, механічні пошкодження, знос та обрив кріплень; лобова балка рами – вм'ятини, тріщини, прогини; упори – знос та обрив; елементи несучих конструкцій – тріщини в місцях з'єднання хребтової та шворневої балок;

основними причинами виникнення пошкоджень в елементах борта кузова – ударні навантаження під час завантаження вантажу; в кронштейнах та циліндрах – навантаження під час розвантаження вагонів; в лобовій балці, упорах, місцях з'єднання хребтової та шворневої балок – поздовжні навантаження під час співударянь вагонів та сумісна дія вертикальних і поздовжніх навантажень в експлуатації.

Аналіз проблемних вузлів та систем існуючих моделей вагонів-думпкарів магістрального призначення в процесі експлуатації, сучасних тенденцій розвитку, результатів досліджень сучасних моделей, вимог замовників, а також огляд літературних джерел, конструкторської та технічної документації, дозволив визначити наступні перспективні шляхи розвитку конструкцій цих вагонів:

створення вагонів-думпкарів в габариті Тпр з осьовим навантаженням 23,5 тс, що дозволить зменшити масу тари, підвищити вантажопідйомність, що в цілому дозволить перевозити більшу кількість вантажу;

збільшення вантажопідйомності вагона за рахунок максимально ефективного використання габариту 1-Т, в тому числі підвагонного простору, що дозволить збільшити вантажопідйомність вагона;

збільшення вантажопідйомності вагона шляхом розроблення широкої номенклатури вагонів-думпкарів з осьовим навантаженням 25 тс;

розширення номенклатури вагонів-думпкарів залежно від характеру вантажу, що перевозиться (скальні породи, будівельні матеріали тощо);

підвищення вантажопідйомності та об'єму кузова шляхом створення шестиосного вагона-думпкара зчленованого типу з осьовим навантаженням 25 тс;

розроблення вагонів з використанням інноваційних візків та комплектуючих деталей до них нового покоління, а також інших знімних вузлів та систем покращеної конструкції, що дозволить покращити динаміку і плавність руху вагона, збільшити строки міжремонтних пробігів. В цілому використання таких вагонів дозволить підвищити безпеку на залізничному транспорті та знизити вартість життєвого циклу вагона;

удосконалення існуючих та створення принципово нових типів несучих конструкцій вагонів-думпкарів, в побудові яких застосовуються інноваційні технічні рішення та матеріали підвищеної міцності, що сприятиме підвищенню міцності та надійності, збільшенню строків між проведенням капітальних ремонтів та строку служби вагона;

зміцнення та удосконалення несучих конструкцій вагонів-думпкарів та їх окремих комплектуючих частин з метою підвищення надійності, досягнення рівномірного навантаження елементів несучої конструкції та збільшення терміну служби за рахунок зменшення впливу і пошкоджень від ударного навантаження під час завантаження, розвантаження та сумісної дії вертикальних і поздовжніх навантажень в експлуатації;

застосування новітніх технологій збірки та зварювання, що дозволить зменшити вплив на навколишнє середовище, трудомісткість та вартість виготовлення вагонів.

Враховуючи, результати теоретичних та експериментальних досліджень під час постановки на виробництво сучасних вагонів-думпкарів магістрального призначення та сформульовані основні шляхи та перспективи їх удосконалення, запропоновано встановити такі вимоги до проектування вагонів цього типу наступних поколінь (табл. 3).

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Таблиця 3. Основні вимоги до технічних характеристик вагонів-думпкарів магістрального призначення наступних поколінь та комплектуючих до них

№ п/п	Найменування параметру (характеристики)	Вимоги до показника (характеристики)
Загальні вимоги		
1	Навантаження на вісь, тс	23,5 (25,0)
2	Конструкційна швидкість руху вагона, км/год - на магістральних коліях; - на промислових коліях	120 70
3	Питома матеріалоемність	≤ 0,38
4	Питомий об'єм, м ³ /т	≥ 0,53
Вимоги до показників безпеки та впливу на навколишнє середовище		
5	Коефіцієнт запасу стійкості колеса від сходу з рейок	≥ 1,4
6	Коефіцієнт запасу поперечної стійкості колеса від перекидання на зовнішню сторону кривої	≥ 2,0
7	Коефіцієнт запасу поперечної стійкості колеса від перекидання на внутрішню сторону кривої	≥ 2,1
8	Рівень зовнішнього шуму під час руху зі швидкістю 80 км/год на відстані 25 м від осі колії, дБа	≤ 85
Вимоги до показників динаміки та плавності руху вагона		
9	Коефіцієнт вертикальної динаміки кузова	≤ 0,5
10	Коефіцієнт вертикальної динаміки необресореної рами візка	≤ 0,6
11	Коефіцієнт горизонтальної динаміки - в порожньому стані - в завантаженому стані	≤ 0,3 ≤ 0,25
12	Прискорення кузова вертикальні у частках g - в порожньому стані - в завантаженому стані	≤ 0,4 ≤ 0,25
13	Прискорення кузова горизонтальні у частках g - в порожньому стані - в завантаженому стані	≤ 0,4 ≤ 0,2
Вимоги до показників впливу вагона на верхню будову залізничної колії		
14	Динамічні напруження розтягнення в кромках підшви рейки в прямих і кривих ділянках залізничної колії, МПа	≤ 240
15	Бічні сили, які передаються від колеса на рейку, за умови міцності рейкових скріплень, кН	≤ 100
16	Динамічне вертикальне навантаження від колеса на рейку, кН	≤ 210
17	Динамічне погонне навантаження на залізничну колію від візка, кН/м	≤ 168
18	Напруження на основній площадці земляного полотна, МПа	≤ 0,08
Вимоги до міжремонтних інтервалів, строків служби вагона та його комплектуючих		
19	Міжремонтний пробіг до першого деповського ремонту після побудови, тис. км (років)	≥ 500 (5)
20	Міжремонтний пробіг між наступними ДР, тис. км (років)	≥ 360 (4)
21	Мінімальний пробіг між технічним обслуговуванням, км	1500
22	Призначений (нормативний) термін служби (експлуатації), років: - всього - до першого капітального ремонту	≥ 32 ≥ 16
23	Підшипники касетного типу для буксових вузлів з адаптером, що забезпечують безремонтний пробіг, млн. км (років)	≥ 1,0 (16)
24	Пробіг буксових вузлів, що забезпечують безремонтний пробіг колісних пар, млн. км (років)	≥ 0,8 (8)

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Продовження таблиці 3

25	Пробіг по зносу металевих частин пружних ковзунів, фрикційних планок та клинів, млн. км	$\geq 1,0$
26	Пробіг по зносу вузла п'ятник-підп'ятник, млн. км	$\geq 0,5$
27	Пробіг до заміни втулки, млн. км - гальмівної важільної передачі - підвішування гальмівного башмака	$\geq 1,0$ $\geq 0,36$
Вимоги до ресурсу, надійності, міцності вагона та його комплектуючих		
28	Коефіцієнт запасу опору втомі елементів конструкції вагона	$\geq 2,0$
29	Коефіцієнт запасу втомної міцності бокової рами та балки надресорної	$\geq 2,0$
30	Інтенсивність зносу колеса (застосування коліс з економічно-вигідним профілем), мм/10 ⁴ км	$\geq 0,2$
31	Застосування центрального підвішування з нелінійною характеристикою, в якому ресурс витих пружин без зламів, циклів	$6 \cdot 10^6$
32	Міцність сталі, з якої повинні виготовлятися основні несучі елементи кузова вагона, МПа - зет, двотавр хребтової балки - шворневі, проміжні циліндрові з кронштейнами, центральна, торцеві балки - елементи поздовжніх бортів, лобової стінки, нижня обв'язка та інших елементів	≥ 375 ≥ 375 ≥ 345
Вимоги до гальмівної системи		
33	Роздільна система зі стандартним комплектом гальмівного обладнання*)	Наявна та в роботоздатному стані
34	Гальмівний коефіцієнт а) композиційні колодки - порожній стан; - завантажений стан; б) чавунні колодки - порожній стан; - завантажений стан	$\geq 0,22$ $\geq 0,14$ $\geq 3,5$ $\geq 6,5$
35	Вихід штока гальмівного циліндра, мм - композиційні колодки; - чавунні колодки	50–100 75–125
36	Тиск повітря у гальмівному циліндрі, кгс/см ² а) композиційні колодки - порожній стан; - завантажений стан; б) чавунні колодки - порожній стан; - завантажений стан	1,2–1,6 3,0–3,4 1,4–2,0 4,0–4,5
37	Застосування колесозберігаючих композиційних колодок з чавунними вставками з пробігом, млн. км	$\geq 0,36$
38	Можливість утримання вагона в завантаженому стані стоянковим гальмом на ухилі, ‰	≥ 30
39	Гальмівний шлях поїзда на ухилі 6 ‰ зі швидкостей 80; 90; 100 км/год відповідно, м	≤ 1000 ; ≤ 1300 ; ≤ 1600
40	Гальмівний шлях поїзда на ухилі 10 ‰ зі швидкостей 80; 90 км/год відповідно, м	≤ 1200 ; ≤ 1500
41	Гальмівний шлях поїзда на площадці зі швидкості 120 км/год, м	≤ 1700
Вимоги до конструкції вагона-думпкара та його систем		
42	Ширина колії, мм	1520
43	Габарит	1-Т або Тпр
44	Мінімальний радіус вписування в криву, м	80
45	Кут нахилу кузова під час розвантаження, °	≥ 45
46	Вид розвантаження	Двостороннє

Закінчення табл. 3

47	Система розвантаження	Пневматична з можливістю дистанційного розвантаження
48	Розрахункове ударне навантаження	2 т з висоти 2 м на підсіпку вантажу товщиною не менше 0,3 м
<p><i>*) Примітка.</i> Під стандартним комплектом гальмівного обладнання мається на увазі повітроділильник, гальмівний циліндр, важільна передача з авторегулятором, авторежим, повітропровід, запасний резервуар, кінцеві та роз'єднувальні крани, з'єднувальні рукава, з'єднання.</p>		

Таким чином, запропоновано технічні вимоги для вагонів-думпкарів наступного покоління, що призначені для експлуатації магістральними коліями 1520 мм, які можуть стати базовими під час створення нових та глибокій модернізації існуючих моделей цих типів вагонів.

Висновки

1. Порівняльний аналіз технічної документації на вагони-думпкари минулого покоління та сучасних моделей вітчизняного виробництва, призначених для експлуатації магістральними коліями, дозволив встановити, що останні мають переваги завдяки зниженню маси тари, підвищенню вантажопідйомності та об'єму кузова, застосуванню міцних та корозієстійких сталей, скорочення експлуатаційних витрат на ремонт та технічне обслуговування.

2. Результати технічного обстеження та аналізування даних позапланових ремонтів дозволили визначити елементи несучих конструкцій та кузовів, які найчастіше пошкоджуються в процесі експлуатації та які необхідно вдосконалити та зміцнити під час розроблення і постановки на виробництво нових моделей чотиривісних вагонів-думпкарів або модифікації існуючих. Встановлено основні причини виникнення пошкоджень та дефектів елементів несучих конструкцій та кузовів вагонів-думпкарів.

3. Основними перспективними шляхами подальшого розвитку вагонів-думпкарів магістрального призначення мають стати: зниження маси тари за рахунок застосування нових композиційних матеріалів та алюмінієвих сплавів; підвищення вантажопідйомності за рахунок використання габариту $T_{пр}$, збільшення осьового навантаження 25 тс, створення шестиосного вагона зчленованого типу; розширення номенклатури вагонів-думпкарів залежно від характеру вантажу, що перевозиться; оптимізація використання габариту; застосування принципово нових технічних рішень та марок сталей підвищеної міцності; зниження вартості життєвого циклу за рахунок збільшення міжремонтних нормативів та строку служби вагона, запровадження новітніх технологій збірки та зварювання.

4. Запропоновано технічні вимоги до вагонів-думпкарів магістрального призначення нового покоління, які можуть доповнити існуючі нормативні документи в частині загальних вимог до розрахунків та проектування нових і модернізованих типів вантажних спеціалізованих вагонів.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на виконання відповідних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт щодо створення принципово нових та глибокій модернізації існуючих моделей вагонів-думпкарів магістрального призначення з покращеними техніко-економічними характеристиками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сулим А.О., Сафронов О.М., Федосов-Ніконов Д.В., Стринжа А.М. Сучасний стан та перспективи розвитку парку вантажних вагонів в Україні: оновлення або продовження призначеного строку служби? Залізничний транспорт України. 2021. № 4, с. 4–20. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2021-141-4-04-20>
2. Найбільш зношені вагони в Україні: рефрижератори, хопер-дозатори та думпкари. URL: <https://www.railinsider.com.ua/najbilsh-znosheni-vagony-v-ukrayini-refryzheratory-hoper-dozatory-ta-dumpkary/> (Дата звернення: 04.01.2022)
3. Альбом-справочник «Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм». 002И-2010 ПКБ ЦВ. 742 с.
4. Логинов А.И., Афанаскин Н.Е. Вагоны-самосвалы. М.: Транспорт, 1975. 192 с.
5. Каблуков В.А., Савчук О.М. Подвижной состав промышленного железнодорожного транспорта : Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Вища школа, 1990. 295 с.
6. Калмыков В.Г., Кузнецов А.Г. Вагоны промышленного транспорта. М.: Транспорт, 1978. 336 с.
7. Шадур Л.А. Развитие отечественного вагонного парка. М.: Транспорт, 1988. 279 с.
8. Жарова Е.А., Мойкин Д.А., Белгородцев В.А. Совершенствование вагонов-думпкаров для повышения их надежности в процессе эксплуатации. Транспорт Российской Федерации. 2014. № 3 (52). с. 51–54.
9. Сапронова С.Ю., Кошель О.О., Ткаченко В.П., Буліч Д.І., Радкевич М.М. Аналіз методів продовження терміну служби вантажних вагонів. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2019. Вип. 33, т. 1. С. 118–129. <https://doi.org/10.32703/2617-9040/2019-33-1-11>.
10. Кошель О.О., Сапронова С.Ю., Буліч Д.І., Ткаченко В.П. Визначення залишкового ресурсу несучих металевих конструкцій вагонів хопер-дозаторів та думпкарів (самоскидів) на основі результатів технічного діагностування та типових випробувань. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 35. С. 14–23. <https://doi.org/10.32703/2617-9040/2020-35-2>.
11. Мотянко Т.А., Актипин Д.Я., Мануева М.В. Исследование динамической нагруженности верхней рамы кузова вагона-самосвала (думпкара). Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 4 (44). С. 20–23.
12. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 01-07-2015]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 162 с. (Нац. Стандарт України).
13. ДСТУ 7776:2014. Вагони самоскиди (думпкари). Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих думпкарів залізниць колії 1520 мм. [Чинний від 01-06-2016]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 108 с. (Нац. Стандарт України).
14. ДСТУ ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (ГОСТ 33211-2014, ИДТ). [Чинний від 22-12-2014]. – Москва: Стандартінформ, 2014. 54 с. (Міждержавний стандарт).
15. ЦШ-001 Інструкція з сигналізації на залізницях України. Київ: 2008. 132 с.
16. ЦВ-ЦІ-0013 Інструкція з ремонту гальмівного обладнання вагонів. Київ: 2005. 160 с.
17. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных). М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. 260 с.
18. Нормы для расчета и проектирования новых вагонов-самосвалов (думпкаров) колеи 1520 мм. ВНИИВ, 1986, 154 с.
19. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
20. РД 24.050.37-90 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытания на прочность и ходовые качества, утвержденные указанием Министерством тяжелого и транспортного машиностроения. 49 с.

REFERENCES

1. Sulym A.O., Safronov O.M., Fedosov-Nikonov D.V., Strynzh A.M (2021). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku vantazhnykh vahoniv v Ukraini: onovlennia abo prodovzhennia pryznachenoho stroku sluzhby? [Current state and prospects of freight car fleet development in Ukraine: renewal or extension of the assigned service life?]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 4, 4–20 <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2021-141-4-04-20> [in Ukrainian]
2. Naibilsh znosheni vahony v Ukraini: refryzheratory, khoper-dozatory ta dumpkary. [The most worn cars in Ukraine: refrigerators, hoppers and dump cars]. URL: <https://www.railinsider.com.ua/najbilsh-znosheni-vagony-v-ukrayini-refryzheratory-hoper-dozatory-ta-dumpkary/> (Accessed: January 4, 2022) [in Ukrainian].
3. Lohinov A.Y., & Afanaskin N.E. (1975). *Vahony-samosvaly [Dump cars]*. Moscow: Transport, 192 p., [in Russian]
- 4 *Albom-spravochnik «Hruzovyye vahony zhielieznykh doroh kolei 1520 mm» [Album reference book "Freight cars of 1520 mm gauge railways"]*. 002I-2010 PKB TsV. [in Russian]

5. Kablukov V.A., & Savchuk O.M. (1990). *Podvizhnoi sostav promyshliennogo zhielieznodorozhnogo transporta [Rolling stock of industrial railway transport]*. Textbook. 2nd ed., Reworked. and ext. K.: Vyscha shkola, 295 p., [in Russian]
6. Kalmykov V.G., & Kuznetsov A.G., (1978). *Vahony promyshliennogo transporta [Industrial transport cars]*. Moscow: Transport, 336 p. [in Russian]
7. Shadur L.A. (1988). *Razvitiie otechestvennogo vahonnoho parka [Development of the domestic car fleet]*. M.: Transport, 279 p.
8. Zharova E.A., Moikin D.A., & Belgorodtsev V.A. (2014). Soviershienstvovaniie vahonov-dumpkarov dlia povysheniia ikh nadiezhnosti v protsessie ekspluatatsii [Improving dump cars to increase their reliability during operation]. *Transport Rossiiskoi Federatsii –Transport of the Russian Federation*, 3 (52), 51–54 [in Russian]
9. Sapronova S.Y., Koshel O.O., Tkachenko V.P., Bulich D.I., Radkevych M.M. (2019). Analiz metodiv prodovzhenia terminu sluzhby vantazhnykh vahoniv. [Analysis of methods for extending the service life of freight cars]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of DUIT. Transport Systems and Technologies Series*, 33. (Vols. 1), (pp. 118–129). <https://doi.org/10.32703/2617-9040/2019-33-1-11> [in Ukrainian].
10. Koshel O.O., Sapronova S.Y., Bulich D.I., Tkachenko V.P. (2020). Vyznachennia zalyshkovoho resursu nesuchykh metalevykh konstruksii vahoniv khoper-dozatoriv ta dumpkariv (samoskydiv) na osnovi rezultativ tekhnichnoho diahnostuvannia ta typovykh vyprovuban. [Determination of the residual life of load-bearing metal structures of hopper dispensers and dump cars (dump trucks) based on the results of technical diagnostics and standard tests. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriiia «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of DUIT. Transport Systems and Technologies Series*, 35, pp. 14–23. <https://doi.org/10.32703/2617-9040/2020-35-2> [in Ukrainian].
11. Motianko T.A., Actipin D.Ya., Manuieva M.V. (2014). Issliedovaniie dinamicheskoi nahruzhiennosti vierkhnei ramy kuzova vahona-samosvala (dumpkara). [Investigation of the dynamic load of the upper frame of the body of a dump car]. *Viestnik Brianskoho hosudarstvennogo tiekhnicheskoho univiersiteta - Bulletin of Briansk State Technical University*, 4 (44), 20–23.
12. Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizova-nykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh). [Freight cars. General requirements for calculations and design of new and modernized cars of 1520 mm track (non-self-propelled)]. (2015). *DSTU 7598: 2014 from the 1-st of 2015*. Kyiv: SE "UkrNDNC", 162 p. [in Ukrainian]
13. Vahony samoskydy (dumpkary). Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh dumpkariv zaliznyts kolii 1520 mm. [Dump cars. General requirements for calculations and design of new and modernized dump trucks of 1520 mm gauge railways]. (2014). *DSTU 7776:2014 from the 1-st of June 2016*. Kyiv: SE «UkrNDNC» [in Ukrainian]
14. Vahony hruzovyye. Tribovaniia k prochnosti i dinamichieskim kachiestvam [Freight cars. Requirements to structural strength and dynamic qualities]. (2014). *DSTU HOST 33211-2014 from the 22-nd of December 2014*. Moskva: Standartinform [in Russian]
15. *Instruktsiia z syhnalizatsii na zaliznytsiakh Ukrainy TSh-001 [Instruction on signaling on the railways of Ukraine]*. (2008). Kyiv [in Ukrainian]
16. *Instruktsiia z remontu halmivnogo obladnannia vahoniv TsV-TsL-0013 [Instruction on repair of brake equipment of cars]*. (2005). Kyiv [in Ukrainian]
17. *Normy dlia rascheta i proektirovaniia novykh i moderniziruiemykh vahonov zhielieznykh doroh MPS kolei 1520 (niesamokhodnykh) TsSh-001 [Standards for calculation and design of new and modernized railway cars of the Ministry of Railways of track 1520 (non-self-propelled)]*. (1983). Moscow: VNIIV-VNIIZHT [in Russian]
18. *Normy dlia rascheta i proektirovaniia novykh vahonov-samosvalov (dumpkarov) koliei 1520 mm [Norms of calculation and design of new dump cars of 1520 mm gauge]*. (1986). VNIIV [in Russian]
19. *Normy dlia rascheta i proektirovaniia vahonov zhielieznykh doroh MPS koliei 1520 (nesamokhodnykh) [Norms of calculation and design of railway cars of the Ministry of Railways of track 1520 (non-self-propelled)]*. (1996). Moscow: HosNIIV-VNIIZhT [in Russian]
20. *Vahony hruzovyye i passazhirskiie. Metody ispytaniia na prochnost i khodovyye kachestva, utvierzhdienyye ukazaniem Mynysterstva tiazhieloho i transportnogo mashinostroieniia. RD 24.050.37-90 [Freight and passenger cars. Test methods for strength and running quality, approved by the Ministry of Heavy and Transport Engineering. RD 24.050.37-90]* [in Russian].

Andrii Sulym^{1*}, Pavlo Khozia², Andrii Strynzha³, Vladyslav Rechkalov⁴, Volodymyr Fedorov⁵

¹ Deputy director for research, State Enterprise "Research Railway Car Building Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

² Head of research laboratory, Research laboratory of experimental research of railway engineering, State Enterprise "Research Railway Car Building Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

³ Head of research laboratory, Research laboratory of freight and special rolling stock, State Enterprise "Research Railway Car Building Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

⁴ Senior researcher, Research laboratory of experimental research of railway engineering, State Enterprise "Research Railway Car Building Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

⁵ Researcher, Research laboratory of freight and special rolling stock, State Enterprise "Research Railway Car Building Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

APPROACHES AND PROSPECTS OF IMPROVEMENT OF DUMP CARS FOR OPERATION ON 1520-mm MAINLINE RAILWAYS

The article deals with the models of dump cars, which form the major part of the mainline railway car fleet of 1520 mm. The technical characteristics of the most common mainline dump cars models are given. The design features of the dump car model 31-638, designed for transportation and mechanized unloading of bulk and lump cargo, are presented. Modern models of dump cars of domestic and foreign production for the main railway transport of 1520 mm track, which were constricted and put into serial production in recent years, are presented. The results of comparative analysis of technical characteristics of dump cars of the last generation to modern models of dump cars showed that one of the main advantages of the latter is reduction of container weight, increase of load capacity and body volume, improving of strength and reliability of separate units and systems. The problem units and systems of the existing models of main-line dump cars are determined based on the results of their operation, which need further strengthening. The focus areas of improving the design of modern models of dump cars for the 1520 mm main railway vehicles are defined.

The technical requirements for the next generation dump cars, which are planned to be constructed and put into serial production in the coming years for operation on the mainline railway tracks, are proposed. The technical requirements are formed taking into account the research results of modern mainline dump cars design, review of technical and design documentation for these railway vehicles, as well as analysis of requirements and wishes of customers. The necessity of carrying out relevant research and engineering works on the development of new generation dump cars for the main railway transport is substantiated. The content of the article will contribute to the construction of new models of dump cars for the main railway transport and significant upgrading of existing models, as well as increase the efficiency of their operation.

Keywords: *dump car, design, main railway transport, strength, lifetime, technical characteristics.*

Dmytro Orynyk¹

¹ Postgraduate, Department of Wagons and Wagon Economy, Dnipro National University of Railway Transport Named After Academician V. Lazaryan (DNURT), 2 Lazaryan St., Room 1, Dnipro, 49000, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9834-9256>

*Corresponding author: dimaorinik@gmail.com

REPAIR OF CEMENT, GRAIN, MINERAL WAGONS AND GONDOLA CARS IN A SINGLE FLEXIBLE ASYNCHRONOUS FLOW

The publication updates the issue of wagon repair in modern conditions and highlights the main problems associated with the method of organization of work. Low productivity is due to outdated equipment and worn-out rolling stock, poor training of staff involved. The article contains the main provisions of changing the method of repair, calculating the possibility of loading production positions, calculating the program of repairing wagons, determining the number of ways of their routes, analyzing the shortcomings of flexible asynchronous flow, developing solutions for testing flexible flow in computer simulations. Summarizing this material provides an opportunity to consider and develop a project based on the Stryi Wagon Repair Plant for flexible flow or its modification to increase repair capacity. The article calculates the time of repair of wagons by the flow method and using a flexible asynchronous multichannel method of repair, the graphs show the difference in downtime between the same types of wagons and the type of repair, provided that they are taken in the same condition before repair work. From these calculations, it can be concluded that the streamlined method of repair has exhausted all its resource potential, and will continue to incur the cost of paying employees, maintenance of equipment and other costs associated with production.

Keywords: Flexible asynchronous flow, overhaul, depot repair, wagon repair method.

Introduction. Repair base in modern conditions depends on the location of hub stations and the traffic congestion that run within 200 km.

In Soviet times, all repair companies were divided into certain classes of repair depending on the area of repair positions, the flow method of work organization was often used, the weight of cars was less, their number compared to the current number of wagons is 60%. Since now the weight of an empty wagon is 25 tons one needs to take into consideration the cranes, transport carts, transborders, tilters, the weight and size of the wagon. To make it easier to calculate, the weight of gondola car and the size of the grain wagon are considered [1].

One of the options to improve the repair of wagons is to use a new method of organization (flexible flow) [2], as the best option for the use of time, repair capacity, materials and repair area. This method was developed in the late twentieth century. Since then, the requirements for repairs have changed as well as technologies and instructions; existing wagon models have been modernized, and new models have been developed that are more suitable for transporting various goods (fastenings have been unified).

Analysis of recent research and problem statement. Currently, there are many articles on the organization of repair of wagons by the stationary method and flow, but these methods were proposed in the 50's of last century, when there was a relatively small flow of goods and a small transport network. Now the world is globalizing which encourages people to transport more goods for various

purposes. The number of repair units is growing every day, and repair capacity can not abruptly move from one method of repair to another. One more problem is that capacity of repairs were developed not only for certain types of repairs but also for certain types of wagons, most of which are grain, mineral wagons, gondola cars, cement wagons and platforms. Whilst there are not many problems with the platforms except for running deficiencies, the situation with all other types of wagons is much more complicated [3]. There are big problems with the construction of the upper and lower strapping, as well as with the intermediate beams and end walls that can not withstand the load when sorting wagons on the slopes.

The purpose and objectives of the research. Over time, the repair base of Ukraine and the CIS countries has not been reconstructed or modernized, exhausted its repair stock and stock for repair capacity, so the equipment that was put into production was not replaced, reached their limits of safety and maintainability, so the failure rate increases in a geometric progression with each start of the equipment, which has theoretically been proved with the help of a new mathematical model, taking into account the random nature of the arrival for repair of different types of wagons, their models, and different types of scheduled repairs (depot repair (DR), depot repair with extension (DRE), overhaul).

This scheme of wagon repair can be used at existing enterprises with low costs for reconstruction, modernization, reconstruction.

The shops provided for repairs according to the flow method scheme can be converted into the one for repairs according to the flexible flow scheme [5] with the help of small adjustments and costs for modernization. It will allow to increase the production of repaired wagons by 20-30% due to the fact that that already repaired and handed over to the receiver wagons are removed from the module (shop) and transported to the station for further operation.

Most depots built in the 70-80's of the twentieth century were divided into classes by species. In this way companies could repair only one type of wagons. There is now a need to focus on the main bulk of wagons transporting cement, mineral, grain, as well as gondola cars.

We developed a project for the reconstruction of the wagon repair shop on the basis of SWRP located in the Lviv region [6]. The wagon downtime was calculated without reducing the quality of the work provided by the technological process. According to the results, 36 modules 5 meters in width can be placed taking into account the size of separate wagon in width. In turn, 36 modules can be divided into 6 repair items. Each module is to be staffed with personnel [7] and equipment that provides a technological process for scheduled repairs (DR, DRE, overhaul) for cement, mineral, grain wagons as well as gondola cars.

These types of wagons are of the largest percentage:

- gondola cars – 45%;
- grain wagons – 20%;
- cement wagons – 15%;
- mineral wagons – 10%;
- other wagons – 20%.

The above mentioned distribution is due to the types of goods in transit through or produced in Ukraine, it is mainly raw materials. Cargoes follow the route (“Silk Road”) and it allows to repair and service the rented transit wagons.

One of the key factors in modernization, reconstruction of already existing repair facilities in western Ukraine is the border with the European Union (its members). This makes it possible to repair European wagons in the territory of Ukraine according to European standards (European wagons are smaller in size than the ones from the CIS countries) [8].

In today's world, businesses seek to reduce the cost of repairing equipment, increase capacity and promote their products. The management of Ukrzaliznytsia is no exception, and wishes to increase the share of repaired cars for transfer to leasing companies, private individuals and to carry out transportation [10]. Against the background of the global crisis, all capacities were then partially, if not completely, suspended. Due to recent events and the background of the gradual launch of capacity

and getting the economies over recession, it is possible to increase production, transportation and repair. So we proposed to calculate the possibility of repairing gondola cars, grain, mineral and cement wagons, which make up the bulk of the wagons of the entire Ukrzaliznytsia park. These types of wagons undergo various types of repairs during their operation: DR, DRE and overhaul. The technological processes used to repair such wagons are very different for these types of repairs. So, if, say, shop receives 12 different wagons arrive the types of repair vary depending on the types of wagons. The only common thing is their disability to operate.

Thus, in the late 50's, a flow method was proposed which provided for the sequential placing of wagons. This method allowed to move from object to object [9]. However, taking a closer look at the detail of this repair procedure, one can see that wagons that go in a chain one after another with different amounts of repair cause delays and in some positions they linger longer than others, people and equipment are idle, and work cannot be performed because some positions are occupied by other wagons [12]. It was then proposed to use preparatory areas and leveling positions. This allowed to summon the wagons to one volume of repairs. But this did not bring the desired result. In the late 70's it was proposed to use the division of wagons according to the volume of repairs. Therefore, they were divided into light wagons (small amount of work needed), medium and heavy (with overtime repairs) in combination with preparatory positions and equalizing positions. However, it did not bring much benefit to the repair [11]. At first, reserves were created that allowed to smooth out the beat and rhythm of the release of wagons. Over time, backlogs have decreased, but repair problems have begun. It was impossible to control the quality of repairs; non-compliance with the technological process led to an increase in the percentage of failures during the running of freight wagon. Constant disruptions of monthly (annual) repair plans took place.

Already at the end of 2008 during the global crisis it was clear that all repair methods of the organization had exhausted all resources and new methods of organization were needed. The use of flexible asynchronous multi-channel multiphase flow was proposed in Dnipro National University by Prof. Vladyslav Myamlin. That allowed to repair the wagon regardless of its type and type of repair following a strict structure of the technological process that would be based on its technological condition.

There are two solutions for the transportation of wagons to enterprises. The first is the laying of a track with a width of 1425 mm; the second is the laying of the 3rd rail. In this way, it is possible to unload the border checkpoints and transfer the responsibility for lifting wagons to already existing enterprises.

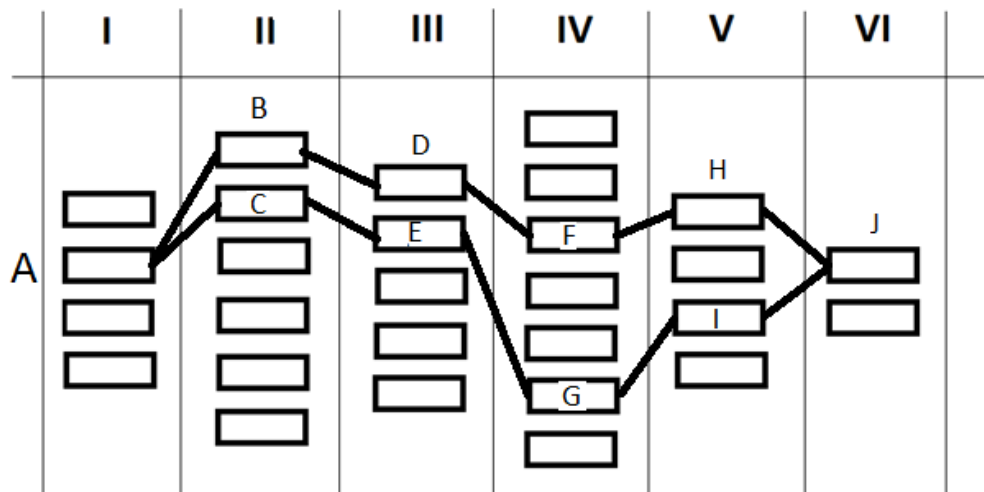


Figure 1. Organization of a flexible method of wagon repairs

According to this form of organization and placing of wagons it is possible to organize 125 ways of following the wagon on a separate unique way at the expense of free modules on positions. Due to this, the wagons pass without delay those positions that are not provided by the technological process or are not needed in this case due to their condition. For example, when repairing cement or grain wagon, some cars do not need to repair the roof in the 5th position; nor for a mineral wagon to replace the transom arches, or for gondola car to do the right work and rivet the lower and upper strapping. Given that the wagons can arrive with any damage, regardless of the time between repairs, both DRE or overhaul with extension and only in some cases overhaul can be performed. The latter is now tended to be avoided because the operation time of the wagon after the overhaul is not enough for full payback and benefit to its owner [13]. The following damages are observed after accidents on the railway: the propeller of the spine, broken body racks, deflection of the upper strap, broken (damaged) side frames of the cart, damage to the pivot beam. In such cases, more time is needed to spend on repairs and quality control of repairs to avoid possible complaints. Such wagons can be up to 2 times longer to repair than a normal car undergoing the DR and up to 3-4 times longer than a car passing through DR or DRE. Taking into account such probabilistic factors, the flexible flow can be managed due to the fact that there will always be a free way for the wagon to follow the free module positions. At the same time, the stationary flow will be useful for individual cases of repair of special equipment or special cars where there is not need to follow stable production. Such method is now used only for non-mass models [14]. At the same time, the flow method does not cope with the flow of mass series of wagons and the number of their types undergoing scheduled repairs, thereby causing a load on the stations to which they are driven. This leads to high costs and losses for sorters at stations and for trains following through the station.

Having considered all the problems associated with the flow and stationary method, it can be concluded that the repair facilities need to be urgently converted into new repair methods to prevent shutdowns and collapse at stations and repair plants.

We collected data for 12 variants of cases with different wagons requiring DR, DRE and overhaul: grain, mineral, gondola cars and cement wagons. For each such option, we examined 40 wagons with their downtime at all stages in the technological process [4]. Calculations of the probability of following the wagons on different routes according to the scheme of flexible flow have been carried out. The average downtime of the car, taking into account the probability of repair has been collected and summed up.

The graphs show a downtime of cement, mineral, grain and gondola car at 6 positions for 40 wagons during DR.

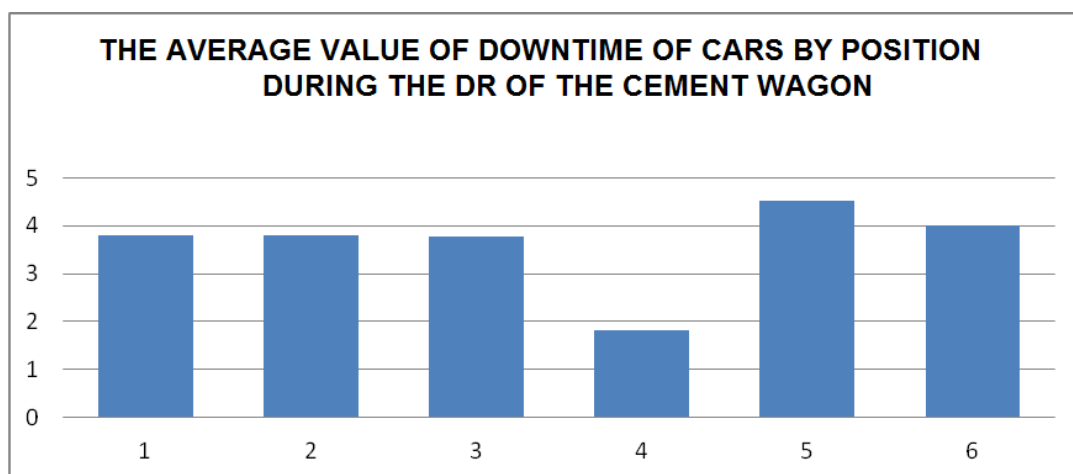


Figure 2. The average value of downtime of cars by position during the DR of the cement wagon

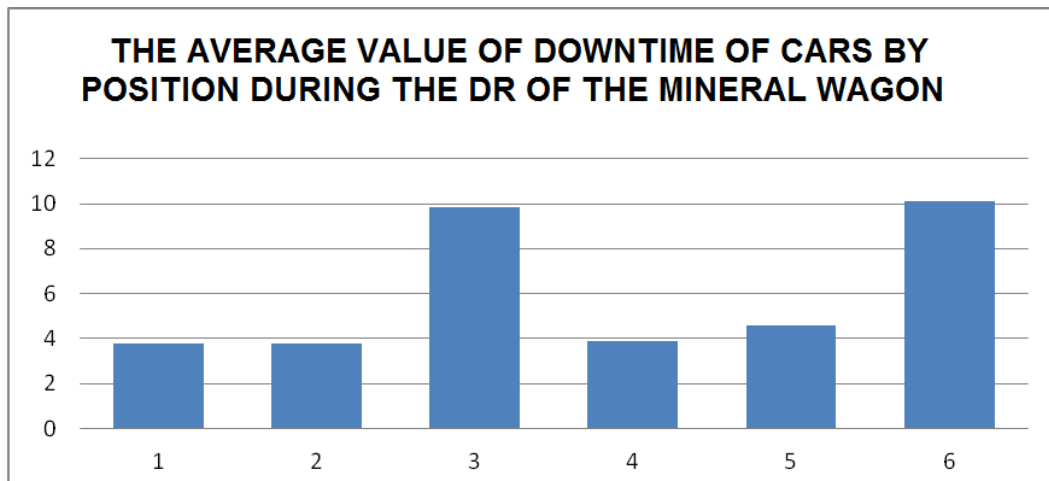


Figure 3. The average value of downtime of cars by position during the DR of the mineral wagon

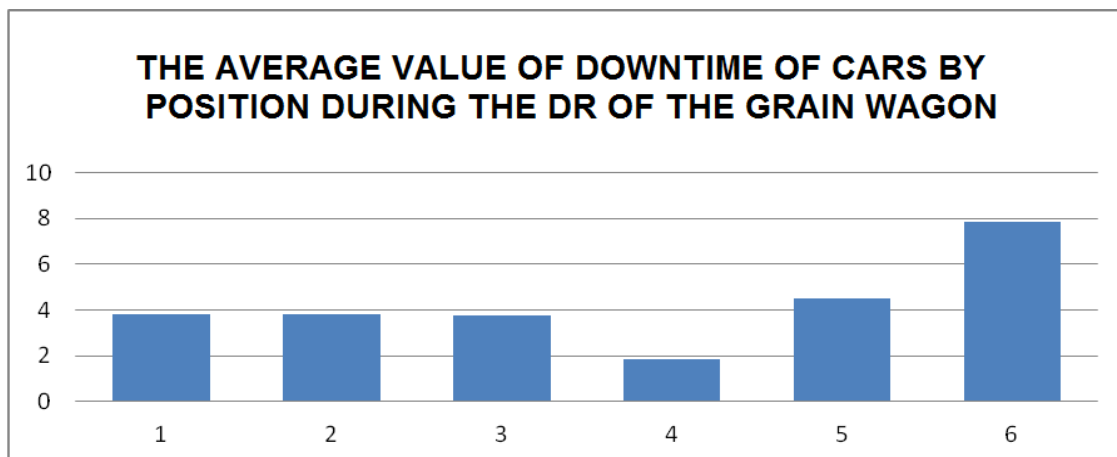


Figure 4. The average value of downtime of cars by position during the DR of the grain wagon

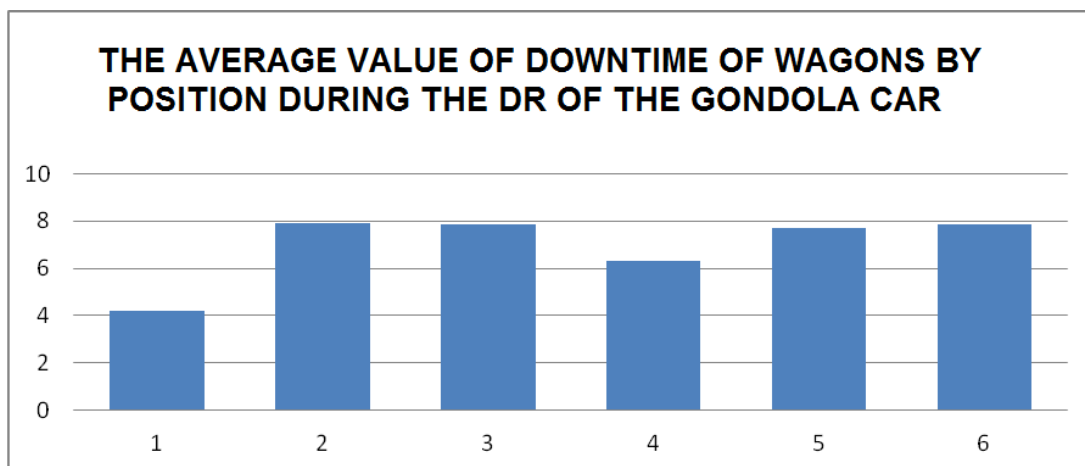


Figure 5. The average value of downtime of wagons by position during the DR of the gondola car

From these figures we can conclude that the downtime of cars is a probabilistic number and it cannot be brought to the ideal value in the usual organization of repairs (stationary or flow), so these methods began to bring only loss of time for wagon repairs due to its structure and sequence of actions.

When considering the structure of the flexible flow organization and comparing it with all the repair methods currently proposed, there is an obvious difference in the number of repair modules, which increases the number of repaired wagons in compliance with the technological process.

To ensure the competitive state of the railway, it is necessary to increase the capacity of wagons through repair stages and reduce the downtime of cars at repair positions [15]. To meet these two parameters, one needs to upgrade existing businesses or build new ones. Our research compares both scenarios of further development of the repair of wagons in Ukraine.

Conclusion

It can be concluded that for enterprises located within the city limits, it is easier and more efficient to reconstruct existing enterprises. If the company is located outside the city, it looks reasonable to demolish all constructions and develop a new project. Given that the existing facilities were built and developed in the post-war period, they were located close to the stations, and no one thought about expanding the repair positions and further development of the repair industry. The area around these enterprises got urbanized, which now complicates the work of the company in the installation and removal of repair facilities.

Flexible asynchronous flow is one of the most popular in repair companies, as it allows to use all repair facilities in compliance with the technological process.

Advantages of flexible asynchronous flow:

- minor changes in the location of repair positions in wagon repair shops;
- adherence to the technological process;
- maintenance of quality control;
- increased load factor of repair equipment;
- increased number of repair units in the annual plan;

Disadvantages.

The main drawback is that this method is not used in the CIS and it is not possible to calculate all the bottlenecks, even using the most advanced calculation methods. There are also no specialists who can train staff to more effectively use all the benefits of this method.

REFERENCES

1. Antoshyn, N.K. (1914). O masterskikh podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [About Workshops of Rolling Stock of Railways]. *Vestnik obshchestva tekhnologov – Bulletin of the Society of Technologists*, 1, 25-27 [in Russian].
2. Nikulina, N.A. (2004). Povysheniye ekonomicheskoy effektivnosti raboty vagonnogo hozyaistva zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh yego reformirvaniya [Increasing the Economic Efficiency of the Work of the Carriage Facilities of Railway Transport in the Conditions of Its Reforming]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
3. Malysheva, O.V. (2005). Ekonomicheskaya otsenka rezervov povysheniya effektivnosti raboty vagonnykh depo v sovremennykh usloviyakh [Economic Assessment of Reserves for Increasing the Efficiency of Wagon Depots in Modern Conditions]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
4. Bulinskiy, F. V., Shyryaev, A.N. (2005). *Teoriya sluchaynykh protsessov [Theory of Random Processes]*. Moscow: FIZMATLIT [in Russian].
5. Vorotnikov, V.G., Denisenko, A.A. (2007). Osnovnyye printsipy modelirovaniya protsessov funktsionirovaniya gibkikh proizvodstvennykh system vagonnykh depo [Basic Principles of Modeling the Processes of Functioning of Flexible Production Systems of Car Depots]. *Proceedings from VIII nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost dvizheniya poezdov» – The Eighth Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»*. (p. 3). [in Russian].
6. Ivanov, A.O. (2009). Uluchshat tekhniko-ekonomicheskiye pokazateli zheleznodorozhnoy tekhniki [Improve the Technical and Economic Indicators of Railway Equipment]. *Vagony i vagonnoye khozyaistvo – Wagons and Wagon Facilities*, 2, 2-3 [in Russian].
7. Myamlin, V.V. (2014). Teoreticheskiye osnovy sozdaniya gibkikh potochnykh proizvodstv dlya remonta podvizhnogo sostava [Theoretical Foundations for the Creation of Flexible In-Line Production for the Repair of Rolling Stock]. *Doctor's thesis*. Dnepropetrovsk: "Standart-Servis" [in Russian].
8. Myamlin, V.V. (2014). Rozrobka konstruktivnykh ta mashynobudivnykh tehnologiy stvorenniya vantazhnykh vagoniv novoho pokolinnya [Development of Structures and Machine-Building Technologies for the Creation of New Generation of Freight Wagons]. *Ukrayinski zaliznytsi – Ukrainian Railways*. 10. 14-15 [in Ukrainian].
9. Normy prostoyu vantazhnykh vagoniv pry depovskomu remontu, tekhnichnomu obsluhovuvanni z vidcheplennyam ta pidhotovtsi do navantazhennya [Standby Norms of Freight Wagons During Depot Repairs, Maintenance with Detachment,

and Lreparation for Operation]. (2005). *Approved order of Ukrzaliznytsia from 14th June 2005*. Kyiv: DP «КПКТБВ» [in Ukrainian].

10. Razumilov, R.M. (2015) Problemy I rezervy sistemy planovo-predupreditelnogo remonta putevoi tekhniki OAO «RZHD» [Problems and Reserves of the System of Planned and Preventive Repair of Track Equipment of Open Joint Stock Company «Russian Railways»]. *Sovremennyye tekhnologiyi. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye – Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 4, 205–210 [in Russian].

11. Raikov, G.V., Petrov, S.V. (2012). Nauchno-teoreticheskiye printsypy naznacheniya mezhremontnykh normativov vagonov [Scientific and Theoretical Principles of the Purpose of Maintenance Repairs of Wagons]. *Vestnik VNIIZHT – Journal of RSRIRT*, 4, 15-18 [in Russian].

12. Seredina, I.A. (1983). Remont I tekhnicheskoye obsluzhyvaniye gruzovykh vagonov [Repair and Maintenance of Freight Wagons]. *Zheleznodorozhnyi transport v SSSR i za rubezhom – Rail Rransport in the USSR and Abroad*, 14, 87-97. [in Russian].

13. Tartakovkiy, E.D. (1984). Nauchnyye osnovy I razrabotka potochnoi tekhnologii diagnostirovaniya I tekhnicheskogo obsluzhyvaniya teplovozov [Scientific Foundations and Development of In-Line Technology of Diagnosis and Maintenance of Diesel Locomotives]. *Doctor's thesis*. Moscow [in Russian].

14. *Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye stroitelstva zavoda po remontu reфриdzhiratornogo podvizhnogo sostava na stantsiyi Komrat v Moldavskoi SSR. Proekt N 6800 [Feasibility Study for the Construction of a Plant for the Repair of Refrigerated Rolling Stock at the Station Comrat in the Moldavian SSR. Project No. 6800]*. (1981). Dnyeprepetrovsk: Dneprzheldorproekt [in Russian].

15. Melnychuk, V.O., Myamlin, S.V., Isopenko, I.P., Myamlin, V.V. (2010). Udoskonalennya systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu vantazhnykh vahoniv [Improvement of the System of Technical Maintenance and Repair of Freight Cars]. *Zbirnyk naukovykh prats – Collection of Scientific Works*, 22, 101-108 [in Ukrainian].

Ориник Дмитро Романович¹

¹ Аспірант. Кафедра Вагони та вагонне господарство, Державний національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2 к1, Дніпро, 49000, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9834-9256>

* Автор, відповідальний за листування: dimaorinik@gmail.com

РЕМОНТ ЦЕМЕНТОВОЗІВ, ЗЕРНОВОЗІВ, МІНЕРАЛОВОЗІВ, ПІВВАГОНІВ В ЄДИНОМУ ГНУЧКОМУ АСИНХРОННОМУ ПОТОЦІ

Публікація актуалізує питання ремонту вагонів в умовах сучасності та висвітлює основні проблеми, пов'язані з методом організації роботи. Низьку продуктивність роботи пов'язану з застарілим обладнанням та зношеним рухомим складом, слабким навчанням задіяного персоналу. Робота містить основні положення зміни методу ремонту, прорахунку можливості завантаження виробних позиції, розрахунок програми ремонту вагонів, визначення кількості шляхів прямування вагонів, аналізом недоліків, пов'язаних з гнучким асинхронним потоком, розробкою рішень, що виникають при перевірці гнучкого потоку при комп'ютерних моделюваннях. Підсумовуючи, цей матеріал надає можливість для розгляду та розроблення проекту на базі Стрийського Вагоноремонтного заводу на гнучкий потік або його модифікації для підвищення ремонтних потужностей. У статті проведено розрахунки по часу ремонту вагонів за потоковим методом та з використанням гнучкого асинхронного полі канального методу ремонту, з наведених графіків видно різниця час простою між однаковими типами вагонів та виду ремонту за умови, що вагони взято з однаковим станом перед початком ремонтних робіт. З цих розрахунків можна зробити висновок, що потоковий метод ремонту вичерпав весь свій ресурсний потенціал, та надалі буде приносити затрати на оплату працівникам, обслуговування устаткування та інші витрати, пов'язані з виробництвом.

Ключові слова: гнучкий асинхронний потік, капітальний ремонт, деповський ремонт, метод ремонту вагонів.

Юрій Калабухін¹, Ігор Мартинов^{2*}, Альона Труфанова³

1. Професор, Кафедра маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>

2. Професор, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, завідувач кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

3. Доцент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

* Автор, відповідальний за листування: martinov.hiit@gmail.com

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТАНІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Ефективність пасажирських перевезень залізничним транспортом залежить від рівня технічного стану пасажирського рухомого складу. Також важливе значення має система ремонту та технічного обслуговування.

Авторами проаналізовано технологічні стани, в яких може знаходитись пасажирський вагон під час експлуатації. Показано, що час знаходження у зазначених станах та сукупність технологічних операцій, які при цьому виконуються, неповною мірою відображають зв'язки між споживаними для їх здійснення ресурсами, експлуатаційними витратами на ці ресурси та отриманими результатами.

У статті наведено результати систематизації технологічних станів пасажирських вагонів. При цьому використано порядок обліку експлуатаційних витрат за основними видами економічної діяльності залізничного транспорту України. Запропоновано систему техніко-економічних показників. Вона характеризує наявність та ефективність використання експлуатаційних витрат на експлуатацію та утримання у технічно справному стані пасажирських вагонів. Обґрунтовано поняття «економіко-технологічний стан пасажирського вагона».

Систематизація дозволила поєднати на науковій основі технологічні та економічні аспекти експлуатації та утримання пасажирських вагонів у технічно справному стані в умовах АТ «Укрзалізниця». Це дозволить удосконалити систему показників техніко-економічної оцінки ефективності використання пасажирських вагонів. Запропонована система буде використана для обґрунтування варіантів оновлення парку пасажирських вагонів за рахунок придбання нових зразків або модернізації існуючих з урахуванням вартості життєвого циклу (LCC).

Ключові слова: пасажирський вагон, експлуатація, технічне обслуговування, плановий ремонт, життєвий цикл, експлуатаційні витрати.

Вступ. Залізничний транспорт залишається важливою складовою частиною транспортної системи України, на його частку припадає значний відсоток пасажирообігу, що виконується усіма видами соціального транспорту.

Підвищення ефективності використання пасажирського рухомого складу залишається однією з важливих задач, що стоять в теперішній час перед залізничною галуззю. Але багаторічна тенденція фізичного та морального зносу парку пасажирських вагонів АТ

«Укрзалізниця», яку дуже важко здолати без залучення багатомільйонних інвестицій, негативно впливає на підвищення ефективності їх експлуатації. Фактично переважна більшість інвентарного парку пасажирських вагонів власності філії «Пасажирська компанія» вже відпрацювала свій ресурс, оскільки ці вагони в основному були збудовані ще у другій половині ХХ ст. Щороку значна кількість вагонів потребує виключення з парку

Багаторазове відновлення працездатності пасажирських вагонів шляхом проведення планових видів ремонтів (включаючи капітально-відновлювальний ремонт з подовженням терміну служби) призвело до того, що витрати на підтримку працездатності пасажирських вагонів перевищують витрати на придбання нового рухомого складу. Це обумовлює подальше зростання собівартості пасажирських перевезень та зменшення їх рентабельності. Законом України «Про Державний бюджет України на 2021 рік» було затверджено бюджетну програму «Оновлення рухомого складу для перевезення пасажирів та модернізації залізничної інфраструктури для розвитку пасажирських перевезень».

Таким чином, першочерговою задачею залізничної галузі в сфері пасажирських перевезень є оновлення пасажирського рухомого складу. Оновлення парку пасажирських вагонів може здійснюватися як за рахунок придбання нових сучасних зразків, так і за рахунок модернізації існуючих. В обох випадках цей захід передбачає значні капітальні вкладення.

На теперішній час у світовій практиці в основу техніко-економічного обґрунтування вибору варіанта оновлення рухомого складу, у тому числі і залізничного, покладено методологію оцінки життєвого циклу. Ця методологія дозволяє надати економічну оцінку альтернативних варіантів. Проведення такої оцінки передбачає досконале вивчення та урахування економіко-технологічних властивостей нової техніки.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питанням забезпечення ефективності та якості пасажирських перевезень на залізницях Україна присвячена значна кількість досліджень як науковців, так і фахівців залізничного транспорту. Основні напрями удосконалення роботи пасажирського господарства у ринкових умовах висвітлені у роботах проф. В. М. Самсонкіна [1, 2] та проф. О. О. Петренко [3]. Останній вважає, що власних коштів залізниць недостатньо для підвищення ефективності пасажирських перевезень і необхідно залучення зовнішніх інвестиційних програм.

У статті [4] проаналізовано стан парку пасажирських вагонів та зроблено висновок про необхідність негайного оновлення пасажирського рухомого складу. У роботах [5, 6] подано результати статистичного аналізу величин зносів та пошкоджень вузлів пасажирських вагонів різних років побудови, що відпрацювали свій термін служби, та розроблені відповідні рекомендації подальшого відновлення їх працездатності. Б. Я. Остапюком в дослідженні [7] розглядаються питання удосконалення системи ремонту пасажирських вагонів після продовження терміну їх експлуатації. Запропоновано декілька варіантів продовження терміну експлуатації пасажирських вагонів.

В статті [7] авторами за допомогою методу оцінки інвестиційних проектів зроблена економічна оцінка декількох можливих варіантів продовження терміну служби пасажирських вагонів після закінчення нормативного строку. Визначено, що самими економічними є варіанти подовження терміну служби пасажирських вагонів після технічного діагностування та КР-1. Але це не завжди можливо з технічної точки зору. Зроблено висновок про те, що в умовах дефіциту інвестицій на придбання рухомого складу можна й доцільно паралельно виконувати капітально-відновлювальний ремонт вагонів.

Авторами дослідження [9] визначається місце, яке займають експлуатаційні витрати в системі витрат залізничного транспорту, як вони відносяться на собівартість перевезень, та встановлені критерії визначення складу робіт за господарствами, що утворюють експлуатаційні витрати. Також досліджено підходи до обліку експлуатаційних витрат залізничного транспорту.

В роботі Крістіана Понтісселлі [10] подано історичну довідку щодо поняття вартості життєвого циклу, визначено основні області застосування вартості життєвого циклу, розкрито

можливості використання вартості життєвого циклу в тендерних запитах, визначені складності в розрахунку вартості життєвого циклу.

У статті [11] розглянуто методичні підходи до оцінки вартості життєвого циклу виробу в галузі машинобудування та побудови критерію відбору машинобудівної продукції на базі вартості життєвого циклу виробу.

У дослідженнях [12, 13] викладено основні положення методології визначення життєвого циклу та його вартості щодо тягового рухомого складу. Стосовно визначення життєвого циклу пасажирського вагона концептуальний підхід викладено в роботі фахівців УкрДУЗТ [14].

У роботах [15, 16] викладено сучасні погляди на перспективи в області прогнозування витрат на утримання технічних об'єктів у контексті вартості життєвого циклу.

Але у зазначених роботах, як правило, розглядаються або суто технічні (техніко-технологічні), або суто економічні аспекти експлуатації пасажирських вагонів. Крім того, ці аспекти недостатньо враховують вимоги до оновлення рухомого складу в плані оцінки його життєвого циклу. Тобто поняття «економіко-технологічний стан пасажирського вагона», на жаль, до сьогодні не має наукового підґрунтя. Тому автори вважають, що наступним кроком у подальшому розвитку концепції життєвого циклу є поєднання на науковій основі технологічних та економічних аспектів експлуатації і утримання пасажирських вагонів в технічно справному стані в умовах АТ «Українська залізниця».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є систематизація технологічних станів пасажирських вагонів відповідно до порядку обліку експлуатаційних витрат з основних видів економічної діяльності залізничного транспорту України.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

провести аналіз існуючих технологічних станів пасажирського вагона протягом життєвого циклу;

обґрунтувати поняття «економіко-технологічний стан пасажирського вагона»;

систематизувати технологічні стани пасажирських вагонів за видами сполучень у відповідності до економічного обліку.

Матеріали та методи дослідження. Запропонована авторами у дослідженні [14] каскадна модель життєвого циклу пасажирського вагону включає в себе п'ять етапів. Розглянемо більш детально етап «Експлуатація пасажирського вагона», який включає процеси прийняття транспортною компанією (підрозділом) вагона, введення його в робочий парк вагонів для безпосереднього використання відповідно по призначенню (у тому числі гарантійний строк), підтримка парку вагонів в установленому ступені його готовності до використання шляхом проведення комплексу заходів (у тому числі технічного обслуговування та ремонту), спрямованих на забезпечення та (або) відновлення працездатності та справності вагонів.

Підтримка парку вагонів в готовності до використання виконується згідно вимог, регламентованих наказом ПАТ «Укрзалізниця» [17]. Тобто це технічне обслуговування (ТО-1; ТО-2; ТО-3), поточний ремонт (ПР) з відчепленням вагона від складу поїзда, поточне утримання пасажирських вагонів (в тому числі обслуговування вагонів на шляху прямування).

Стосовно планових видів ремонту (не враховуючи час знаходження вагонів під час прямування в ремонт та в очікуванні ремонту) пасажирський вагон може знаходитися у деповському ремонті (ДР), капітальному ремонті першого обсягу (КР-1) або другого обсягу (КР-2), капітально-відновлювальному ремонті (КВР) або капітальному ремонті з продовженням терміну експлуатації (КРП). Будемо вважати, що це так звані «технологічні стани» пасажирського вагона.

Але час знаходження у зазначених станах та сукупність технологічних операцій, які при цьому виконуються, неповною мірою відображають зв'язки між ресурсами, що споживаються для їх здійснення, експлуатаційними витратами на ці ресурси та результатами, які визначають ефективність використання ресурсів. Крім того слід визначити механізм розподілу отриманого результату за окремими напрямками. Таким чином, необхідна розробка системи техніко-

економічних показників, що характеризує наявність та ефективність використання експлуатаційних витрат на експлуатацію та утримання в технічно справному стані пасажирських вагонів. Вона повинна включати дані, що характеризують склад експлуатаційних витрат у відповідності до діючої системи обліку, наявність, надходження та витрата у процесі експлуатації, характеристики ефективності їх використання та ін. Все це визначає економічний аспект поняття «економіко-технологічний стан пасажирського вагона».

В подальшому зазначений підхід дозволить надати можливість удосконалити систему показників техніко-економічної оцінки ефективності використання пасажирських вагонів, що існують, та покласти її в основу обґрунтування варіантів оновлення парку пасажирських вагонів за рахунок придбання нових зразків або модернізації існуючих з урахуванням життєвого циклу.

У таблиці 1 систематизовано технологічні стани пасажирських вагонів за видами сполучень у відповідності до економічного обліку за статтями «Номенклатури витрат...» [18].

Таблиця 1. Технологічні стани пасажирських вагонів в експлуатації та їх економічний облік за видами сполучень

Технологічний стан	№ статей за видами сполучень	
	внутрішньодержавне (крім приміського і регіонального) та міжнародне	приміське і регіональне
Екіпірування пасажирських вагонів	1008	2003
Обслуговування вагонів у пасажирських поїздах	1009	2004
Технічне обслуговування за програмою ТО-1 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	1020	2020
Технічне обслуговування за програмою ТО-2 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	1021	2021
Технічне обслуговування за програмою ТО-3 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	1022	2022
Технічне обслуговування за програмою ТО-1 пасажирських вагонів на шляху прямування	4007	4007
Поточний ремонт з відчепленням пасажирських вагонів	6007	6008
Деповський ремонт пасажирських вагонів	6009	6010
Капітальний ремонт пасажирських вагонів	6012	6013
Капітально-відновлювальний ремонт в умовах депо	6012	6013
Капітальний ремонт (в умовах депо) з продовженням терміну експлуатації	6012	6013

Експлуатаційні витрати за кожною із статей та їх склад регламентуються Номенклатурою витрат з основних видів економічної діяльності залізничного транспорту України. Облік фактичних експлуатаційних витрат за цими статтями ведеться відповідними окремими підрозділами та в цілому по Укрзалізниці.

Кожна із статей складається з економічно однорідних елементів:

оплата праці, $B^{o.п.}$;

відрахування на соціальні заходи (на теперішній час – Єдиний соціальний внесок), $B^{с.з.}$;

матеріали, B^M ;

паливо, $B^п.$;

електроенергія, $B^e.$

амортизація, $B^{ам.}$;

інші, $B^{ін.}$.

Елемент витрат «Амортизація» в подальшому не включаємо до урахування у відповідності до положень методології оцінки життєвого циклу рухомого складу залізниць [12, 13].

Сумарні експлуатаційні витрати за i -ю статтею витрат технологічного стану пасажирських вагонів за видом сполучення визначаються за формулою

$$B_i = \sum_j B_i^j, \quad (1)$$

де B_i^j – витрати за j -м елементом i -ї статті витрат технологічного стану пасажирських вагонів за видом сполучення, грн.;

j – елемент витрат технологічного стану пасажирських вагонів.

Сумарні експлуатаційні витрати за j -м елементом витрат технологічних станів пасажирських вагонів за видом сполучення визначаються за формулою

$$B^j = \sum_i B_i^j, \quad (2)$$

де B_i^j – витрати за j -м елементом i -ї статті витрат технологічного стану пасажирських вагонів за видом сполучення, грн.;

i – стаття витрат технологічного стану пасажирських вагонів за видом сполучення.

Сумарні експлуатаційні витрати за видами сполучення пасажирських вагонів визначаються за формулами:

у внутрішньодержавному (крім приміського і регіонального) та міжнародному

$$\sum B_{вд.м} = \sum_i B_{вд.м.i} = \sum_j B_{вд.м}^j, \quad (3)$$

у приміському і регіональному

$$\sum B_{п.р} = \sum_i B_{п.р.i} = \sum_j B_{п.р}^j, \quad (4)$$

де $B_{вд.м.i}$, $B_{п.р.i}$ – сумарні експлуатаційні витрати за i -ю статтею витрат технологічного стану пасажирських вагонів відповідно, у внутрішньодержавному та міжнародному сполученні і у приміському та регіональному сполученні, грн.;

$B_{вд.м}^j$, $B_{п.р}^j$ – сумарні експлуатаційні витрати за j -им елементом витрат технологічних станів пасажирських вагонів відповідно, у внутрішньодержавному та міжнародному сполученні і у приміському та регіональному сполученні, грн.

Формування фактичних експлуатаційних витрат за технологічними станами пасажирських вагонів за видами сполучення наведено у таблицях 2 та 3.

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Таблиця 2. Формування фактичних експлуатаційних витрат за технологічними станами пасажирських вагонів у внутрішньодержавному (крім приміського і регіонального) та міжнародному сполученні

Технологічний стан	№ статті	Елемент витрат						Разом
		Оплата праці	Відрахування на соціальні заходи	Матеріали	Паливо	Електроенергія	Інші	
Екіпірування пасажирських вагонів	1008	$B_{1008}^{o.p.}$	$B_{1008}^{c.3}$	B_{1008}^M	B_{1008}^n	B_{1008}^e	B_{1008}^{iH}	B_{1008}
Обслуговування вагонів у пасажирських поїздах	1009	$B_{1009}^{o.p.}$	$B_{1009}^{c.3}$	B_{1009}^M	B_{1009}^n	B_{1009}^e	B_{1009}^{iH}	B_{1009}
Технічне обслуговування за програмою ТО-1 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	1020	$B_{1020}^{o.p.}$	$B_{1020}^{c.3}$	B_{1020}^M	B_{1020}^n	B_{1020}^e	B_{1020}^{iH}	B_{1020}
Технічне обслуговування за програмою ТО-2 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	1021	$B_{1021}^{o.p.}$	$B_{1021}^{c.3}$	B_{1021}^M	B_{1021}^n	B_{1021}^e	B_{1021}^{iH}	B_{1021}
Технічне обслуговування за програмою ТО-3 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	1022	$B_{1022}^{o.p.}$	$B_{1022}^{c.3}$	B_{1022}^M	B_{1022}^n	B_{1022}^e	B_{1022}^{iH}	B_{1022}
Технічне обслуговування за програмою ТО-1 пасажирських вагонів на шляху прямування	4007	$B_{4007}^{o.p.}$	$B_{4007}^{c.3}$	B_{4007}^M	B_{4007}^n	B_{4007}^e	B_{4007}^{iH}	B_{4007}
Поточний ремонт з відчепленням пасажирських вагонів	6007	$B_{6007}^{o.p.}$	$B_{6007}^{c.3}$	B_{6007}^M	B_{6007}^n	B_{6007}^e	B_{6007}^{iH}	B_{6007}
Деповський ремонт пасажирських вагонів	6009	$B_{6009}^{o.p.}$	$B_{6009}^{c.3}$	B_{6009}^M	B_{6009}^n	B_{6009}^e	B_{6009}^{iH}	B_{6009}
Капітальний ремонт пасажирських вагонів	6012	$B_{6012}^{o.p.}$	$B_{6012}^{c.3}$	B_{6012}^M	B_{6012}^n	B_{6012}^e	B_{6012}^{iH}	B_{6012}
Разом у внутрішньодержавному (крім приміського і регіонального) та міжнародному сполученні		$\sum B_{вд,м}^{o.p.}$	$\sum B_{вд,м}^{c.3}$	$\sum B_{вд,м}^M$	$\sum B_{вд,м}^n$	$\sum B_{вд,м}^e$	$\sum B_{вд,м}^{iH}$	$\sum B_{вд,м}$

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Таблиця 3. Формування експлуатаційних фактичних витрат за технологічними станами пасажирських вагонів у приміському і регіональному сполученні

Технологічний стан	№ статті	Елемент витрат						Разом
		Оплата праці	Відрахування на соціальні заходи	Матеріали	Паливо	Електроенергія	Інші	
Екіпірування пасажирських вагонів	2003	$B_{2003}^{o.p}$	$B_{2003}^{c.3}$	B_{2003}^M	B_{2003}^n	$B_{2003}^{o.p}$	B_{2003}^{iH}	B_{2003}
Обслуговування вагонів у пасажирських поїздах	2004	$B_{2004}^{o.p}$	$B_{2004}^{c.3}$	B_{2004}^M	B_{2004}^n	$B_{2004}^{o.p}$	B_{2004}^{iH}	B_{2004}
Технічне обслуговування за програмою ТО-1 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	2020	$B_{2020}^{o.p}$	$B_{2020}^{c.3}$	B_{2020}^M	B_{2020}^n	$B_{2020}^{o.p}$	B_{2020}^{iH}	B_{2020}
Технічне обслуговування за програмою ТО-2 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	2021	$B_{2021}^{o.p}$	$B_{2021}^{c.3}$	B_{2021}^M	B_{2021}^n	$B_{2021}^{o.p}$	B_{2021}^{iH}	B_{2021}
Технічне обслуговування за програмою ТО-3 у пунктах формування й обороту пасажирських вагонів	2022	$B_{2022}^{o.p}$	$B_{2022}^{c.3}$	B_{2022}^M	B_{2022}^n	$B_{2022}^{o.p}$	B_{2022}^{iH}	B_{2022}
Технічне обслуговування за програмою ТО-1 пасажирських вагонів на шляху прямування	4007	$B_{4007}^{o.p}$	$B_{4007}^{c.3}$	B_{4007}^M	B_{4007}^n	B_{4007}^e	B_{4007}^{iH}	B_{4007}
Поточний ремонт з відчепленням пасажирських вагонів	6008	$B_{6008}^{o.p}$	$B_{6008}^{c.3}$	B_{6008}^M	B_{6008}^n	B_{6008}^e	B_{6008}^{iH}	B_{6008}
Деповський ремонт пасажирських вагонів	6010	$B_{6010}^{o.p}$	$B_{6010}^{c.3}$	B_{6010}^M	B_{6010}^n	$B_{6010}^{o.p}$	B_{6010}^{iH}	B_{6010}
Капітальний ремонт пасажирських вагонів	6013	$B_{6013}^{o.p}$	$B_{6013}^{c.3}$	B_{6013}^M	B_{6013}^n	B_{6013}^e	B_{6013}^{iH}	B_{6013}
Разом у приміському і регіональному сполученні		$\sum B_{п.р}^{o.p}$	$\sum B_{п.р}^{c.3}$	$\sum B_{п.р}^M$	$\sum B_{п.р}^n$	$\sum B_{п.р}^e$	$\sum B_{п.р}^{iH}$	$\sum B_{п.р}$

Висновки. Аналіз існуючих технологічних станів пасажирського вагону дозволив систематизувати їх у відповідності до порядку обліку експлуатаційних витрат з основних видів економічної діяльності залізничного транспорту України та на науковій основі поєднати технологічні і економічні аспекти експлуатації та утримання пасажирських вагонів в технічно справному стані в умовах Української залізниці протягом життєвого циклу.

Систематизація та наукове поєднання технологічних і економічних аспектів експлуатації та утримання пасажирських вагонів в технічно справному стані дозволило обґрунтувати поняття «економіко-технологічний стан пасажирського вагона».

В подальшому визначений підхід дозволить надати можливість удосконалити систему показників техніко-економічної оцінки ефективності використання пасажирських вагонів, що існують, та покласти її в основу обґрунтування варіантів оновлення парку пасажирських вагонів за рахунок придбання нових зразків або модернізації існуючих з урахуванням життєвого циклу. Це є наступним кроком розвитку концепції життєвого циклу стосовно до пасажирського вагона, яку буде покладено в основу формування вартості життєвого циклу з метою мінімізації витрат що пов'язані з придбанням, втіленням та експлуатацією нових зразків техніки, а також для визначення її лімітної ціни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самсонкін В. М. Про підвищення ефективності пасажирських перевезень на залізничному транспорті. // Залізничний трансп. України. 2004. № 1. С. 43-45.
2. Самсонкін В. М., Гудков О. М. Основи реорганізації пасажирського комплексу залізничного транспорту. // Вісник економіки транспорту і промисловості. 2009. № 25. С. 78-81.
3. Петренко О. О. Пасажирські залізничні перевезення в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. // Причорноморські економічні студії. 2016. Вип. 10. С. 47-52.
4. Божок Н. О., Булгакова Ю. В., Пуларія А. Л. Дослідження сучасного стану парку пасажирських вагонів. // Збірник наукових праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна "Проблеми економіки транспорту". 2014. Вип. 8. С. 78-87.
5. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Павленко Ю. С., Сергієнко М. О. Аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Транспортне машинобудування. Х.: НТУ "ХПІ". 2018. № 45 (1321). С. 41-46.
6. Шикинов О. А., Рейдемейстер О. Г., Анофрієв В. Г. Дослідження граничного стану пасажирських вагонів. // Вагонний парк. 2012. № 12. С. 4-6.
7. Остапюк Б. Я. Подовження терміну експлуатації пасажирських вагонів. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2004. Вип. 4. С. 165-173.
8. Лобойко Л. М., Бараш Ю. С., Карась О. О. Оцінка варіантів подовження терміну служби пасажирських вагонів // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2008. Вип. 20. С. 240-245.
9. Кірдіна О. Г., Коловойда Н. В., Шамрай А. Є. Підходи до обліку експлуатаційних витрат підприємств залізничного транспорту. // Вісник економіки транспорту і промисловості. № 68. 2019. С. 279-288.
10. Кристиан Понтисселли. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава. От теории к практике. // Техника железных дорог, №4 (8) ноябрь 2009. С. 19-24.
11. Гненний О.М. Мохаммадреза А. До питання оцінки та застосування вартості життєвого циклу продукції машинобудування. // Збір. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна "Проблеми економіки та транспорту". Вип. 12, 2016. С. 7-13.
12. Методы оценки жизненного цикла подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский та ін. Луганськ: Ноулдидж. 2011. 174 с.
13. Методологія визначення вартості життєвого циклу в контексті оцінки інноваційно-інвестиційних проектів тягового рухомого складу залізниць України: монографія / Ю. Є. Калабухін та ін. Суми: Тритотрія. 2018. 395-404 с.
14. Мартинов І. Е., Калабухін Ю. Є., Труфанова А. В. Концепція життєвого циклу пасажирського вагону // Збір. наук. праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія "Транспортні системи і технології". Вип. 38. К: ДУІТ 2021. С. 153-163.
15. Selecting Test and Maintenance Strategies to achieve Availability Target with lowest Life Cycle Cost, P. Dersin, F. Perrone, C. Arroum (ALSTOM Transport) RAMS 2008, Las Vegas, NE, USA.
16. Achieving Availability Cost-effectively in complex Systems, P. Dersin (ALSTOM Transport); Tutorial, RAMS 2009, Fort Worth, TX, USA.
17. Наказ від 11.01.2017 №006-Ц "Про деякі питання технічного обслуговування та ремонту пасажирських вагонів".

18. Номенклатура витрат з основних видів економічної діяльності залізничного транспорту України. Київ : ПАТ "Укрзалізниця". 2018. 451 с. Затверджена наказом ПАТ "Укрзалізниця" від 01.11.2018 р. № 669-Ц.

REFERENCES

1. Samsonkin V. M. (2004) Pro pidvyshchennya efektyvnosti pasazhyrskykh perevezen na zaliznychnomu transporti [On improving the efficiency of passenger transport by rail]. // *Zaliznychnyye transp. Ukrayiny – Railway transp. of Ukraine*. 1. 43-45. [in Ukrainian].
2. Samsonkin V. M. & Hudkov O. M. (2009) Osnovy reorganizatsiyi pasazhyrskoho kompleksu zaliznychnoho transportu [Fundamentals of reorganization of the passenger complex of railway transport]. // *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti – Bulletin of Transport Economics and Industry*. 25. pp. 78-81. [in Ukrainian].
3. Petrenko O. O. (2016) Pasazhyrski zaliznychni perevezennya v Ukrayini: suchasnyy stan i perspektyvy rozvytku [Passenger railway transportation in Ukraine: current status and prospects]. // *Prychornomorski ekonomichni studiyi – Black Sea Economic Studies*. 10. pp. 47-52. [in Ukrainian].
4. Bozhok N. O., & Bulhakova YU. V., & Pulariya A. L. (2014) Doslidzhennya suchasnoho stanu parku pasazhyrskykh vahoniv [Research of the current state of the passenger car fleet]. // *Zbirnyk naukovykh prats' Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazaryana "Problemy ekonomiky transportu" – Collection of scientific works of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. acad. V. Lazaryan "Problems of transport economics"*. 8. pp. 78-87. [in Ukrainian].
5. Martynov I. E., & Trufanova A. V., & Pavlenko YU. S., & Serhiyenko M. O. (2018) Analiz tekhnichnoho stanu kuzoviv pasazhyrskykh vahoniv [Analysis of the technical condition of the bodies of passenger cars.]. // *Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. Transportne mashynobuduvannya – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: New solutions in modern technologies*. 45 (1321). pp. 41-46. [in Ukrainian].
6. Shykunov O. A., & Reydemeyster O. H., & Anofriyev V. H. (2012). Doslidzhennya hranychnoho stanu pasazhyrskykh vahoniv [Research of the limit state of passenger cars]. // *Vahonnyy park – Car park*. 12. pp. 4-6. [in Ukrainian].
7. Ostapyuk B. YA. (2004). Podovzhennya terminu ekspluatatsiyi pasazhyrskykh vahoniv [Extension of service life of passenger cars]. // *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 4, pp. 134-141 [in Ukrainian].
8. Loboiko L. M., & Barash Yu. S., & Karas OO (2008). Otsinka variantiv podovzhennya terminu sluzhby pasazhyrskykh vahoniv [Estimation of options for extending the service life of passenger cars] // *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 4, pp. 240-245 [in Ukrainian].
9. Kirdina O. H., & Kolovoyda N. V., & Shamray A. YE. (2019). Pidkhody do obliku ekspluatatsiyinykh vytrat pidpryemstv zaliznychnoho transportu [Approaches to accounting for operating costs of railway transport enterprises]. // *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovost – Bulletin of Transport Economics and Industry*. // Вісник економіки транспорту і промисловості. 68. pp. 279-288. [in Ukrainian].
10. Pontysseley Krystyan. (2009) Stoykost zhyznennoho tsykla zheleznodorozhnoho podvyzhnogo sostava. Ot teoryi k praktyke [Railway rolling stock life cycle cost. From theory to practice]. *Tekhnika zheleznykh dorog – Railway engineering*, 4 (8), 19-24. [in Russian].
11. Gnennyi O.M. & Mokhammadreza A. (2016) Do pytannya otsinky ta zastosuvannya vartosti zhytlyevoho tsyklu produktsiyi mashynobuduvannya [On the issue of estimating and applying the value of the life cycle of mechanical engineering products]. // *Zbirnyk naukovykh prats' Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazaryana "Problemy ekonomiky transportu" – Collection of scientific works of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. acad. V. Lazaryan "Problems of transport economics"*. 12. pp. 7-13. [in Ukrainian].
12. Tartakovskiy, E. D. & Grishchenko, S. G., & Kalabukhin, Yu. E., & Falendysh, A. P. (2011). *Metody otsenki zhiznennogo tsykla podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Methods for assessing the life cycle of rolling stock of railways]*. Luhansk: Noulydzh [in Russian].
13. Kalabukhin Yu. E., & Zorina O. I., & Kameneva N. M. (2018) *Metodolohiya vyznachennya vartosti zhytlyevoho tsyklu v konteksti otsinky innovatsiyno-investytsiyinykh proektiv tyahovoho rukhomoho skladu zaliznyts' Ukrayiny [Methodology for determining the value of the life cycle in the context of evaluation of innovation and investment projects of traction rolling stock of the railways of Ukraine]*. Sumi: Tritoriya. [in Ukrainian].
14. Martynov I. E., & Kalabukhin YU. YE., & Trufanova A. V. Kontseptsiya zhytlyevoho tsyklu pasazhyrskoho vahonu [The concept of the life cycle of a passenger car] // *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny: Seriya "Transportni systemy i tekhnolohiyi – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series "Transport Systems and Technologies"*. 38. 153-163. [in Ukrainian].
15. Selecting Test and Maintenance Strategies to achieve Availability Target with lowest Life Cycle Cost, P. Dersin, F. Perrone, C. Arroum (ALSTOM Transport) RAMS 2008, Las Vegas, NE, USA.

16. Achieving Availability Cost-effectively in complex Systems, P. Dersin (ALSTOM Transport); Tutorial, RAMS 2009, Fort Worth, TX, USA.

17. Nakaz vid 11.01.2017 №006-TS "Pro deyaki pytannya tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu pasazhyr'skykh vahoniv".

18. Nomenklatura vytrat z osnovnykh vydiv ekonomichnoi diialnosti zaliznychnoho transportu Ukrainy [Nomenclature of costs for the main types of economic activity of railway transport of Ukraine] (2018). – Kyev: Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

Yuri Kalabukhin¹, Igor Martynov², Alyona Trufanova³

¹ Professor of Department Marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>

² Professor of Department Wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

³ Associate Professor of Department Wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>

SYSTEMATIZATION OF ECONOMYKO-TECHNOLOGICAL STATIONS OF PASSENGER CARS IN OPERATION

The efficiency of passenger transportation by rail depends on the level of technical condition of the passenger rolling stock. The repair and maintenance system is also important.

The authors analyzed the technological states of a passenger car can during operation. It is shown that the time spent in these states and the set of technological operations that are performed at the same time do not fully reflect the relationship between the resources consumed for their implementation, the operating costs of these resources and the results.

The article presents the results of systematization of the technological states of passenger cars. At the same time, the procedure for accounting for operating costs for the main types of economic activity of Ukrainian railway transport was used. A system of technical and economic indicators is proposed. It characterizes the availability and efficiency of the use of operating costs for the operation and maintenance of passenger cars in a technically sound condition. The concept of "economic and technological state of a passenger car" is substantiated.

The systematization made it possible to combine, on a scientific basis, the technological and economic aspects of the operation and maintenance of passenger cars in a technically sound condition in the conditions of JSC "Ukrzaliznytsia". This will improve the system of indicators for the technical and economic evaluation of the effectiveness of the use of existing passenger cars. The proposed system will be used to justify options for updating the fleet of passenger cars through the acquisition of new models or the modernization of existing ones, taking into account the cost of the life cycle.

Keywords: *passenger car, operation, technical maintenance, scheduled repairs, life cycle, maintenance.*

УДК 629.4

**Євген Рябов^{1*}, Сергій Мосін², Лілія Овер'янова³, Лілія Кондратьєва⁴,
Олександр Демидов⁵, Сергій Гулак⁶**

¹ Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>

² Головний інженер залізничного цеху, ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», вул. Будівельників, 16, м. Горішні Плавні, Полтавська обл., 39802, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8281-6235>

³ Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

⁴ Аспірантка, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2788-9116>

⁵ Старший викладач, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0532-9748>

⁶ Доцент, Кафедра «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

*Автор, відповідальний за листування: riabov.ievgen@gmail.com

ОЦІНКА ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛОКОМОТИВА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО КАР'ЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

Проведено оцінку основних технічних параметрів локомотива для кар'єрного залізничного транспорту. Визначені розрахункові параметри локомотиву та встановлено, що дотична потужність становить 6700 кВт, а тягове зусилля для розрахункового режиму – 1300 кН. Виконано розрахунки тягової характеристики локомотива. Запропоновано процедуру визначення параметрів режимів роботи локомотива при виконанні поїзних задач, в основу якої лежить обробка результатів розв'язання тягової задачі на ділянці шляху. Встановлено, що для тестової ділянки шляху значну частину часу у тяговому режимі локомотив працює з навантаженням, яке становить 10...25% номінального, у зв'язку з чим запропоновано реалізувати режим руху з відключенням тягових електродвигунів. Запропоновано застосування бортової системи накопичення енергії, що дозволить акумулювати енергію при електродинамічному гальмуванні. Запропоновано узагальнену схему тягової системи, яка дозволить реалізувати способи підвищення енергоефективності рухомого складу.

Ключові слова: локомотив, сила тяги, тяговий електропривод, енергоефективність.

Вступ. Декарбонізацію економіки та досягнення кліматичної нейтральності визначено пріоритетним напрямом у Національній економічній стратегії на період до 2030 року [1]. Відповідно до зазначених цілей підприємства гірничо-металургійної галузі сформулювали

власні програми екологізації виробничих процесів, у яких пріоритетне місце займає впровадження інноваційних технологій на усіх етапах виробництва [2].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Важливою ланкою у виробництві залізрудного концентрату є перевезення гірської маси з кар'єру до переробного комплексу комбінату. На цьому етапі широко застосовується залізничний транспорт, який може використовуватись як самостійно (здебільшого на кар'єрах Криворізького басейну), так і у складі комбінованого способу вивезення гірської маси (наприклад, на ПрАТ «Полтавський ГЗК»). На електрифікованих ділянках для цього застосовуються поїзди, що складаються з думпкарів та тягових агрегатів ОПЕ1А(М) (рис. 1, а) при електрифікації змінним струмом та тягові агрегати ПЕ2У/М при електрифікації постійним струмом. Головними перевагами від їх застосування є високий коефіцієнт корисної дії та низькі затрати на перевезення гірської маси. На неелектрифікованих ділянках використовують тепловози 2ТЕ10В/М, 2ТЕ116, ТЕМ2, ТЕМ7 (рис. 1, б).

Хоча вищезазначені локомотиви забезпечують водіння поїздів, однак вони мають тривалі терміни експлуатації (і часто експлуатуються у понад рекомендовані виробником строки). Другим важливим недоліком є підвищене у порівнянні із сучасною технікою споживання паливо-енергетичних ресурсів, що пов'язане з використанням застарілих технічних рішень при побудові тягового електроприводу та допоміжних систем (навіть з урахування модернізації та часткової заміни обладнання). Виходом із цієї ситуації вважаємо перехід до застосування новітнього тягового рухомого складу.



а)



б)

*Рис. 1. Локомотиви для залізничного кар'єрного транспорту
а – тяговий агрегат ОПЕ1АМ, б – тепловози ТЕМ7*

Зважаючи на високу енергетичну та екологічну ефективність електричної тяги вітчизняні гірничодобувні підприємства планують інтенсивно розбудовувати системи електричної тяги

внутрішнього залізничного транспорту [3]. За оцінками [4], на електричну тягу у кар'єрі припадає до 85% всього споживання енергії. Тому створення рухомого складу повинно відбуватися з позицій забезпечення його високої енергоефективності та низького впливу на навколишнє середовище. До таких технологій у електричній тязі можна віднести: рекуперацію енергії у поєднанні із застосуванням бортових систем накопичення енергії [5-9], відключення тягових електродвигунів при роботі з частковим навантаженням [10, 11], керований електропривод допоміжних систем [12-14]. Оптимізація енергоспоживання забезпечується відповідними алгоритмами керування системами локомотива [15-18].

На сьогоднішній день найпоширенішою практикою є застосування на рухомому складі тягового асинхронного електроприводу [19, 20]. У роботі [21] проведено обґрунтування можливості і доцільності застосування асинхронного тягового електроприводу на кар'єрних локомотивах, а також запропоновані технічні параметри перспективних кар'єрних локомотивів. Разом з тим вважаємо за доцільне провести уточнення запропонованих характеристик з метою створення локомотиву, найбільш ефективного в умовах експлуатації у кар'єрі.

Метою роботи є оцінка технічних параметрів локомотива для електрифікованих ліній залізничного кар'єрного транспорту.

Матеріали та методи дослідження. Процедурі оцінки технічних параметрів проведемо на прикладі локомотива для ПрАТ «Полтавський ГЗК». На цьому підприємстві застосована система електричної тяги змінного струму 10 кВ, 50 Гц. На електрифікованих лініях експлуатуються тягові агрегати ОПЕ1А(М). Перевезення гірської маси здійснюються постійно сформованими складами з 14 думпкарів 2ВС105. Маса завантаженого думпкару – 156 т. Обмеження швидкості руху – 20 км/год. За результатами аналізу профілів ділянок встановлено, що розрахунковий (керівний) підйом складає близько 40%. Довжина підйому – 450 м, на підйомі розташована крива з радіусом близько 500 м. Також є ділянки із ухилом 30% довжиною 500...600 м. За технологічними умовами роботи рух поїзду від пункту перевантаження до переробного комплексу здійснюється вагонами уперед.

Розрахунки виконано відповідно [22].

Дотична сила тяги розраховується за виразом

$$F_k = \Psi_k (q_0 N_0) N_L \quad (1)$$

де Ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою відповідно до [23],

q_0 – осьове навантаження локомотива,

N_0 – кількість осей локомотива в одній секції,

N_L – кількість секцій локомотива.

Сила опору рухові визначається як

$$F_r = (N_L M_L) w_L + (N_w M_w) w_w, \quad (2)$$

де M_L – маса локомотиву, визначається за виразом $M_L = (q_0 N_0) N_L$,

w_L – питомий опір рухові локомотива,

N_w – кількість думпкарів, приймає рівною 14,

M_w – маса навантаженого думпкара, приймаємо рівною 156 т,

w_w – питомий опір рухові думпкара.

Питомий опір рухові локомотива та вагонів у загальному вигляді визначається за таким виразом

$$w = w_o + w_i + w_r + w_p + w_s + w_d \quad (3)$$

де w_o – основний питомий опір рухові,

w_i – додатковий питомий опір рухові від ухилу,

w_r – додатковий питомий опір рухові від руху у кривій,

w_p – додатковий питомий опір рухові від руху вагонами уперед.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору наведено в [24].

Розглянемо 12-ти, 16-ти та 18-ти вісні локомотиви. Результати розрахунків при різному осьовому навантаженні наведено у табл.1. Розрахункова швидкість визначається як точка перетину кривої сили опору рухові та кривої обмеження по зчепленню.

Таблиця 1. Розрахункові параметри локомотива

Найменування параметра	Величина					
Кількість осей локомотива	12	12	16	16	16	18
Навантаження на вісь, т	31,0	33,0	22,5	25,0	27,5	22,5
Сила тяги локомотива, кН	1173	1197	1162	1210	1252	1207
Розрахункова швидкість, км/год	11,5	18,4	8,6	19,7	33,4	21,4
Дотична потужність, кВт	3750	6120	2780	6620	11615	7175

Аналіз даних в табл. 1 показує, що при розрахунковій швидкості руху на керівному підйомі сила тяги становить 1173...1252 кН і змінюється несуттєво. Це обумовлено тим, що сила тяги, яка спрямована на подолання опору від ухилу, складає близько 1000 кН (85% від загального опору руху поїзда). З урахування деякого запасу доцільно прийняти за розрахункову силу тяги, рівну 1300 кН.

Водночас із табл.1 впливає, що розрахункова швидкість змінюється у широкому діапазоні – від 8,6 км/год до 33,4 км/год, внаслідок чого також змінюється дотична потужність локомотива – від 2780 кВт до 11615 кВт. Зважаючи на те, що допустима швидкість руху становить 20 км/ч, доцільним вважаємо забезпечити можливість руху поїзда на керівному підйомі зі швидкістю, близькою до максимально допустимої. Цій умові задовольняють 16-ти вісний локомотив з осьовим навантаженням не менше 25,0 т та 18-ти вісний локомотив з навантаженням 22,5 т. Дотичну потужність при цьому можна прийняти рівною 6700 кВт.

Додаткового дослідження вимагають варіант 12-ти вісного локомотива. Для локомотива з осьовим навантаженням 31 т на керівному ухилі 40 ‰ рівноважна швидкість складе 11,5 км/год при дотичній потужності 3750 кВт, а на ділянці з ухилом 30 ‰ при цій же дотичній потужності – 14,6 км/год. Тобто, внаслідок зменшення швидкості руху на ділянках з суттєвим ухилом зросте тривалість руху по них, а отже зросте і сумарний час руху на ділянці. Можливість збільшення тривалості рейсу роботи потребує додаткового узгодження.

Для 12-ти вісного локомотива з осьовим навантаженням 33 т потрібно додаткове вивчення взаємодії локомотива з інфраструктурою кар'єру в цілому.

З табл.1 видно, що для збільшення розрахункової швидкості руху необхідне збільшення осьового навантаження або кількості осей локомотива. Це пояснюється тим, що сила зчеплення при роботі на кривій по обмеженню зчеплення зменшується зі збільшенням швидкості. З іншого боку, збільшення осьового навантаження або кількості осей локомотива є доцільним з точки зору забезпечення умов стабільного водіння поїздів при зниженні коефіцієнта зчеплення.

Граничну розрахункову тягову характеристику локомотива зчіпною масою 400 т подано на рис. 2.

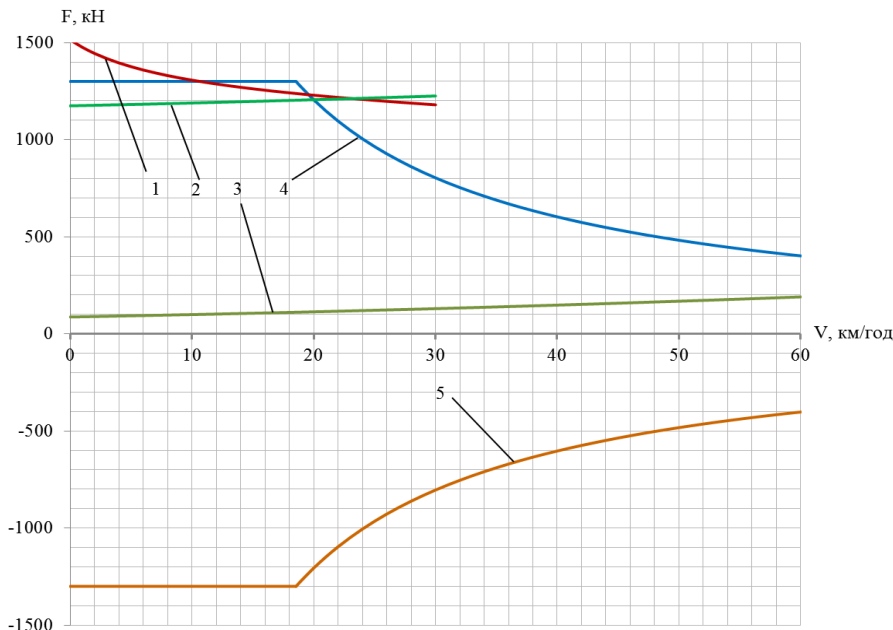


Рис. 2. Граничні тягова та гальмівна характеристики локомотива

- 1 – обмеження по зчепленню; 2 – сила опору руху на розрахунковому ухилі;
 3 – сила опору руху на горизонтальній ділянці; 4 – гранична тягова характеристика;
 5 – гранична гальмівна характеристика

При визначенні проектних показників енергоефективності кар'єрного локомотива доцільно орієнтуватися на вимоги до локомотивів магістрального транспорту. Для локомотива з асинхронним тяговим електроприводом та живленням від мережі змінного струму нормативними документами встановлюється значення коефіцієнта корисної дії не менше 0,86 при роботі у тривалому режимі з номінальною потужністю, при номінальній напрузі на струмоприймачеві при швидкості, яка відповідає тривалому режиму роботи. Величина коефіцієнта потужності повинна становити не менше 0,95 при роботі з потужністю у діапазоні 25...100 % від номінальної. Тобто вимоги по коефіцієнту потужності враховують зміну режимів роботи локомотива, а додаткових вимог до коефіцієнта корисної дії не має. Однак, аналіз експериментальних даних щодо енергоспоживання рухомого складу з асинхронним тяговим електроприводом на магістральних залізницях показує, що сумарна витрата енергії цими локомотивами для значної частини поїзної роботи більша, ніж у випадку рухомого складу з колекторними електродвигунами [25]. У більшості випадків причиною цього є саме робота локомотива, обладнаного асинхронним тяговим електроприводом, у режимах з потужністю менше номінальної. Тому вважаємо за необхідне провести дослідження режимів роботи локомотива. Це можливо виконати шляхом моделювання руху потяга.

Математична модель руху потяга як одномасової системи має вигляд

$$\begin{cases} \rho M \frac{dV}{dt} = F_L - F_R \\ \frac{dS}{dt} = V \end{cases} \quad (4),$$

де M – маса поїзда,

ρ – коефіцієнт врахування мас, що обертаються, прийнятий рівним 1,1,

V – швидкість поїзда,
 S – шлях, що пройдено,
 F_L – дотична сила (тяги або гальмування) локомотива,
 F_R – сила опору руху локомотива.

У формулі (4) прийнято, що використовується тільки електродинамічне гальмування. Приймаємо, що гранична гальмівна характеристика симетрична граничній тяговій характеристиці відносно осі абсцис. Приймаємо, що сила тяги (гальмування) може приймати будь-яке значення в області, яка обмежена граничною тяговою (гальмівною характеристикою) [26]. Інтенсивність зміни дотичної сили – 70 кН/с.

Сила опору руху визначається за виразом (2) з урахуванням (3) та рекомендацій, наведених у [24, 27, 28]. Допустима швидкість руху – 20 км/год.

Моделювання виконано для варіанта руху навантаженого локомотива-складу від пункту перевантаження до дробарної фабрики. Маса поїзда прийнята рівною 2584 т (локомотив масою 400 т та 14 думпкарів масою 156 т кожен). Результати розв'язання рівнянь руху наведено у вигляді графіків на рис. 3 та 4.

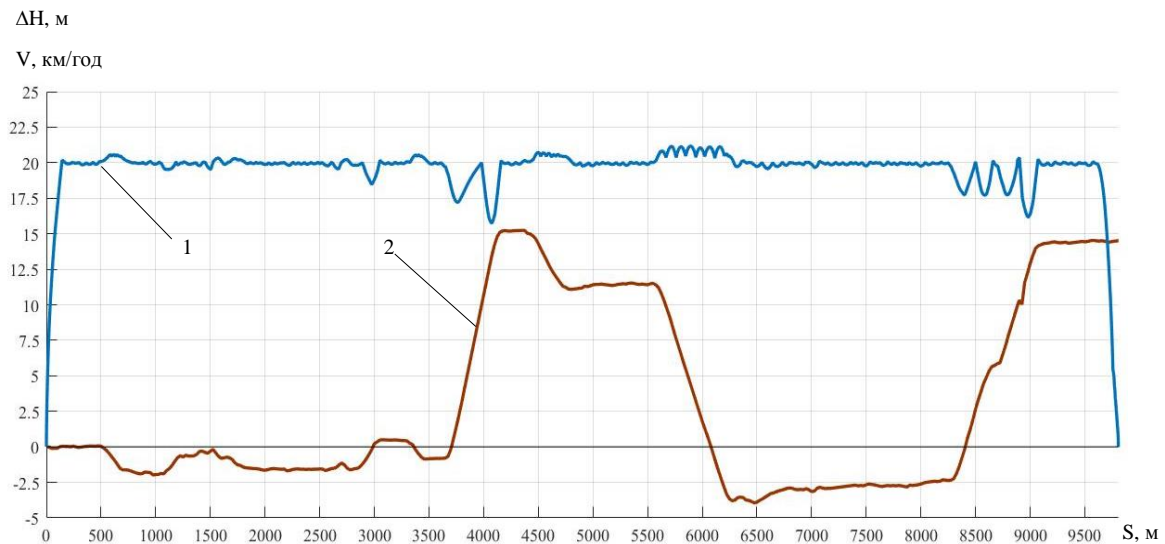
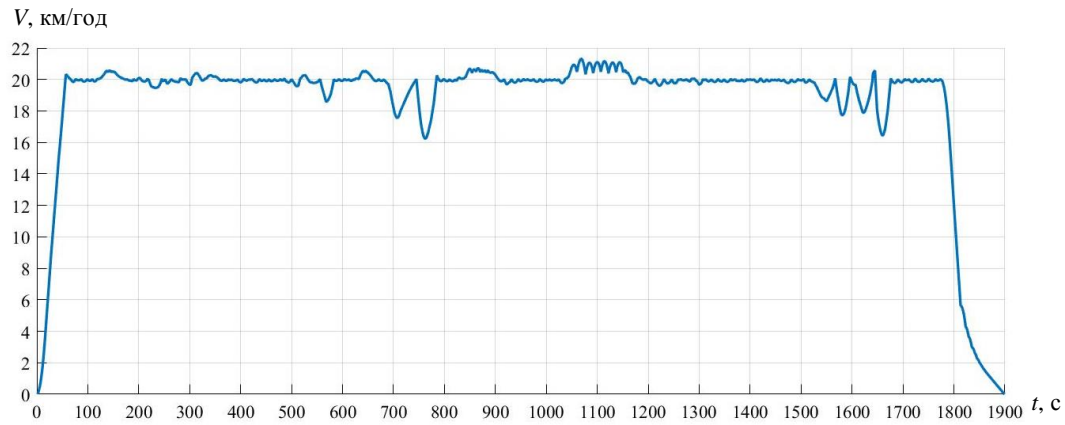


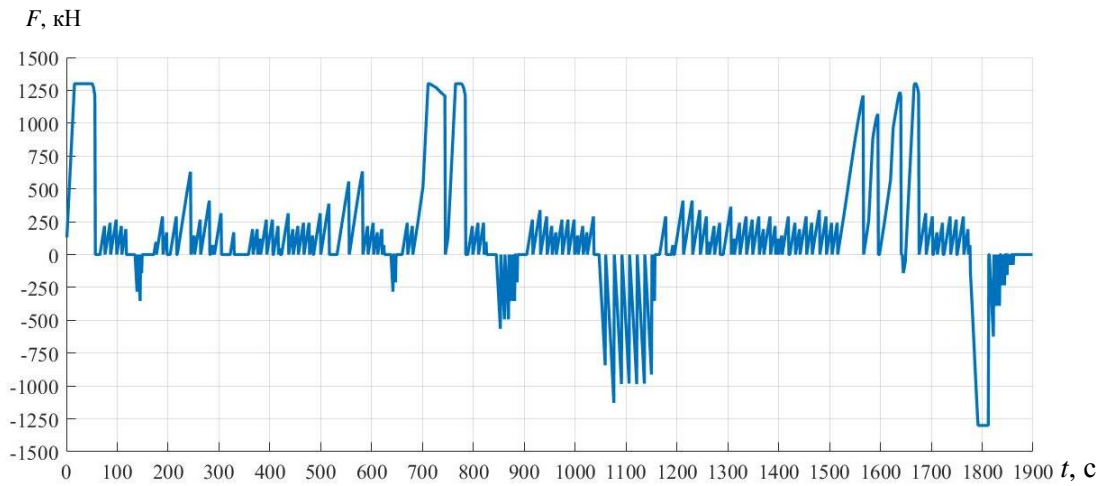
Рис. 3. Швидкість поїзда та профіль шляху
 1 – залежність швидкості руху поїзда від шляху; 2 – профіль шляху

Аналіз залежності швидкості від часу (рис. 3) показує, що поїзд практично весь шлях рухається з допустимою швидкістю. Зменшення швидкості до 16 км/год має місце на крутих підйомах та пояснюється інертністю при збільшенні сили тяги. Перевищення допустимої швидкості складає менше 1 км/год., що обумовлено алгоритмом роботи системи керування.

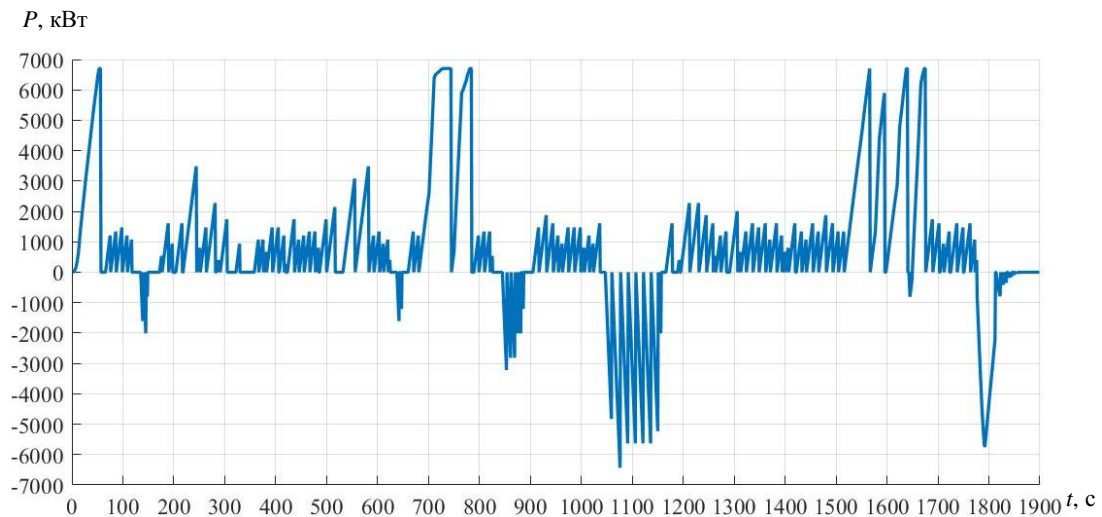
Тривалість рейсу від пункту перевантаження до дробарної фабрики становить 1900 с (31,7 хв.).



а)



б)



в)

Рис. 4. Результати тягових розрахунків

а – залежність швидкості від часу; б – залежність дотичної сили від часу;

в – залежність дотичної потужності від часу

Аналіз залежності швидкості від часу (рис. 4, а) свідчить, що поїзд практично весь час рухається з допустимою швидкістю. Зменшення швидкості до 16 км/год має місце на крутих підйомах та пояснюється інертністю при збільшенні сили тяги. Перевищення допустимої швидкості складає менше 1 км/год, що обумовлено алгоритмом роботи системи керування.

Аналіз залежності дотичної сили локомотива (рис. 4, б) свідчить, що робота на граничній тяговій характеристиці здійснюється при розгоні, під час руху на керівних підйомах та при гальмуванні. Під час руху на ділянці шляху найбільше значення дотичної сили становить близько 600 кН. При цьому найчастіше сила тяги має значення не більше 300 кН.

Аналіз залежності дотичної потужності (рис. 4, в) свідчить, що робота з розрахунковою потужністю здійснюється при розгоні, на розрахункових підйомах та при гальмуванні. Під час руху по ділянці найбільше значення дотичної потужності складає 3500 кВт. Найчастіше локомотив працює з дотичною потужністю, яка не перевищує 2000 кВт.

Варто звернути увагу, що залежності дотичної сили та дотичної потужності мають ідентичний вигляд, оскільки рух здійснюється при практично постійній швидкості.

Для більш детального аналізу режимів роботи тягового електроприводу проведено визначення параметрів його роботи у тяговій області. На рис. 5 показано розподіл швидкості та дотичної сили у тяговій області під час руху від пункту перевантаження до збагачувальної фабрики.

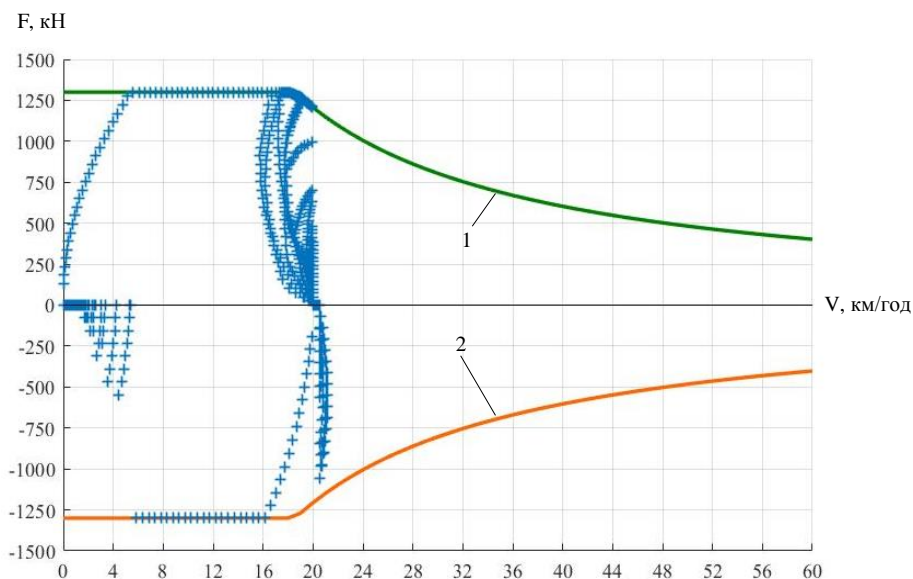


Рис. 5. Розподіл швидкості та дотичної сили у тяговій області
 1 – гранична тягова характеристика, 2 – гранична гальмівна характеристика

Для оцінки тривалості роботи виконаємо таку процедуру. Розділимо тягову область на діапазони за швидкістю та силою тяги. Чисельні значення діапазонів наведено у табл. 2. Для кожної із можливих комбінацій діапазонів визначаємо тривалість роботи електроприводу.

На рис. 6 подано графічне зображення розподілу часу у відсотках від загального часу руху по ділянці. На рис. 6 і далі на шкалі « N_V » чисельне значення вказує номер діапазону за швидкістю, на шкалі « N_F » – номер діапазону за дотичною силою. На вертикальній шкалі показано тривалість роботи у відсотках від загального часу.

Таблиця 2. Розподіл тягової області на діапазони

Номер діапазону за швидкістю	Значення швидкості у діапазоні, км/год	Номер діапазону за дотичною силою	Значення дотичної сили (по модулю) у діапазоні, кН
1	0...1	1	0...100
2	1...2	2	100...200
3	2...3	3	200...300
4	3...4	4	300...400
5	4...5	5	400...500
6	5...6	6	500...600
7	6...7	7	600...700
8	7...8	8	700...800
9	8...9	9	700...900
10	9...10	10	900...1000
11	10...11	11	1000...1100
12	11...12	12	1100...1200
13	12...13	13	1200...1300
14	13...14	–	–
15	14...15	–	–
16	15...16	–	–
17	16...17	–	–
18	17...18	–	–
19	18...19	–	–
20	19...20	–	–
21	20...21	–	–
22	21...22	–	–

Для оцінки дотичної потужності розглянемо розподіл часу роботи на прикладі руху зі швидкістю, близькою до допустимої, як найбільш тривалого режиму роботи.

Аналіз даних, за результатами яких побудовано залежності на рис. 6, показує, що тривалість роботи локомотива у режимі тяги складає 66,2 % (1258 с), у гальмівному режимі – 11,9% (227 с), у режимі вибігу – 21,9 % (415 с).

Значну частину часу локомотив працює у тяговому режимі в діапазоні зі швидкістю близько 20 км/год при значеннях сили тяги, які не перевищують 300 кН.

Тривалість роботи з силою тяги, яка відповідає максимальній на граничній тяговій характеристиці, становить 1,7% від загального часу руху.

У табл. 3 наведено розподіл часу при роботі локомотива у тяговому режимі у діапазоні швидкості 19...20 км/год, на який припадає значна тривалість роботи.

З табл. 3 випливає, що під час руху поїзда у режимі підтримання швидкості у тяговому режимі тяговий електропривід найчастіше працює з потужністю не більше 1500 кВт, що становить 22% від номінальної потужності. У режимі електродинамічного гальмування тяговий електропривід найбільш тривалий час працює з потужністю до 2500 кВт (37% номінальної) та з потужністю, близькою до номінальної.

Витрата енергії на тягу «на колесі» – 435 кВт·год, доступна для запасання енергія «на колесі» – 232 кВт·год.

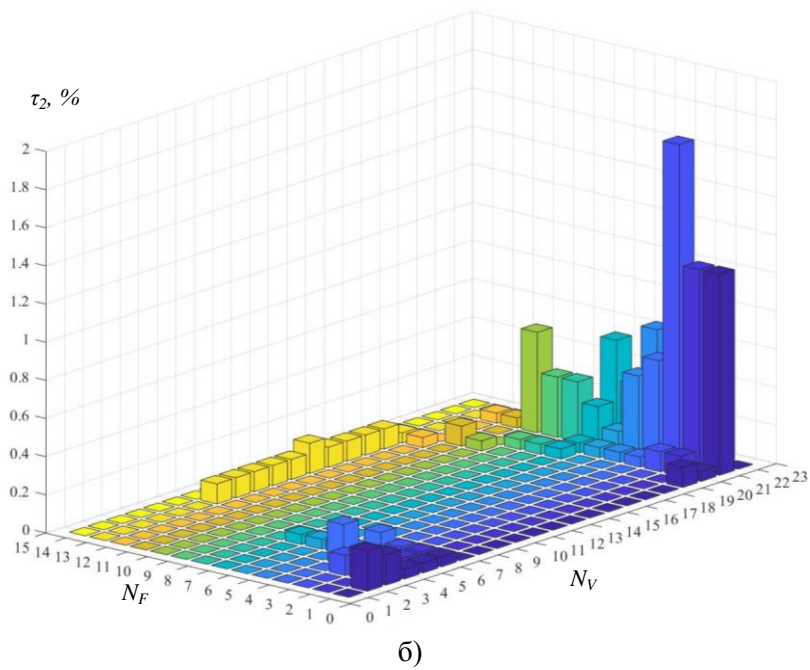
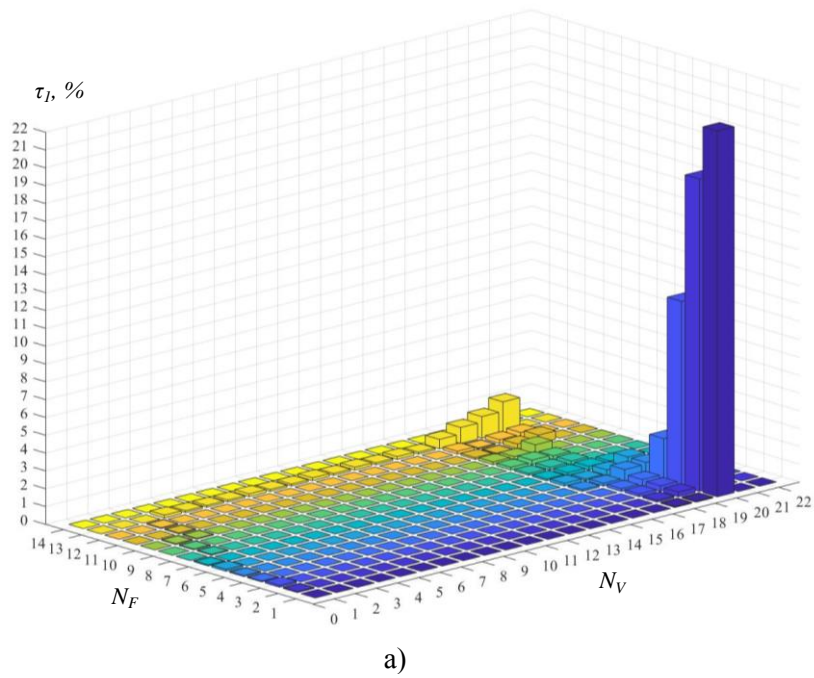


Рис. 6. Розподіл часу роботи при русі у прямому напівреїсі
а – у режимі тяги; б – у режимі електродинамічного гальмування

Таблиця 3. Розподіл часу роботи під час руху з допустимою швидкістю

Номер діапазону за дотичною потужністю	Значення потужності у діапазоні, кВт	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі тяги, %	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі гальмування, %
1	0...500	23,6	6,5
2	500...1000	27,8	6,2
3	1000...1500	19,1	6,2
4	1500...2000	4,8	5,1
5	2000...2500	1,9	8,7
6	2500...3000	1,1	3,6
7	3000...3500	0,7	4,0
8	3500...4000	0	3,2
9	4000...4500	0	5,8
10	4500...5000	0	2,9
11	5000...5500	0,2	2,5
12	5500...6000	0,4	2,5
13	6000...6500	0,4	4,0
14	6500...7000	2,6	8,7

Аналогічно вище викладеному, виконано тягові розрахунки та проведено аналіз їх результатів для випадку руху поїзда у зворотному напрямку – від дробарної фабрики до пункту перевантаження. При цьому маса порожнього думпкара прийнята рівною 52 т, рух здійснюється у спосіб «локомотив уперед». На рис. 7 подано розподіл тривалості роботи тягового електроприводу для зворотного напрямку руху – від дробарної фабрики до пункту перевантаження.

Аналіз результатів розрахунків для цього випадку свідчить, що тривалість роботи локомотива у режимі тяги складає 56,3 % (1062 с), у гальмівному режимі – 13,0% (246 с), у режимі вибігу – 30,7 % (578 с) від загального часу руху. Загальний час руху – 1887 с (31,5 хв.). Витрата енергії на тягу «на колесі» – 193 кВт·год, доступна для запасання енергії «на колесі» – 101 кВт·год

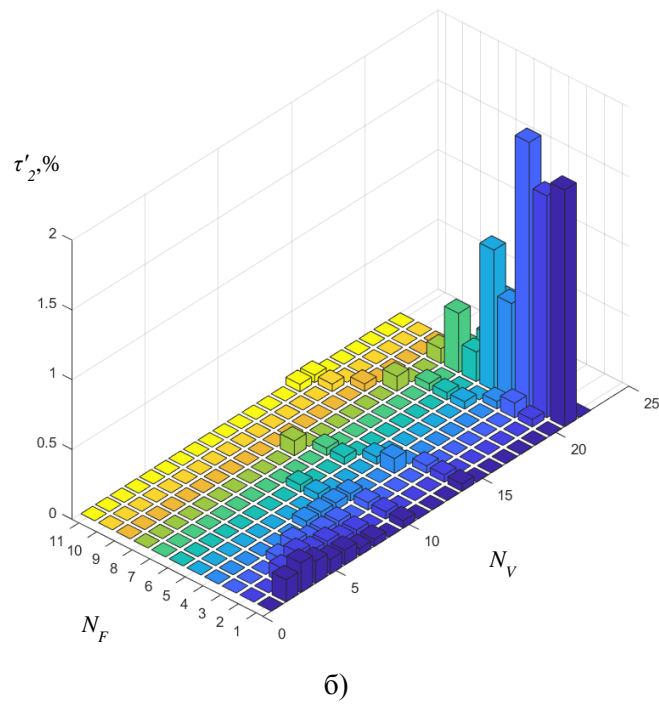
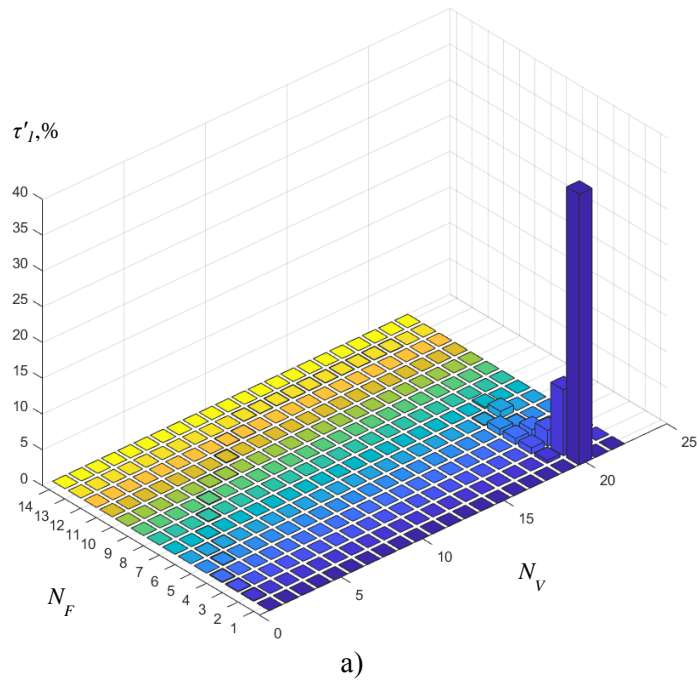


Рис. 7. Розподіл часу роботи під час руху у зворотному напівреїсі
 а – у режимі тяги, б – у режимі електродинамічного гальмування

У табл. 5 наведено дані про потужність та тривалість роботи під час руху з допустимою швидкістю.

Таблиця 5. Розподіл часу роботи під час руху у зворотному напрямку

Номер діапазону за дотичною потужністю	Значення потужності у діапазоні, кВт	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі тяги, %	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі гальмування, %
1	0...500	54,5	13,0
2	500...1000	27,2	12,6
3	1000...1500	5,0	10,5
4	1500...2000	1,9	9,3
5	2000...2500	0,7	15,4
6	2500...3000	0,9	5,6
7	3000...3500	1,1	3,6
8	3500...4000	0	2,0
9	4000...4500	0	2,8
10	4500...5000	0	–
11	5000...5500	0	–
12	5500...6000	0	–
13	6000...6500	0	–
14	6500...7000	0,1	–

З табл. 5 випливає, що під час руху поїзда у режимі підтримання швидкості у тяговому режимі тяговий електропривід найчастіше працює з потужністю не більше 1000 кВт, що становить 15% від номінальної потужності. У режимі електродинамічного гальмування тяговий електропривід найбільш тривалий час працює з потужністю до 2500 кВт (37% номінальної), а максимальна потужність у режимі електродинамічного гальмування не перевищує 4500 кВт (67% від номінальної).

Узагальнюючи результати, бачимо, що значну частину часу тяговий електропривід працює у режимі з неповним навантаженням. За результатами аналізу енергоспоживання магістральними електровозами з асинхронним приводом [25], саме це призводить до підвищеного енергоспоживання. Для усунення цього недоліка провідними виробниками тягового рухомого складу пропонуються алгоритми керування, при яких відключається частина тягових асинхронних електродвигунів [11]. Тому вважаємо доцільним при розробці тягового електроприводу застосувати такий підхід, який технічно може бути реалізований шляхом повісного або повізкового регулювання сили тяги.

Внаслідок застосування електродинамічного гальмування виникає можливість акумулювання енергії з подальшим її використанням [29, 30]. В умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК» застосування системи накопичення енергії на локомотиві забезпечить:

- запасання енергії рекуперації та її вторинне використання;
 - живлення тягового приводу під час руху на неелектрифікованих ділянках з технологічними переїздами для кар'єрних самоскидів;
 - автономний рух, зокрема без підключення бічного струмоприймача на пунктах перевантаження;
 - підтримання тягової потужності при низькому рівні напруги у тяговій мережі;
 - роботу допоміжних систем локомотиву при опущеному струмоприймачі.
- Узагальнену схему тягового електроприводу подано на рис. 8.

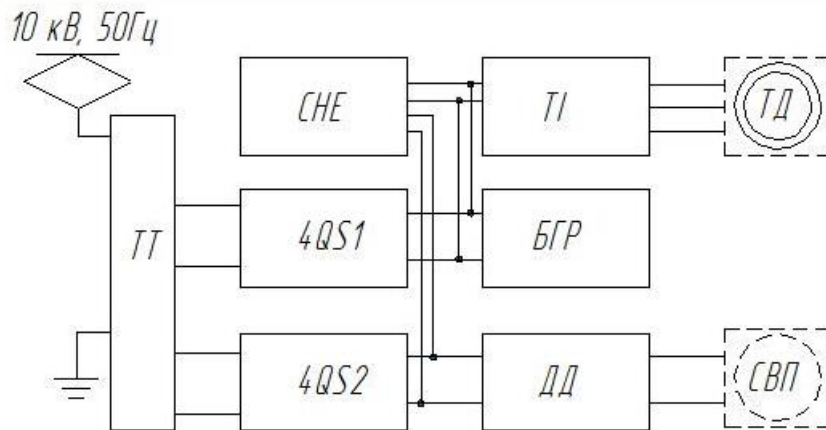


Рис. 8. Узагальнена структурна схема тягової системи локомотива

ТТ – тяговий трансформатор, СНЕ – система накопичення енергії з погоджувальними перетворювачами, 4QS1 – тягові 4QS-перетворювачі, 4QS2 – 4QS-перетворювач допоміжних систем; ТІ – тягові інвертори, ДД – допоміжні інвертори та джерела живлення, БГР – блок гальмівних резисторів, ТД – тягові асинхронні електродвигуни, СВП – споживачі власних потреб

Локомотив отримує живлення від контактної мережі змінного струму напругою 10 кВ промислової частоти. Первинна обмотка трансформатора через електричні апарати захисту приєднується до контактної мережі. Вторинні тягові обмотки трансформатора ТТ живлять тягові 4QS-перетворювачі 4QS1, вихід яких утворює проміжний контур з постійною за величиною напругою. Від проміжного контуру живляться тягові інвертори ТІ, від яких отримують живлення тягові асинхронні електродвигуни ТД. Тягова система обладнується блоком гальмівних резисторів БГР для реостатного гальмування.

Для живлення споживачів власних потреб СВП застосовано 4QS-перетворювач допоміжних систем 4QS2, до виходу якого під'єднуються допоміжні інвертори та джерела живлення ДД.

СНЕ через погоджувальні перетворювачі під'єднуються до проміжних ланок тягових інверторів та джерел живлення споживачів власних потреб. При цьому рівень напруги у проміжних ланках тягового електроприводу та системи власних потреб різний.

Таким чином, показана на рис.8 схема тягової системи забезпечить реалізацію усіх функцій, необхідних для забезпечення енергоефективності локомотиву.

Висновки. Проведено оцінку технічних параметрів локомотиву для кар'єрного залізничного транспорту. За результатами розрахунків встановлено, що 16-ти та 18-ти вісні локомотиви з осьовим навантаженням не менше 25 т задовольняють умовам поїзної роботи. Можливість експлуатації 12-ти вісних локомотивів з осьовим навантаженням 31...33 т потребує додаткового дослідження.

Для оцінки режимів роботи тягового електроприводу вирішено тягову задачу. Встановлено, що значна частина часу руху поїзда відбувається з потужністю менше номінальної. Це може привести до збільшення енергоспоживання.

З метою створення енергоефективного локомотива запропоновано застосування режимів роботи з відключенням тягових асинхронних електродвигунів та бортової системи накопичення енергії для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні. Запропоновано узагальнену схему тягової системи, яка дозволяє реалізувати вищезазначені способи підвищення енергоефективності рухомого складу.

Автори висловлюють щирю подяку директору ТОВ «Миколаївський тепловозремонтний завод» С.В. Рой за сприяння дослідженню, у тому числі за актуальну інформацію щодо реальних потреб вітчизняних підприємств гірничо-видобувної промисловості у рухомому складі та можливості аналізу результатів експлуатації модернізованого тягового агрегату ОПЕІАМ, а також влучні критичні зауваження щодо результатів дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова КМУ від 03 березня 2021 р. № 179 «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» URL: <https://www.kmu.gov.ua/npras/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179> (дата зверн.: 09.05.2022)
2. Залізний бонус: український ГМК пробивається на ринок преміальної сировини URL: <https://gmk.center/posts/zheleznyj-bonus-ukrainskij-gmk-probivaetsya-na-rynok-premialnogo-syryya/> (дата звернення: 09.05.2022)
3. За 2,5 року Ferrexpo вклала в екопроекти понад 891 млн грн.. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/za-2-5-roku-ferrexpo-vklala-v-ekoproekti-ponad-891-mln-grn/> (дата звернення: 09.05.2022)
4. Гетьман Г. К., Васильев В. Е. Анализ резервов снижения энергоемкости железнодорожных перевозок на горнодобывающих предприятиях / Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2019. № 17. С.61-67.
5. Yasuhiro N., Oishi R., Motomi S., & Takashi, K. Battery-powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook. 2017.
6. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. Proceedings of 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems). 2020. P. 158-163.
7. Xuan Liu, Kang Li. Energy storage devices in electrified railway systems: A review. Transportation Safety and Environment, Volume 2, Issue 3, September 2020, Pages 183–201, <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016>
8. Huang X., Liao, Q., Li, Q. et al. Power management in co-phase traction power supply system with super capacitor energy storage for electrified railways. Rail. Eng. Science 28. 2020. P. 85–96 <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00206-x>
9. Serhiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sydorenko. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. Computational Problems of Electrical Engineering. Lviv Politechnic Publishing House. 2019. Vol 9. No 1. P. 44–52.
10. Energy-optimized propulsion system mitrac 3000 for locomotives. Dr. E. Karl Behr. International Seminar on Emerging Technologies & Strategies for Energy Management in Railways. 2008
11. Technologies and potential developments for energy efficiency and co2 reductions in rail systems. International Union of Railways (UIC) – Paris, December 2016.
12. Солодунов А. М., Иньков Ю. М., Коваливкер Г. Н., Литовченко В. В. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. Рига: Зинатие. 1991. 352 с.
13. Jaroslav Ilonchiak, DSuboEŮ StruharmanskGS, Jozef Kuchta, Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. Procedia Engineering, Volume 192, 2017, Pages 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
14. J. Suganthi Vinodhini, R. Samuel Rajesh Babu, A Review on Various Converters Used In Dc and Ac Locomotives. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 5, 2015, pp. 13305-13325
15. Su S.; Tang T.; Wang Y. Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. Energies 2016, 9, 105. <https://doi.org/10.3390/en9020105>
16. Scheepmaker G.M.; Goverde R.M.P. The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements. J. Rail Transp. Plan. Manag. 2015. doi:10.1016/j.jrtpm.2015.10.003
17. Radu P.V.; Lewandowski M.; Szelag A. On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems-Case Study Analysis for Power Applications. Energies 2020, 13, 2013. <https://doi.org/10.3390/en13082013>
18. Urbaniak M., Kardas-Cinal E.; Jacyna, M. Optimization of Energetic Train Cooperation. Symmetry 2019, 11, 1175. <https://doi.org/10.3390/sym11091175>
19. Spiriyagin, M., Cole, C., Sun, Y.Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., & McSweeney, T. Design and Simulation of Rail Vehicles. 2014. <https://doi.org/10.1201/b17029>
20. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.
21. Браташ В.А. Тяговые агрегаты типа ОПЭА с асинхронными тяговыми двигателями для открытых горных разработок. Конструкция и параметры. Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. 2007. Вип.79. С. 93-98.
22. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Локомотивостроение». А. А. Камаев, Н. Г. Апанович, В. А. Кашев и др.; / Под ред. А. А. Камаева. М.: Машиностроение, 1981, 351 с
23. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи по електровозах ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, дизель-поїздах ДЕЛ-02, електропоїздах ЕПЛІ2Т, ЕПЛІ9Т. ЦТ-0199 : Затв. Наказ. Укрзалізниця № 206-ЦЗ від 22.12.2010 / М-во транспорту та зв'язку України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, Головне управління локомотивного господарства. К. : НВП Поліграфсервіс, 2011. 60 с.
24. Л. В. Балон, В. А. Браташ, М. Л. Бичуч и др. Электроподвижной состав промышленного транспорта: Справочник. Под ред. Л. В. Балона. М.: Транспорт. 1987.

25. Френкель, С. Я. Сравнительный анализ расхода энергоресурсов на тягу поездов электровозами ВЛ80С и БКГ1 / С. Я. Френкель, А. Г. Федоренко // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов. 2018. Ч. 1. – С. 73-75
26. Goolak, S.; Tkachenko, V.; Sapronova, S.; Lukoševičius, V.; Keršys, R.; Makaras, R.; Keršys, A.; Liubarskyi, B. 2022. Synthesis of the Current Controller of the Vector Control System for Asynchronous Traction Drive of Electric Locomotives. *Energies*, 15, 2374. <https://doi.org/10.3390/en15072374>
27. Falendish, A., Hatchenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Barybin, M. (2020). Математичне моделювання основних Параметрів в тягових розрахунках. *Транспортні системи і технології*, (35), 102-112. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
28. Слашов В.А. Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті / В.А. Слашов. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2005. 182 с.
29. Omelyanenko, V. I., Riabov, I. S., Overianova, L. V., & Omelianenko, H. V. Тяговый электропривод на основе батареи топливных элементов и бортового инерционного накопителя энергии для мотор-вагонного поезда. *Електротехніка і Електромеханіка*, (4), 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08>
30. S. Yatsko [et al.] Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage [Electronic resource] / // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. Vol. 9, № 2. P. 848-858. URL: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/9143/pdf>.

REFERENCES

1. Postanova KМУ vid 03 bereznia 2021 r. № 179 «Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku» [Resolution of the Cabinet of Ministers of March 3, 2021 № 179 "On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030"]. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-179> [in Ukrainian].
2. Zaliznyi bonus: ukrainskyi HMK probyvaietsia na rynek premialnoi syrovyny [Iron bonus: Ukrainian MMC makes its way to the market of premium raw materials]. Retrieved from <https://gmk.center/posts/zheleznyj-bonus-ukrainskij-gmk-probivaetsya-na-rynek-premialnogo-syrya/> [in Ukrainian].
3. Za 2,5 roku Ferrexpo vklala v ekoproekty ponad 891 mln hrn [Ferrexpo invested over 891 million in environmental projects in 2.5 years]. Retrieved from <https://gmk.center/ua/opinion/za-2-5-roku-ferrexpo-vklala-v-ekoproekti-ponad-891-mln-grn/> [in Ukrainian]
4. Hetman H. K., Vasylev V. E. (2019) Analiz rezervov snyzheniya enerhoemkosti zheleznodorozhnykh perevozk na hornodobyvaiushchykh predpriyatiakh [Analysis of reserves for reducing the energy intensity of rail transportation at mining enterprises] / *Elektromahnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti*, № 17, 61-67 [in Russian].
5. Yasuhiro N., Oishi R., Motomi S., & Takashi, K. (2017). Battery-powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook.
6. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Overianova L., Omelianenko H. (2020). Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *Proceedings of 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems*. (p. 158-163).
7. Xuan Liu, Kang Li. (2020). Energy storage devices in electrified railway systems: A review. *Transportation Safety and Environment*, (Volume 2), (Issue 3), (pages 183–201), <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016>
8. Huang X., Liao, Q., Li, Q. et al. (2020). Power management in co-phase traction power supply system with super capacitor energy storage for electrified railways. *Rail. Eng. Science*, (28), (p. 85–96) <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00206-x>
9. Serhiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sydorenko. (2019) Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. Lviv Politechnic Publishing House. (Vol 9, (No 1), (p. 44–52).
10. E. Karl Behr. (2008) Energy-optimized propulsion system mitrac 3000 for locomotives *International Seminar on Emerging Technologies & Strategies for Energy Management in Railways*.
11. Technologies and potential developments for energy efficiency and co2 reductions in rail systems. (2016) International Union of Railways (UIC)
12. Solodunov A. M., Ynkov Yu. M., Kovalyuker H. N., Lytovchenko V. V. (1991). Preobrazovatelnye ustroystva elektropoezdov s asynkhronnymy tiahovymy dvyhatelyamy [Converter devices for electric trains with asynchronous traction motors]. Riga: Zinatie. 352 p. [in Russian].
13. Jaroslav Ilonchiak, Subo Struharnansk, Jozef Kuchta. (2017) Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. *Procedia Engineering*, Volume 192, 2017, Pages 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
14. J. Suganthi Vinodhini, R. Samuel Rajesh Babu, A. (2015) Review on Various Converters Used In Dc and Ac Locomotives. *International Journal of Applied Engineering Research* (Volume 10), (Number 5), (pp. 13305-13325)
15. Su S.; Tang T.; Wang Y. (2016) Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. *Energies*, 9, 105. <https://doi.org/10.3390/en9020105>

16. Scheepmaker G.M.; Goverde R.M.P. (2015) The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements. *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, doi:10.1016/j.jrtpm.2015.10.003
17. Radu P.V.; Lewandowski M.; Szelag A. (2020) On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems—Case Study Analysis for Power Applications. *Energies*, 13, 2013. <https://doi.org/10.3390/en13082013>
18. Urbaniak M., Kardas-Cinal E.; Jacyna, M. (2019) Optimization of Energetic Train Cooperation. *Symmetry* 2019, 11, 1175. <https://doi.org/10.3390/sym11091175>
19. Spiriyagin, M., Cole, C., Sun, Y.Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., & McSweeney, T. (2014) Design and Simulation of Rail Vehicles. 337 p. <https://doi.org/10.1201/b17029>
20. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. (2008) Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 334 p.
21. Bratash V.A. (2007). Tiahovye ahrehaty typu OPEA s asynkhronnymy tiahovymy dvyhateliamy dlia otkrytykh hornnykh razrabotok. Konstruktsiya y parametry [Traction units of OPEA type with asynchronous traction motors for open pit mining. Design and parameters] *Girn. electromechanics and automation: Nauk.-tekh. zb.* V.79. pp. 93-98. [in Russian].
22. A. A. Kamaev, N. G. Apanovich, V. A. Kashev et al. (1981). Konstruktsiya, raschet i proektyrovanye lokomotyvov: Uchebnyk dlia studentov vtuzov, obuchaiushchysya po spetsyalnosti «Lokomotyvostroenie» [Design, calculation and design of locomotives: A textbook for students of technical universities studying in the specialty "Locomotive building"]. Ed. A. A. Kamaeva. M.: Mashinostroenie, 351 p. [in Russian].
23. Pravyla tiahovykh rozrakhunkiv dlia poiznoi roboty po elektrovozakh ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2ES5K, teplovozakh TEP150, TEM103, dyzel-poizdakh DEL-02, elektropoizdakh EPL2T, EPL9T. TsT-0199 : Zatv. Nakaz. Ukrzaliznytsi № 206-TsZ vid 22.12.2010 [Rules of traction calculations for train work on electric locomotives ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2ES5K, locomotives TEP150, TEM103, diesel trains DEL-02, electric trains EPL2T, EPL9T. CT-0199: Approved. Order. Ukrzaliznytsia № 206-TsZ dated 22.12.2010] (2011) Ministry of Transport and Communications of Ukraine, State Administration of Railway Transport of Ukraine, Ukrzaliznytsia, Main Department of Locomotive Industry. 60 p. [in Ukrainian]
24. LV Balon, VA Bratash, ML Bichuch, etc (1987). Elektropodvyzhnoi sostav promyshlennoho transporta: Spravochnyk [Electric rolling stock of industrial transport: Handbook]. Ed. L. W. Balloon. M.: Transport. [in Russian].
25. Frenkel, S. Ya. Sravnytelnyi analiz raskhoda enerhoresurov na tiahу poezdov elektrovozamy VL80S i BKH1 [Comparative analysis of energy consumption for traction of trains by electric locomotives VL80S and BKH1] *Current issues and prospects for the development of transport and construction complexes*. Part 1. (P. 73-75) [in Russian].
26. Goolak, S.; Tkachenko, V.; Sapronova, S.; Lukoševičius, V.; Keršys, R.; Makaras, R.; Keršys, A.; Liubarskyi, B. (2022). Synthesis of the Current Controller of the Vector Control System for Asynchronous Traction Drive of Electric Locomotives. *Energies*, 15, 2374. <https://doi.org/10.3390/en15072374>
27. Falendish, A., Hachenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Barybin, M. (2020). Matematychni modeliuvannia osnovnykh Parametriv v tiahovykh rozrakhunkakh [Mathematical modeling of the basic parameters in the traction calculations]. *Transport Systems and Technologies*, (35), 102-112. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11> [in Ukrainian]
28. Slashchov VA. (2005) Tiahovi ta halmovi rozrakhunky na reikovomu transporti [Traction and brake calculations on rail transport] / V.A. Slashtov. - Luhansk: SNU Publishing House. V.Dalya, 182 p.
29. Omelyanenko, V., Riabov, I., Overianova, L., et al. (2021). Tiahovi elektropryvod na osnove batarey toplivnykh elementov i bortovoho inertsyonnoho nakopytelia enerhyi dlia motor-vahonnoho poezda [Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, p. 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08> [in Russian].
30. S. Yatsko et al. (2019) Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage [Electronic resource] // *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 9, № 2. P. 848-858. URL: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/9143/pdf>.

Riabov Ievgen^{1*}, Mosin Serhiy², Overianova Liliia³, Kondratieva Liliia⁴, Demydov Oleksandr⁵, Goolak Sergiy⁶

¹ Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>

² Chief engineer of the railway plant, FERREXPO POLTAVA MINING, 16 Budivel'nykiv Street, Horishni Plavni, Poltava region, 39802, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8281-6235>

³ Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

⁴ Postgraduate student, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2788-9116>

⁵ Senior Lecturer, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0532-9748>

⁶ Assistant professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrlyivska str., Kyiv, 04071, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

EVALUATION OF TECHNICAL PARAMETERS LOCOMOTIVE FOR RAILWAY CAREER TRANSPORT

The main technical parameters of the locomotive for quarry railway transport have been evaluated. The design parameters of the locomotive have been determined and it is established that the tangential power is 6700 kW, and the traction force for the design mode is 1300 kN. The calculations of the traction characteristics of the locomotive have been performed. The procedure for determining the parameters of the locomotive operating modes during train tasks performing has been proposed, which is based on the processing of the results of traction task solving on the section of the track. It has been established that for the test section of the track a significant part of the time in the traction mode the locomotive operates with a load of 10... 25% of the nominal, therefore it has been proposed to implement the mode of movement with disconnection of traction motors. The use of an onboard energy storage system, which allows the accumulation of energy during electrodynamic braking has been proposed. The generalized scheme of traction system which allows realizing ways of increase of energy efficiency a rolling stock has been offered.

Keywords: locomotive, traction force, traction electric drive, energy efficiency.

Барибін Микола Анатолійович^{1*}

¹ Аспірант кафедри «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-7852>

* Автор, відповідальний за листування: kanifoli4.92@gmail.com

МОДЕЛЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ВИТРАТ ПАЛИВА НА ТЯГУ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ ТА РЕЙКОВИХ АВТОБУСІВ

У статті розглянуті питання визначення витрати палива на тягу дизельного моторвагонного рухомого складу парку експлуатації АТ «Укрзалізниці». Сформовані критерії оптимальності математичних моделей та розглянуто методика витрати палива на тягу поїздів. Встановлено невідповідність поточного методу вимогам адаптивності, апаратно-програмної орієнтованості, простоти використання та визначена невідповідність стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту». Графічно відображено фізичний процес витрати палива на тягу дизельним тяговим рухомим складом та методу заміщення запропонованою математичною моделлю в умовах експлуатації. Встановлено основні складові витрати палива та методи їх визначення. Запропоновано на базі закону збереження механічної енергії модель визначення витрат палива та надана вичерпна інформація по всіх складових моделі. Наведено результати розрахунку коефіцієнтів впливу та приведений перелік технічних особливостей парку експлуатації АТ «Укрзалізниці». На базі реального тягового плеча «Охтирка-Смородино» встановлено витрати палива на тягу, холостий хід та загальний об'єм спожитих енергоресурсів різними типами тягових одиниць. Графічно відображено перерахунок витрати палива на 1 пасажирів вказаного плеча обслуговування та надано рекомендації по ефективному використанню тягового рухомого складу й визначено необхідність застосування автоматизованих систем з нормування.

Ключові слова: *нормування витрат, тягові розрахунки, енергоресурси, математичне моделювання, тяговий рухомий склад.*

Вступ. Основну частину собівартості перевезень дизельним рухомим складом є витрати на енергоресурси. В умовах дорожчання паливно-енергетичних ресурсів на світових ринках виникає гостра потреба в їх ощадному використанню, пильному контролю за поточними об'ємами споживання та відповідності отриманої корисної роботи величинам якісних чи об'ємних показників роботи тягового рухомого складу. Нехтування подібними задачами призводить в дійсності не лише до підвищення тарифу перевезень, але і до зниження пасажирота вантажовідправників, конкурентоспроможності залізничного транспорту чи товарів й послуг на світових ринках, або процвітанню нечесних на руку працівників залізниць та їх поплічників. Аналіз, обробка та пошук шляхів з ощадного використання палива під впливом технічних особливостей тягового рухомого складу, властивостей профілю шляху, графіку руху, кліматичних умов та поточної технічної озброєності виробничих підрозділів чи філій - дають змогу підвищити енергоефективність, знизити показники енергоємності та встановити собівартість продукції залізниць, що є основою нормування паливно-енергетичних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для обліку об'єму використання енергоресурсів на першому етапі необхідно встановити всі сили що діють на поїзд та виконати тягові розрахунки. Безліч фахівців присвятили свої праці питанням вирішення рівняння руху поїзда під впливом зовнішніх та внутрішніх сил. Серед них виділяється праця Осипова С.І. [1], в якій сформовано підходи до визначення сил впливу та складових рівняння руху поїзда, а також підходи до формування тягово-енергетичних рівнянь та факторів впливу на них. Джерело [2] розкриває основні енергетичні характеристики та питомі сили різних типів рухомого складу. Важливим питанням споживання ресурсів на другому етапі життєвого циклу тягового рухомого складу є об'єми використання палива та віднесення їх на весь період експлуатації, що гарно сформульовано в роботах Тартаковського Е.Д., у джерелі [3] він с колегами формують концепцію впливу та пошуку шляхів вибору нового чи існуючого парку для перевезення пасажирів на базі спожитих паливно-енергетичних ресурсах. Пошук раціональних режимів ведення поїзда, створення програмних продуктів з тягових розрахунків та нормування енергоресурсів різних типів рухомого складу наведено в праці [4]. Закордонні науковці, що вивчають питання мінімізації споживання паливно-енергетичних ресурсів на базі динамічних систем адаптивного безперервного контролю характеристик рухомого складу наведено в працях [5-8]. Необхідним фактором перевізного процесу є забезпечення безпеки руху, що наведено в джерелі [9]. Надійність та безвідмовність роботи, або вплив зношеності деталей на вузлів на коефіцієнти нормоутворення розглянуто в праці [10]. Моделювання енергоспоживання під впливом профілю шляху виконано в джерелі [11]. До недоліків закордонних праць слід віднести невідповідність типів рухомого складу та особливостей експлуатації. При аналізі нормативних документів [12-14] з нормування витрат паливно-енергетичних ресурсів АТ «Укрзалізниці» виявлено необхідність розробки, корегування та заміни застарілих методик (заснованих на працях 70-х років професора Молярчука) на програмно орієнтовані та динамічно стійкі математичні моделі. Так як відсутність автоматизації при великих об'ємах обчислень призводить то встати пильності за контролем, а важкість заміни чи корегування поточних норм до перевитрат енергоресурсів [15]. Праця [15] реалізує базу до впровадження нових підходів з обчислення фактичних норм витрат ресурсів на тягу та контролю за їх споживанням на всіх рівнях АТ «Укрзалізниці». Тому вирішенням проблеми є розробка апаратно-орієнтованої та адаптивної математичної моделі з гнучкою системою корегування нормоутворюючих параметрів.

Мета і завдання дослідження. Розглянути питання визначення витрати палива на тягу дизельного моторвагонного рухомого складу та сформулювати його основні складові. Встановити поточну методика та її недоліки. Запропонувати на базі закону збереження механічної енергії математичну модель нормування витрати палива виробничими підрозділами чи філіями з врахуванням поїзних умов та особливостей парку тягового рухомого складу. Встановити критерії оптимальності та вимоги до моделі. Запропонувати адаптивну, програмно орієнтовану, інтуїтивну та відповідну стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» модель визначення величини витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів.

Матеріал та методи дослідження. В процесі експлуатації тягового рухомого складу під впливом графіку руху, заселеності вагонів пасажирами, технічних особливостей одиниць експлуатації, профілю шляху, метеорологічних умов чи інших факторів виникає потреба в забезпеченні оптимальних режимів ведення поїзду, та як наслідок економічно обґрунтованих, з точки зору енергоефективності, норм витрат палива. Для забезпечення цієї можливості необхідно використовувати ліанеризовані математичні моделі, тобто такі що мають максимальне наближення (чи співпадають в контрольних точках) до кривої оптимального використання енергоресурсів. Підтвердженням оптимальності слугує накопичений в ході експлуатації достовірний об'єм статистичних даних, доступність використання та максимальна інформативність моделі, апаратно-програмна орієнтованість та відповідність нормативним

документам, простота корегування норм та застосування до нового (чи з малим терміном експлуатації) тягового рухомого складу.

Згідно [1, 12-14] розрахунок норми витрат палива для теплотягового рухомого складу виконують за виразом:

$$n = n_0 \cdot K_w \cdot K_q \cdot K_i \cdot K_\tau \cdot K_{T.C.} + z' \cdot \Delta n_\tau + K_x \cdot n_x + n_x \cdot \Theta_c \cdot K'_x, \quad (1)$$

де n_0 – вихідні норми витрат дизельного палива, які визначаються тягово-енергетичним паспортом теплового рухомого складу, *кг/10 тис. т.км.бр*;

$K_w K_w$ – коефіцієнт, який враховує зміну опору поїзда в залежності від особливостей його формування;

$K_q K_q$ – коефіцієнт впливу ступеня використання вантажопідйомності вагонів (в даному випадку відношення статичного навантаження на вісь до 17,5 т);

$K_i K_i$ – коефіцієнт складності нормованої ділянки;

$K_\tau K_\tau$ – температурний коефіцієнт нормованого періоду;

$K_{T.C.} K_{T.C.}$ – коефіцієнт що враховує технічний стан тягового рухомого складу;

$Z' z'$ – кількість зупинок, які передбачені графіком руху поїздів на 100 *поїздо-км*;

Δn_τ – витрати електроенергії та палива на відновлення кінетичної енергії, втраченої при гальмуванні, *кг/10 тис. т.км.бр*;

$K_x K_x$ – коефіцієнт холостого ходу локомотива, виражений відношенням часу холостого ходу до загального часу руху поїзда;

$K'_x K'_x$ – коефіцієнт холостої роботи дизеля, виражений відношенням часу роботи дизеля за добу до загальної тривалості стоянок;

$n_x n_x$ – витрати дизельного палива на холостий хід при $K_x = 1 K_x = 1$;

$\Theta_c \Theta_c$ – коефіцієнт стояночного часу, як відношення часу зупинок, передбачених розкладом руху, до загального часу руху поїзда.

Вираз (1) для моторвагонного рухомого складу має ряд недоліків серед яких слід відмітити:

відсутність тягово-енергетичних паспортів в моторвагонних виробничих підрозділах чи філіях, складність їх отримання без всебічних випробувань рухомого складу, низька достовірність отриманих значень при зміні умов експлуатації чи при зміні складності (кількості головних, причіпних та моторних вагонів);

статистична ненапрацьованість та неможливість загального узагальнення по серіям коефіцієнта що враховує технічний стан тягового рухомого складу;

неможливість теоретичного встановлення коефіцієнту холостого ходу дизельного моторвагонного рухомого складу;

важкість реалізації на електронно-обчислювальній техніці та програмна непристосованість тягово-енергетичних паспортів;

невідповідність вимогам ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту», як основоположного документу робітників з енергоменеджменту;

складність роботи для машиністів інструкторів з теплотехніки та іншого персоналу відділів пов'язаних з ресурсозбереженням та нормуванням.

Через це всі моторвагонні депо використовують статистичний метод нормування що має недоліки у важкості застосування та великого об'єму статистичної інформації. Враховуючи вище зазначене було запропоновано ергономічну, програмно орієнтовану, інтуїтивно зрозумілу та таку що може враховувати особливості технічної експлуатації окремої одиниці тягового

рухомого складу при зміні якісних чи об'ємних показників математичну модель. Графічне відображення фізичного процесу витрати палива на тягу дизельним моторвагонним рухомих складом та методу заміщення запропонованою моделлю в умовах експлуатації зображено на рис. 1.

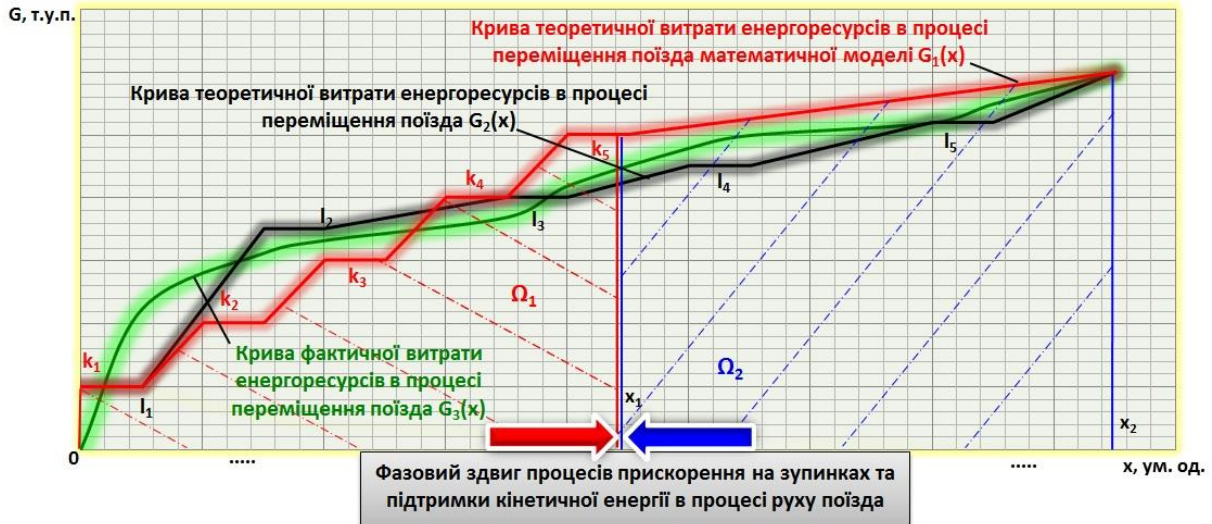


Рис. 1. Графічне відображення фізичного процесу витрати палива на тягу дизельним моторвагонним рухомих складом та методу заміщення запропонованою математичною моделлю в умовах експлуатації

Фізична суть процесу заміни кривої фактичної витрати енергоресурсів при переміщенні поїзда $G_3(x)$ на теоретичну $G_2(x)$ полягає у поділі першої на кускові відрізки l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 (як таких що відповідають витратам палива на відновлення кінетичної енергії при зупинках поїзда на станціях чи зупиночних пунктах) та проміжки між ними (що відповідають витратам на подолання сил опору руху та накопичення чи дисипацію потенційної енергії). Наступним кроком є об'єднання однотипних за змістом та середніх за швидкістю витрат палива у вигляді теоретичної кривої $G_1(x)$ витрат енергоресурсів в процесі переміщення поїзда. При цьому величини кускових відрізків k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 мають однакове значення ($k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = const$) що відповідає величині $\frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{5}$. Проміжок $[x_1, x_2]$ кривої $G_1(x)$ відповідає витратам палива на підтримання середньої швидкості руху поїзда, в той же час проміжок $[0, x_1]$ на відновлення кінетичної енергії. Тоді витрати енергії на виконання корисної роботи з переміщення рухомого складу є сума площин Ω_1 та Ω_2 утворених віссю абсцис та кривою $G_1(x)$, що має вид інтегрального виразу:

$$G = \int_0^{x_1} \Omega_1(x) \cdot dx + \int_{x_1}^{x_2} \Omega_2(x) \cdot dx, \quad (2)$$

де Ω_1, Ω_2 – відповідно площа криволінійних фігур витрат палива на відновлення кінетичної енергії та подолання сил опору й врахування потенційного впливу профілю, *ум.од.*;

x_1, x_2 – відповідно хронометричні величини фаз здвигу процесів прискорення на зупинках та підтримки кінетичної енергії в процесі руху поїзда, *ум.од.*

Розглянемо другий інтеграл виразу (2) – за своєю суттю кількість енергії яку необхідно використати для підтримки середньої швидкості є сумою кінетичної та потенційної енергії та є законом збереження енергії, тоді рівняння (2) буде мати вид:

$$\int_{x_1}^{x_2} \Omega_2(x) \cdot dx = m \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \right), \quad (3)$$

де V_1, V_2 – відповідно швидкості на початку та в кінці розглянутого елемента, *м/с*;

h_1, h_2 – відповідно висоти на початку та в кінці розглянутого елемента, *м*;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

m – маса поїзда, *кг*.

З іншого боку права частина виразу (3) є величина необхідної механічної енергії, тоді використавши 2-й закон Ньютона вираз буде мати вид:

$$m \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \right) = m \cdot a \cdot S, \quad (4)$$

де a – прискорення руху, *м/с²*;

S – довжина ділянки переміщення, *м*.

Згідно [1] прискорення руху – це є добуток коефіцієнту питомого прискорення та алгебраїчної суми сил що діють на поїзд, тоді рівняння прийме вигляд:

$$m \cdot \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(h_2 - h_1) \right) = m \cdot \xi \cdot S \cdot (f_k - \varpi - b_T), \quad (5)$$

де ξ – коефіцієнт питомого прискорення, $\frac{\text{м/с}^2}{\text{Н/кН}}$;

f_k, b_T, ϖ – відповідно питомі сили тяги, гальмівні та сили опору руху, *Н/кН*.

У рівнянні питомих сил опору в якості застосованої швидкості слід використовувати величину відношення пройденого шляху до часу без врахування часу понад нормованого простою (стоянки поїзда на станції чи в зупиночному пункті понад 1 хвилину) – для запобігання заниження норми при фактично більших питомих силах руху.

З іншого боку витрати палива на тягу моторвагонним рухомим складом можливо розділити на складові виразу:

$$G = G_T + G_{x.x.}, \quad (6)$$

де $G_T, G_{x.x.}$ – відповідно витрати палива в режимах тяги та на холостому ході, *кг*.

Тягові витрати можливо розділити на складові витрат енергоресурсів необхідних для прискорення поїзда та підтримки середньої швидкості руху, що має вид:

$$G_T = G_K + G_{II}, \quad (7)$$

де G_K, G_{II} – відповідно витрати палива для прискорення поїзду та підтримки середньої швидкості руху рухомого складу, кг.

У загальному вигляді витрата енергоресурсів для підтримки середньої швидкості руху одиниці експлуатації є інтегралом функції питомої витрати палива протягом часу чи шляху, що за фізичним змістом є значенням відповідної інтегральної площі на коефіцієнт ефективності (λ) перетворення енергії силової установки та передачі ($\frac{g}{k_{ef}}$) потужності й фізичного вимірника (1 Дж = 0,278·10⁻⁶ кВт·год) перетворення енергії при сталих значеннях вимірників тягових розрахунків (кілометрах та тонах). Тоді вираз для G_{II} буде мати вид:

$$G_{II} = \int_0^S g(S) \cdot dS = \lambda \cdot \int_{x_1}^{x_2} \Omega_2(x) \cdot dx = \frac{m \cdot \xi \cdot 0,278 \cdot \varpi \cdot g \cdot S}{k_{ef}}, \quad (8)$$

де g – питома витрата палива дизелем на максимальній потужності, кг/кВт·год;

k_{ef} – середньозважений коефіцієнт корисної дії дизель-поїзду чи рейкового автобусу на обраному плечі обслуговування, %;

0,278 – перевідний коефіцієнт.

Відокремимо довжину ділянки переміщення S з виразу (8), що є середньозваженою витратою палива на проходження 1 кілометру шляху (далі g') та визначається виразом:

$$g' = \frac{m \cdot \xi \cdot 0,278 \cdot \varpi \cdot g}{k_{ef}}, \quad (9)$$

Дана витрата палива g' повинна відповідати вимогам зміни поїзних обставин, аналогічне виразу (1), серед яких актуальними для моторвагонного рухомого складу є вплив температурних умов, профілю шляху, зустрічного чи бокового вітру та технічного стану одиниці експлуатації. Оскільки параметр технічного стану вже закладений за фізичною суттю в середньозважений коефіцієнт корисної дії k_{ef} у вигляді зменшення чи збільшення, то вираз (9) для обчислення середньозваженої витрати палива на проходження 1 кілометру шляху g' буде мати вид:

$$g' = \frac{m \cdot \xi \cdot 0,278 \cdot \varpi \cdot g}{k_{ef}} \cdot k_{тем} \cdot k_i \cdot k_{вітру}, \quad (10)$$

де $k_{тем}, k_i, k_{вітру}$ – відповідно коефіцієнти впливу температури оточуючого середовища, профілю шляху та зустрічного чи бокового вітру.

Аналіз технічного забезпечення станцій, роз'їзних пунктів чи вузлів або одиниць експлуатації моторвагонних депо чи філій вказує на відсутність анемометрів та флюгерів на

мережі АТ «Укрзалізниця»; в свою чергу без достовірних даних використання коефіцієнту впливу зустрічного чи бокового вітру $k_{вітру}$ не є можливим, тому $k_{вітру} = 1$. Зміну параметру вітрового потоку пропонується враховувати на базі середньозваженого коефіцієнту корисної дії $k_{еф}$ упродовж нормованого періоду.

Аналіз джерел [1-2, 12-15] та статистичної інформації по впливу температури оточуючого середовища вказує на необхідність (для виконання умови апаратно-програмної орієнтованості та зручності використання) перетворення статистичних даних та табличних даних з [12-15] з допустимою похибкою до формульного виразу виду:

$$k_{мем} = a' + b' \cdot t^0, \quad (11)$$

де a', b' – невідомі коефіцієнти рівняння;

t^0 – температура оточуючого середовища, $^{\circ}C$.

Тоді знаходження невідомих коефіцієнтів a' і b' зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$\begin{cases} a' \cdot \sum_{i=1}^n t_i^0 + b' \cdot \sum_{i=1}^n t_i^0 = \sum_{i=1}^n k_{мем_i} \\ a' \cdot \sum_{i=1}^n t_i^0 + b' \cdot n = \sum_{i=1}^n k_{мем_i} \end{cases}, \quad (12)$$

В ході обчислень методом Крамера були отримані невідомі коефіцієнти a' і b' . Середня похибка склала $\Delta = 0,12\%$, а вираз для $k_{мем}$ має вид:

$$k_{мем} = -0,0043 \cdot t^0 + 1,0648, \quad (13)$$

Використаємо вираз з джерел [1, 12-13] для обчислення коефіцієнту впливу профілю шляху на моторвагонний рухомий склад, що має вид:

$$k_i = 1 + C_a \cdot (i_e - \Delta i_i), \quad (14)$$

де C_a – коефіцієнт, що визначається залежно від швидкості руху;

i_e – еквівалентний ухил, %;

Δi_i – величина відносної роботи сил інерції поїзда, %.

Значення C_a , як сказано вище, залежить від швидкості, тому аргументом є саме вона, тому приведемо його до формульного виду. Статистичні дані для обчислень отримані з аналізу статистики моторвагонних депо та інформації з джерел [1, 12-13]. Порядок поліному та тип рівняння визначалось на базі отриманої похибки обчислень, найменша з яких належить поліному 3-го порядку виду:

$$C_a = a'' \cdot V^3 + b'' \cdot V^2 + c'' \cdot V + d'', \quad (15)$$

де a'', b'', c'', d'' – невідомі коефіцієнти рівняння.

Тоді знаходження невідомих коефіцієнтів a'', b'', c'', d'' зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$k_{\text{мехм}} = \begin{cases} a'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^6 + b'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^5 + c'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^4 + d'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 = \sum_{i=1}^n V_i^3 C_{a_i} \\ a'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^5 + b'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^4 + c'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 + d'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 = \sum_{i=1}^n V_i^2 C_{a_i} \\ a'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^4 + b'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 + c'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 + d'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n V_i C_{a_i} \\ a'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 + b'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i^2 + c'' \cdot \sum_{i=1}^n V_i + d'' \cdot n = \sum_{i=1}^n C_{a_i} \end{cases}, \quad (16)$$

В ході обчислень методом Гауса були отримані невідомі коефіцієнти a'', b'', c'', d'' . Середня похибка склала $\Delta = 0,23\%$, а вираз для C_a має вид:

$$C_a = 10^{-5} \cdot (0,054 \cdot V^3 - 9,5 \cdot V^2 + 233 \cdot V) + 0,343, \quad (17)$$

Величина відносної роботи сил інерції поїзда Δi_i згідно [1, 12-13] в залежить лише від еквівалентного ухилу i_e . Тоді приведемо його до формульного виду на базі інформації з джерел [1, 12-13] та за найменшою похибкою (отриманої при обчисленнях) визначимо його як поліном 3-го порядку виду:

$$\Delta i_i = a''' \cdot i_e^3 + b''' \cdot i_e^2 + c''' \cdot i_e + d''', \quad (18)$$

де a''', b''', c''', d''' - невідомі коефіцієнти рівняння.

Тоді знаходження невідомих коефіцієнтів a''', b''', c''', d''' зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$k_{\text{мехм}} = \begin{cases} a''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^6 + b''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^5 + c''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^4 + d''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^3 = \sum_{i=1}^n i_e^3 \Delta i_i \\ a''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^5 + b''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^4 + c''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^3 + d''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^2 = \sum_{i=1}^n i_e^2 \Delta i_i \\ a''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^4 + b''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^3 + c''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^2 + d''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e = \sum_{i=1}^n i_e \Delta i_i \\ a''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^3 + b''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e^2 + c''' \cdot \sum_{i=1}^n i_e + d''' \cdot n = \sum_{i=1}^n \Delta i_i \end{cases}, \quad (19)$$

В ході обчислень методом Гауса були отримані невідомі коефіцієнти a''', b''', c''', d''' . Середня похибка склала $\Delta = 0,34\%$, а вираз для Δi_i має вид:

$$\Delta i_i = 0,0027 \cdot i_e^3 - 0,0615 \cdot i_e^2 + 0,0914 \cdot i_e + 0,1944, \quad (20)$$

Виконаємо класичну фізичну перевірку вірності отриманого вимірника виразу (8):

$$\frac{m \cdot \frac{м}{с^2} \cdot \frac{Н}{кН} \cdot км \cdot \frac{кг}{кВт \cdot год}}{\frac{Н}{кН}} = \frac{Дж \cdot кг \cdot 10^6}{кВт \cdot год} = \frac{2,78 \cdot 10^{-7} кВт \cdot год \cdot кг \cdot 10^6}{кВт \cdot год} = кг, \quad (21)$$

Перший інтеграл виразу (2) – за своєю суттю це кількість енергії яку необхідно використати для відновлення кінетичної енергії витраченої на зупинку поїзда:

$$G_K = \int_0^{x_1} \Omega_1(x) \cdot dx, \quad (22)$$

У загальному вигляді витрата енергоресурсів для відновлення кінетичної енергії витраченої на зупинку поїзда є інтегралом функції питомої витрати палива протягом часу чи шляху, що за фізичним змістом є значенням відповідної інтегральної площі на коефіцієнт ефективності (λ) перетворення енергії силової установки та передачі ($\frac{g}{k_{ef}}$) потужності й фізичного вимірника (1 Дж = 0,278•10⁻⁶ кВт•год) перетворення енергії при сталих значеннях вимірників тягових розрахунків (кілометрах та тонах) на кількість зупинок протягом шляху прямування. Тоді вираз для G_K буде мати вид:

$$G_K = \lambda \cdot \int_0^{x_1} \Omega_1(x) \cdot dx = \int_0^S g(S) \cdot dS = \frac{n_3 \cdot m \cdot \xi \cdot 0,278 \cdot \varpi \cdot g \cdot S}{k_{ef}}, \quad (23)$$

де n_3 – кількість зупинок на шляху прямування дизельного моторвагонного рухомого складу від пункту відправлення до пункту призначення, *шт*.

Як було сказано вище та продемонстровано на рисунку 1, величини кускових відрізків k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 мають однакове значення ($k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = const$), величина середнього прискорення зафіксована на рівні (встановлено дослідним шляхом на базі аналізу швидкістемірних стрічок та особистого спілкування з локомотивними бригадами) 60 км/год, тобто величина витрат на відновлення кінетичної енергії в математичній моделі є *const*. Тоді праву складову виразу (23) представимо у вигляді витрати енергії на прискорення до 60 кг/год 1 тони тягового рухомого складу (врахування впливу поїзних умов не було по причині їх попередньої фіксації у вимірник G_{II}), що є за фізичною суттю виразом:

$$\frac{\xi \cdot 0,278 \cdot \varpi \cdot S}{k_{ef}} \cong \frac{P_e}{m} = \frac{(P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n)}{m \cdot \sum_{i=1}^n t_i}, \quad (24)$$

де P_e – середня ефективна потужність експлуатованої одиниці, кВт•год;

P_1, P_2, \dots, P_n – величини ефективної споживаної потужності експлуатованої одиниці, кВт•год;

$t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$ – час роботи на відповідній споживаній потужності, год;

n – кількість режимів роботи, шт.

Вірність вказаного виразу перевіримо фізично на предмет відповідності одиниць:

$$\frac{\frac{m}{c^2} \cdot \frac{H}{\kappa H} \cdot m \cdot 10^6}{\frac{H}{\kappa H}} = \frac{m^2 \cdot 10^6}{c^2} = \frac{2,78 \cdot 10^{-7} \kappa Bm \cdot 200 \cdot 10^6}{m}, \quad (25)$$

Структуруємо ліву частину рівняння (24) та представимо у вигляді коефіцієнта, тоді вираз для обчислення кількості енергії яку необхідно використати для відновлення кінетичної енергії витраченої на зупинку поїзда G_K буде мати вид:

$$G_{II} = n_3 \cdot k_3 \cdot g \cdot P_{3ч}, \quad (26)$$

де k_3 – коефіцієнт жорсткості розгінних процесів, $\kappa Bm \cdot 200 / T$;

$P_{3ч}$ – зчїпна вага сформованого дизель-поїзду чи рейкових автобусів, т.

Вірність виразу (26) перевіримо фізично на предмет відповідності одиниць:

$$\frac{\kappa 2}{\kappa Bm \cdot 200} \cdot m \cdot \frac{\kappa Bm \cdot 200}{m} = \kappa 2, \quad (27)$$

Заміна маси моторвагонного рухомого складу m на зчїпну вагу $P_{3ч}$ має на меті приведення до стандартних позначок правил тягових розрахунків. При цьому врахуємо також заселеність вагонів пасажирами та їх речами, відобразивши їх у вигляді $P_{3ч} + 10 \cdot n_6$ замість m виразу (10), проте у впливі кількості палива для компенсації кінетичної енергії на зупинках залишимо лише $P_{3ч}$. Причиною вказаних маніпуляцій слугує специфіка транспорту: посадка-висадка пасажирів у вагони, та врахування їх у витратах на запобігання дисипації енергії в процесі руху. Тоді вираз (10) буде мати вид:

$$g' = \frac{(P_{3ч} + 10 \cdot n_6) \cdot \xi \cdot 0,278 \cdot \varpi \cdot g}{k_{эф}} \cdot (-0,0043 \cdot t + 1,0648) \cdot k_i, \quad (28)$$

де n_6 – кількість вагонів у складі дизель-поїзда чи рейкових автобусів, шт..

Одночасно з цим, для можливого уникнення завищення норми витрати на тягу внаслідок «недовантаження» пасажирами з багажем чи перевантаження населеності вагонів, застосуємо коефіцієнт впливу заселеності дизель-поїзда чи рейкового автобуса. Також врахуємо додаткові витрати палива, пов'язані з відновленням графіка руху через зупинки (при зупинці час на подолання тягового плеча зростає та виникає потреба збільшувати середню швидкість руху що в свою чергу збільшує витрату палива) та понаднормовий простій на станціях чи зупиночних пунктах (витрати палива пов'язані з нагоном часу ходу), у вигляді відсоткового збільшення витрати палива. Вірність вказаних тверджень підтверджується дослідною експлуатацією в моторвагонному депо «Сватово», «Люботин» та локомотивному депо «Київ-Пасажирський». Тоді вираз для обчислення загальних витрат палива має вид:

$$G = \frac{k_H \cdot (S \cdot g' + n_3 \cdot k_3 \cdot g \cdot P_{3ч}) \cdot (t + n_3 \cdot 1 \text{ хв} + \Delta n_3)}{t} + g_{x.x.} \cdot t_{x.x.}, \quad (29)$$

де k_H – коефіцієнт заповнення вагонів пасажирами (для малонаселених поїздів – 0,95; середньозаселених – 1 та сильнозаселених – 1,05);

t – час на подолання відстані від пункту відправлення до кінцевого призначення, хв;

$g_{x.x.}$ – норма витрати палива дизелем на холостому ході, кг/хв;

$t_{x.x.}$ – час роботи дизеля на холостому ходу (визначається на основі тягових розрахунків, контрольно-інструкторських та дослідних поїздок), хв;

n_3 – кількість зупинок на шляху прямування електропоїзда від пункту відправлення до пункту призначення, шт;

Δn_3 – час понаднормового простою (у випадку тривалості зупинки понад 1 хвилину), хв;

1 хв. – час на зупинку поїзда (встановлена середня величина на базі хронометражу).

Результати розрахунків за тяговими характеристиками моторвагонного рухомого складу АТ «Укрзалізниці» отримаємо значення величин необхідних коефіцієнтів та зведемо їх разом з паспортними характеристиками до таблиці 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків та деякі паспортні дані дизельного моторвагонного рухомого складу АТ «Укрзалізниці»

Тип рухомого складу	Питома витрата палива дизелем g , кг/кВт•год	Питома витрата на холостому ході $g_{x.x.}$, кг/год	Потужність силової установки P , кВт	Середньозважений ККД k_e , %	Коефіцієнт жорсткості розгінних процесів, %
Д1	0,22862	8,4	538	0,508	0,04995
ДР1А	0,21467	8,4	736	0,508	0,04939
ДЕЛ-02	0,21505	3	505	0,514	0,04485
РА620М MTU	0,22	2,8	315	0,535	0,04186
РА620М MAN	0,2199	3,1	382	0,535	0,04186
630М	0,2199	5,6	382	0,535	0,04186
РА2	0,218	2,8	1400	0,535	0,04186
ДПЛ-1	0,31956	25,2	1470	0,501	0,04995
ДТЛ-1	0,31956	25,2	1470	0,501	0,04995
ДПКР-2	0,21795	4,2	390	0,535	0,04485
ДПКР-3	0,20918	8	588	0,535	0,04485

Оскільки час роботи на холостому ході є динамічний параметр та залежить від особливостей експлуатації та поточних вимог графіка руху – було запропоновано обчислювати його як частину від загального часу, відсоток якого є відношення загальних витрат палива до витрат палива на номінальному режимі роботи. При цьому генеруюча спроможність силових установок враховується на рівні найменшої з силового обладнання складальної одиниці, а при наявності декількох силових агрегатів необхідно привести складову $g_{x.x.} \cdot t_{x.x.}$ виразу (29) до множини на їх кількість. Тоді вираз для обчислення часу холостого ходу буде мати вигляд:

$$t_{x.x.} = t \cdot \left(1 - \frac{k_H \cdot (S \cdot g' + 0,74 \cdot g \cdot P_{34}) \cdot (S + n_3 + \Delta n_3)}{t \cdot P \cdot g} \right), \quad (30)$$

де P – максимальна генеруюча спроможність силової установки (у випадку декількох дизелів – потужність визначається як величина найменшої з потужностей всіх енергетичних установок), кВт•год.

Практична апробація математичної моделі визначення витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів здійснювалась на базі тягового плеча Охтирка-Смородино для різних

типів рухомого складу. Поїзні умови визначені як: середньозавантажений дизельний моторвагонний рухомий склад, відстань 38 км, тип колії стиковий, час подолання відстані згідно графіка руху 1 год. 12 хв., еквівалентний ухил 1,115 ‰), кількість проміжних зупинок на шляху прямування 6 (час понаднормового простою по платформі Кіріковка – 20 хв.), температура повітря -25 °С, одночасно працюють усі дизелі. Результати розрахунків зведені до таблиці 2. В результаті перерахунку витрати палива на 1 пасажир наведено на рис. 2.

Таблиця 2. Результати розрахунків та деякі паспортні дані дизельного моторвагонного рухомого складу на тяговому плечі Охтирка-Смордино

Тип рухомого складу	Зчїпна вага $P_{зч}$, т	Коефіцієнт питомого прискорення ξ , $\frac{m/c^2}{H/\kappa H}$	Витрати палива на тягу G_T , кг	Витрати палива на х.х. $G_{х.х.}$, кг	Загальні витрати G , кг
Д1	210	0,00895	100,35	6,45	106,8
ДР1А	174		79,35	11,72	91,07
ДЕЛ-02	218		90,40	2,21	92,61
РА620М MTU	51		27,86	2,23	30,09
РА620М MAN	52		28,37	2,67	31,04
630М	204		55,72	6,01	61,73
РА2	125		59,10	5,64	64,74
ДПЛ-1	318		204,91	19,25	224,16
ДТЛ-1	438		294,84	28,85	323,69
ДПКР-2	188,9		102,59	10,05	112,64
ДПКР-3	190,9		104,16	5,65	109,81

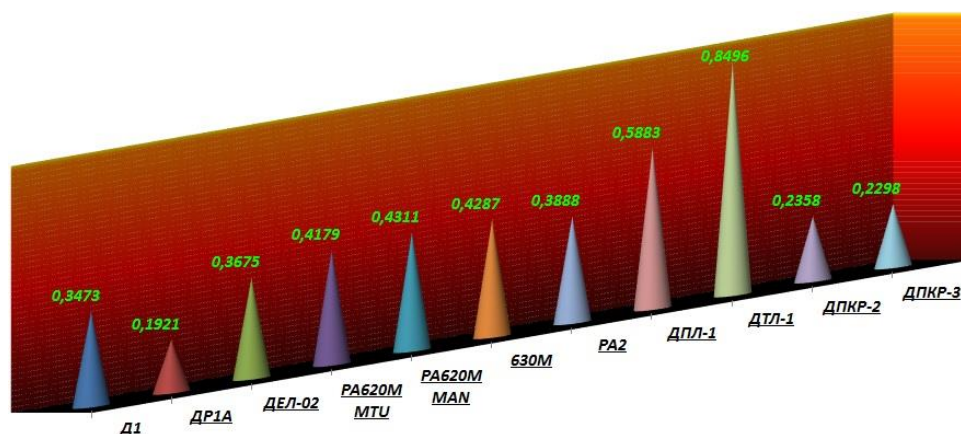


Рис. 2. Графічне відображення перерахунку витрати палива на 1 пасажир плеча обслуговування Охтирка-Смордино парку експлуатації АТ «Укрзалізниця»

Найбільш енергоефективним, з точки зору витрати на 1 пасажир (при середній завантаженості), є дизель-поїзд ДР1А, що і знаходиться в поточній експлуатації на плечі.

Висновки. Розглянуто питання визначення витрати палива на тягу дизельного моторвагонного рухомого складу та сформовано його основні складові. Встановлено поточну методуку та її недоліки. Запропоновано на базі закону збереження механічної енергії

математичну модель нормування витрати палива виробничими підрозділами чи філіями з врахуванням поїзних умов та особливостей парку тягового рухомого складу. Встановлено критерії оптимальності та вимоги до моделі. Запропоновано адаптивну, програмно орієнтовану, інтуїтивну та відповідну стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» модель визначення величини витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів. В подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та перевести запропоновану модель в програмний продукт для встановлення раціональних норм на ведення поїзда, пошуку зниження ресурсів на тягу та масової практичної апробації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей жеззнодорожного транспорта Москва: УМК МПС России, 2010. 592 с.
2. Rafael Barrientos, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua Railway ecology. Springer International Publishing, 2017, pp. 337
3. Тартаковский Э.Д., Фалендыш А.П., Калабухин Ю.Е., Грищенко С.Г. Оценка жизненного цикла // Локомотив-информ: научный журнал. 2013, №2 (80). С.56-60.
4. Barybin M., Falendysh A., Hatchenko V., Kletska O., Kiritseva E. Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). Volume 1021, February 2021, pp 1-8.
5. Fu Q, Zhu J, Mao Z, Zhang G, Chen T. Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 65(4), April 2018, pp 3499-3508.
6. Safna F., SunnyR. Artificial Neural Network Based Data Mining // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology Volume 5(4), June 2015, pp 240-245.
7. Gao R.Z., Wang Y.J., Lai J.F., Gao H. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks // Information Sciences Volume 367, May 2016., pp. 449-462.
8. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method // Journal of Modern Transportation Volume 26(1), April 2018, pp. 36-48.
9. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints // Mechatronics Volume 38, December 2016, pp. 1-15.
10. Song H., Schnieder E. Evaluating Fault Tree by means of Colored Petri nets to analyze the railway system dependability // Safety Science Volume 110, December 2018, pp 313-323.
11. Wang M., Kou B., Zhao X. Analysis of energy consumption characteristics based on simulation and traction calculation model for the crh electric motor train units // 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2018, Jeju. pp 2738-2743.
12. Наказ №062-Ц. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів (ЦТ-0059). Введ. 2003-03-05. Київ., 2003. 85 с.
13. Наказ №206-ЦЗ. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи по електровозах ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, дизель-поїздах ДЕЛ-02, електропоїздах ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т (ЦТ-0199). Введ. 2010-12-22. Київ., 2010. 78 с.
14. Наказ №113-Ц. Методика розрахунку норм витрат дизельного палива і електроенергії на тягу поїздів (ЦТ-0099). - Введ. 2004-06-09. Київ., 2004. 62 с.
15. Наказ №204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці. Введ. 2014-05-16. Київ., 2014. -10 с.

REFERENCES

1. Osipov S.I., & Osipov S.S. (2010) Osnovy tyagi poyezdov [Principles of traction]. Moscow: UMC MPS of Russia [in Russian]
2. Rafael Barrientos, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua (2017) Railway ecology. Springer International Publishing.
3. Tartakovsky, E.D., Falendysh, A.P., Kalabukhin, Y.E., & Grishchenko, S.G. (2013). Otsenka zhiznennogo tsikla [Life cycle assessment]. Lokomotiv-inform: nauchnyiy zhurnal - Lokomotiv-inform: a scientific journal, 2, 80, 56-60 [in Russian].
4. Barybin M., Falendysh A., Hatchenko V., Kletska O., Kiritseva E. (2021). Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). Volume 1021, 1-8.
5. Fu Q, Zhu J, Mao Z, Zhang G, Chen T. (2018) Online condition monitoring of onboard traction transformer core based on core-loss calculation model. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Volume 65(4), 3499-3508.

6. Safna F., SunnyR. (2015) Artificial Neural Network Based Data Mining. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. Volume №5(4), 240-245.
7. Gao R.Z., Wang Y.J., Lai J.F., Gao H. (2016) Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. Information Sciences. Volume 367, 449-462.
8. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. (2018) Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. Journal of Modern Transportation. Volume 26(1), 36-48.
9. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. (2016). Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints. Mechatronics. Volume 38, 1-15.
10. Songs H., Schnieder E. (2018). Evaluating the Fence Tree to analyze the railway system dependability. Safety Science Volume 110, 313-323.
11. Wang M., Kou B., Zhao X. (2018). Analysis of energy consumption characteristics based on simulation and traction calculation model for the crh electric motor train units. 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2738-2743.
12. Instrukciya po tehničnomu normuvannyu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059) [Instructor po tehničnomu normuvannyu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059)]. (2003). Order 062-C from 05.03.2003 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].
13. Pravila tyagovih rozrahunkiv dlya poyiznoyi roboti po elektrovozah ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, teplovozh TEP150, TEM103, dizel-poyizdah DEL-02, elektropoyizdah EPL2T, EPL9T (CT-0199) [Rules of traction calculations for train operation on electric locomotives CHS7, CHS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, diesel locomotives TEP150, TEM103, diesel trains del-02, electric trains EPL2T, EPL9T (CT-0199)]. (2010). Order 113-C from 22.12.2010 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].
14. Metodika rozrahunku norm vitrat dizelnogo paliva i elektroenergiyi na tyagu poyizdiv (CT-0099) [Methodology for calculating diesel fuel and electricity consumption rates for train traction (CT-0099)]. (2004). Order 113-C from 09.06.2004 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].
15. Polozhennya pro inspektsiyu z kontrolyu efektyvnosti vykorystannya enerhoresursiv Ukrzaliznytsi [Regulations on inspection of energy efficiency control of Ukrzaliznytsia]. (2014). Order 204-C from 16.05.2014 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukrainian].

Barybin Mykola Anatolyevich¹

¹ Department of "Heat Engineering, heat engines and energy management", Ukrainian State University of railway transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, 61050, Ukraine

MODEL OF SETTING THE AMOUNT OF FUEL CONSUMPTION FOR THE TRACTION OF DIESEL TRAINS AND RAIL BUSES

The article deals with the issues of determining the fuel consumption for traction of diesel multiple unit trains of the fleet of JSC "Ukrzaliznytsya". The criteria for the optimality of mathematical models are formed and the method of fuel consumption for train traction is considered. The inconsistency of the current method with the requirements of adaptability, hardware-software orientation, ease of use was established, and the non-compliance with the ISO 50001 "Energy Management Systems" standard was determined. The physical process of fuel consumption for traction by diesel rolling stock and the method of substitution by the proposed mathematical model under operating conditions are graphically reflected. The main components of fuel consumption and methods for their determination are established. Based on the law of conservation of mechanical energy, a model for determining fuel consumption is proposed and comprehensive information is provided on all components of the model. The results of the calculation of the impact coefficients are given and a list of technical features of the operation park of JSC "Ukrzaliznytsya" is given. On the basis of the real traction arm Okhtyrka-Smorodino, the fuel consumption for traction, idling and the total amount of energy resources consumed by different types of traction units are established. The recalculation of fuel consumption per 1 passenger of the specified service shoulder is graphically reflected, recommendations are given for the efficient use of traction rolling stock, and the need for the use of automated rationing systems is determined.

Keywords: cost rationing, traction calculations, energy resources, mathematical modeling, traction composition..

Анатолій Сидоренко¹, Сергій Яцько²¹ Старший інженер ПрАТ «ЕЛАКС», м. Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-5550-6103>² Кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, майдан Фейєрбаха 7, 61050, Україна <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

* Автор, відповідальний за листування: sidorenko58@gmail.com

**ОЦІНКА ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ
НА ВТРАТИ ВІД НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ТА ЗАХОДИ ЩОДО ЇХ ЗНИЖЕННЯ**

В статті розглядається актуальна проблема нерівномірності електроспоживання на залізничному транспорті та кроки, по її зниженню. Проведений аналіз умов експлуатації тягового рухомого складу. На основі результатів проведеного аналізу надано характеристики режимам роботи тягового рухомого складу залізничного транспорту та енергетичним процесам у системі електричної тяги при їх реалізації. Наведено фактори впливу, що призводять до виникнення енергетичних втрат у результаті нерівномірності тягового електроспоживання. Запропоновано показники для оцінки нерівномірності тягового електроспоживання. Як показники пропонується використання інтегральних енергетичних показників пік-фактор та коефіцієнт форми. Пік-фактор характеризує рівень надлишкової потужності системи електропостачання, коефіцієнт форми – втрати в системі тягового електропостачання. За даними показниками було проведено оцінку часових діаграм електроспоживання на фідері тягової підстанції постійного струму залізниці та електропоїздом метрополітену. Результати кількісної оцінки підтвердили несприятливий вплив визначених факторів на нерівномірність тягового електроспоживання. Було встановлено, що режими роботи електропоїзда метрополітену провокують виникнення більш значних енергетичних втрат в елементах системи тягового електропостачання у порівнянні із залізницею. Доведено, що рекуперативне гальмування посилює нерівномірність електроспоживання, збільшуючи завантаженість тягової мережі та сприяючи виникненню струмів імпульсного характеру у системі тягового електропостачання. Запропоновано концепції з подолання проблем нерівномірності тягового електроспоживання та використання надлишкової енергії рекуперації, що ґрунтуються на використанні накопичувача енергії як додаткового джерела живлення тягового електроприводу.

Ключові слова: режим роботи, нерівномірність споживання електроенергії, втрати, пік-фактор, коефіцієнт форми, накопичувач енергії.

Вступ. На даний час залізничний транспорт відіграє значну соціальну роль в економіці України. Незважаючи на стрімкість автомобілізації, залізничний транспорт України залишається провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, забезпечуючи 82% вантажних і майже 50% пасажирських перевезень [1].

Серед основних пріоритетів національної транспортної стратегії України на період до 2030 р. є збереження конкурентоспроможності та підвищення ефективності транспортної системи

України [2]. При цьому зменшення транспортних витрат та збільшення ефективності транспорту виділяються як одні із основних заходів по досягненню поставлених цілей.

З загального обсягу споживаної електрифікованим залізничним транспортом електроенергії основна її частина, 80...84 %, використовується безпосередньо на тягу поїздів та складає значну частку виробничої собівартості перевезень [3, 4]. На рис. 1 наведено діаграми електроспоживання АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» за 2014-2019 рр.



Рис. 1. Споживання електроенергії АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» за 2014-2019 рр. [5]

З огляду на стратегічні цілі, що визначені Національною транспортною стратегією України на період до 2030 р., соціально-економічну роль залізничного транспорту та його енергоємність, розробка технічних засобів і технологій з використання потенціалу енергозбереження у системах тяги є першочерговою задачею задля забезпечення подальшого розвитку транспортної галузі України.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Аналіз ситуації свідчить, що, незважаючи на значний прогрес у технічних засобах електричної тяги, багато енергетичних проблем виявляються не лише невирішеними, а й навіть ускладнюються. Специфічна особливість електричного транспорту пов'язана зі значною нерівномірністю споживання електроенергії під час руху поїзда [6], а також з великими втратами електроенергії в системі тягового електропостачання. Неприятливий режим електроспоживання веде до вагомих втрат енергії в тяговій мережі, в агрегатах тягових підстанцій і в первинній мережі змінного 3-фазного струму. Складова втрат від енергії, що йде на тягу, може досягати 12% [4, 7]. Значну частку втрат проковує нерівномірність споживання енергії. Їх значення може досягати в умовах залізниці 6 % та щонайменше 8% в умовах метрополітену [4, 7, 8].

Значний потенціал енергозбереження криється у використанні рекуперативного гальмування [9-11]. За різними оцінками потенціал енергозбереження від використання рекуперативного гальмування є значним і визначається двома основними факторами: часткою енергії спожитої для подолання опору руху та ефективністю перетворення електричної енергії в механічну і навпаки. Однак складність технологічного процесу узгодження режимів роботи тягового рухомого складу в системі електричної тяги робить неможливим використання всього потенціалу енергозбереження від реалізації режиму рекуперативного гальмування [12, 13]. На сьогодні максимальна економія енергії від реалізації рекуперативного гальмування у вантажних та пасажирських міжрегіональних перевезеннях складає лише 3...12 %, а у міських та приміських пасажирських перевезеннях – 15...25 % [4, 14].

Вирішення проблем, пов'язаних з нерівномірним споживанням електроенергії електрорухомим складом і підвищення ефективності використання рекуперативного гальмування, є першочерговими. У даному напрямі ведеться значна кількість досліджень як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. Як показує практичний досвід технічні рішення щодо вирішення даної проблематики значною мірою фінансово затратні та можуть бути економічно не обґрунтовані для тієї чи іншої області застосування.

Незважаючи на популярність даного напрямку підвищення енергоефективності систем тяги, до тепер, не повною мірою окреслено режими роботи системи тяги, що призводять до виникнення максимальних економічних збитків від нерівномірності тягового електроспоживання та залишається не до кінця розкритим питання можливих концепцій керування енергообмінними процесами у системі тяги задля її зниження. Таким чином можна стверджувати, що дана задача є актуальною на сьогодні та потребує проведення детального розгляду.

Мета та завдання дослідження – аналіз режимів роботи тягового рухомого складу, визначення характерних особливостей їх протікання та заходів щодо зниження втрат у системі тяги від нерівномірності електроспоживання.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

- провести аналіз умов експлуатації тягового рухомого складу залізничного транспорту;
- визначити фактори, що впливають на виникнення втрат в елементах системи тяги унаслідок нерівномірності електроспоживання;
- визначити концепції керування енергообмінними процесами у системі тяги з накопичувачем енергії, що сприятимуть зменшенню нерівномірності електроспоживання.

Матеріали та методи дослідження. Система електричної тяги – це специфічна електроенергетична система з рухомими навантаженнями. Вона, як правило, характеризується значно несприятливішими значеннями показників нерівномірності електроспоживання. Інша особливість визначається застосуванням рекуперативного гальмування. Нерівномірність споживання енергії в електричній тязі має тенденцію до посилення, що погіршує її енергетичні та економічні показники, та вимагає завищення встановленої потужності всіх видів обладнання в системі електропостачання. Це пов'язано насамперед з умовами експлуатації тягового рухомого складу та необхідністю збільшення пропускної здатності.

Умови експлуатації тягового рухомого складу залізничного транспорту передбачають його роботу у трьох режимах – тяга, вибіг, гальмування. У цілому частота та тривалість реалізації режимів залежить від багатьох факторів. Визначальними факторами є довжина перегону, заданий час руху по перегону та профіль шляху.

Було проведено аналіз графіка руху поїздів міжрегіонального сполучення, що обслуговують «популярні» напрямки пасажирських перевезень по Україні [15]. Результати аналізу показали, що у 98% випадках час проходження міжстанційних ділянок більший за 15 хв., а у 58% більший за 45 хв. (рис. 2).

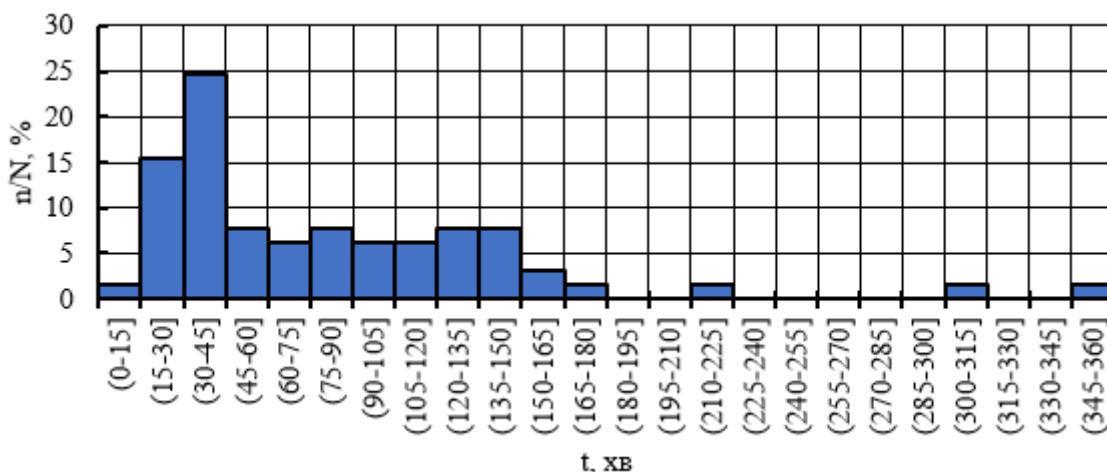


Рис. 2. Гістограма розподілення часу проходження міжстанційних ділянок на найбільш популярних маршрутах пасажирськими поїздами далекого сполучення

Також було проведено аналіз графіку руху приміських потягів по Південній залізниці [16]. У приміському сполученні для 93% випадків цей час не перевищує 15 хв. (рис. 3, а), для метрополітену 3 хв. (рис. 3, б).

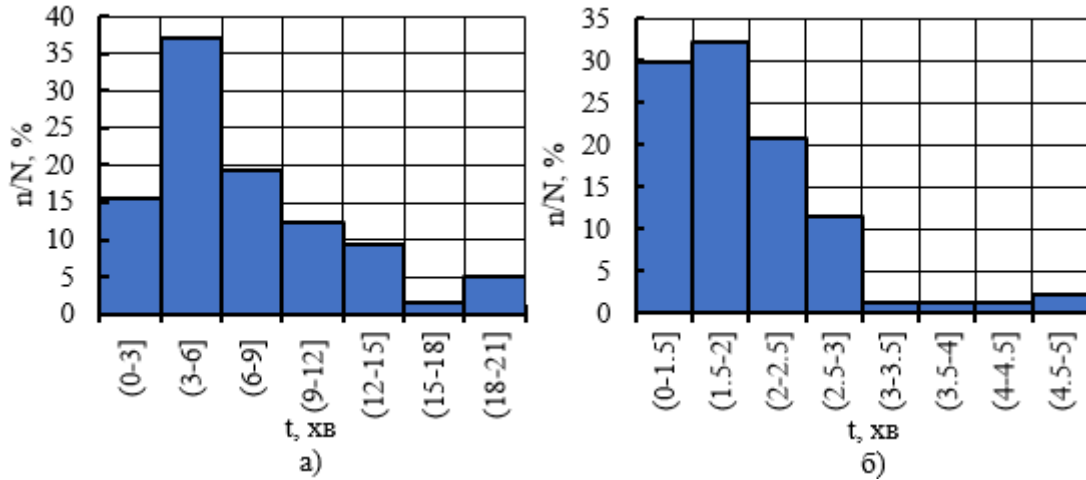


Рис. 3. Гістограма розподілення часу проходження міжстанційних ділянок поїздами: а) на Південній залізниці у приміському сполученні; б) Київський метрополітен

Такі значення часу проходження зумовлені умовами експлуатації, а саме; відстанню між зупинками та графіком руху поїздів. Так, наприклад, довжина перегонів Південної залізниці, на яких експлуатуються електропоїзди приміського сполучення у 95% випадків не перевищує 6 км (рис. 4, а). На Південно-західній – 11 км (рис. 4, б).

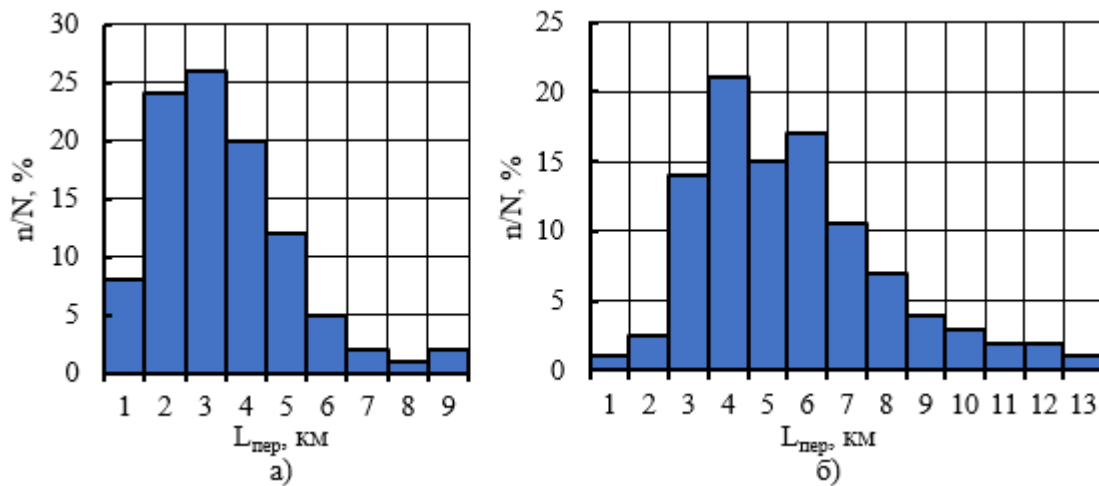


Рис. 4. Гістограми розподілення перегонів n від їх кількості N на яких експлуатуються приміські електропоїзди: а) по Південній залізниці; б) Південно-західній залізниці [17]

Найбільш несприятливим для системи електричної тяги є режим тяги, а саме: фаза розгону, оскільки вона супроводжується короткотривалим споживанням енергії пікової потужності. Згідно з наведеними статистичними даними, що найменше 1 раз кожні 15 хв., у випадку приміських пасажирських перевезень, та 3 хв., у випадку міських пасажирських перевезень метрополітену,

тяговий рухомий склад споживає енергію пікової потужності. При цьому часовий проміжок споживання є коротким. Це викликано необхідністю забезпечення високого значення середньої швидкості руху по перегону. Середнє значення пускового прискорення, у випадку приміського сполучення становить $0,7 \text{ м/с}^2$ та 1 м/с^2 для електропоїздів метрополітену. Середнє значення уповільнення, у випадку приміського сполучення, становить $0,6 \text{ м/с}^2$ та 1 м/с^2 для електропоїздів метрополітену, а максимальна швидкість експлуатації досягає 160 та 80 км/год відповідно. Для підтримки заданої швидкості руху процес розгону поїзда на окремих перегонах може здійснюватися неодноразово. Переведення тягового рухомого складу у режим тяги для повторного розгону поїзда здійснюється у межах 15 – 25% від загальної кількості поїздів [18]. Аналіз статистичних даних тривалості режимів роботи електропоїздів ЕПЛ2Т-007 на ділянці ст. Скнилів – ст. Стрий показав, що найбільш ймовірна тривалість включення тяги, близько 70%, складає від 10 до 35 с (рис. 5).

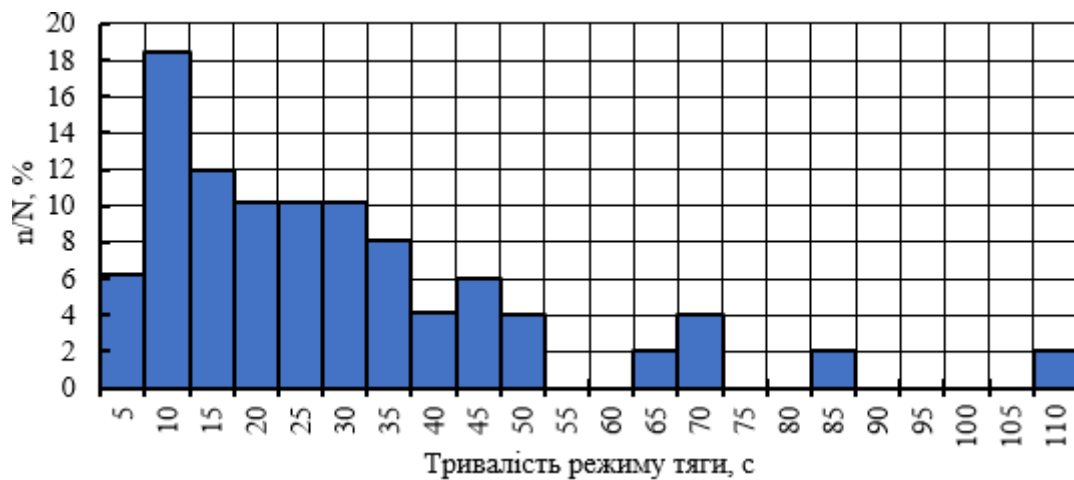


Рис. 5. Статистичний розподіл тривалості режиму тяги за одне включення [16]

Згідно з [18] тривалість режиму вибігу електропоїздів приміського сполучення займає від 30 до 80% загального часу руху по перегону. Для середньої довжини перегону 3 км цей час становить близько 65%. Що стосується вантажних перевезень графік руху поїздів розробляється таким чином, щоб мінімізувати кількість зупинок вантажних поїздів на заборонні сигнали та проміжних станціях. Таким чином вантажні перевезення супроводжуються більш рівномірним споживанням потужності з тягової мережі за конкретний період часу. Це також пов'язано з необхідністю постійного підтримання швидкості руху, що викликано значним опором руху. Отже режими роботи тягового рухомого складу міського та приміського залізничного транспорту можна охарактеризувати як повторно-короткочасні з високо інтенсивним, несталим споживанням та генеруванням енергії значної потужності. Часові проміжки споживання та генерування енергії складають десятки секунд. Для вантажних та міжрегіональних пасажирських поїздів режими роботи можна охарактеризувати як довготривалі де основний часовий інтервал циклу руху складає режим тяги та гальмування, а потужність споживання та генерування з точки зору нерівномірності електроспоживання, більш збалансовано розподілена у часі. Що стосується режиму гальмування то на сьогодні сучасні зразки тягового рухомого складу обладнуються системами рекуперативного гальмування. Рекуперативне гальмування є достатньо ефективним інструментом зменшення затрат енергії на тягу поїздів, особливо для тягових споживачів з повторно-короткочасними режимами роботи. Однак, з точки зору нерівномірності споживання, використання рекуперативного гальмування суттєво погіршує ситуацію. Це пов'язано з виникненням у тяговій мережі імпульсів зворотного

струму короткої тривалості. У зв'язку з проблемою використання енергії рекуперативного гальмування тривалість цих імпульсів струму є крайне короткою.

Отже міський та приміський електричний транспорт створює більш несприятливі режими роботи системи електропостачання, провокуючи виникнення додаткових втрат в елементах системи. На рис. 6 приведено часові діаграми тягового електроспоживання та рекуперації за один оберт електропоїзда на лінії Харківського метрополітену для двох різних дат з однаковим днем тижня та в однаковий часовий проміжок доби

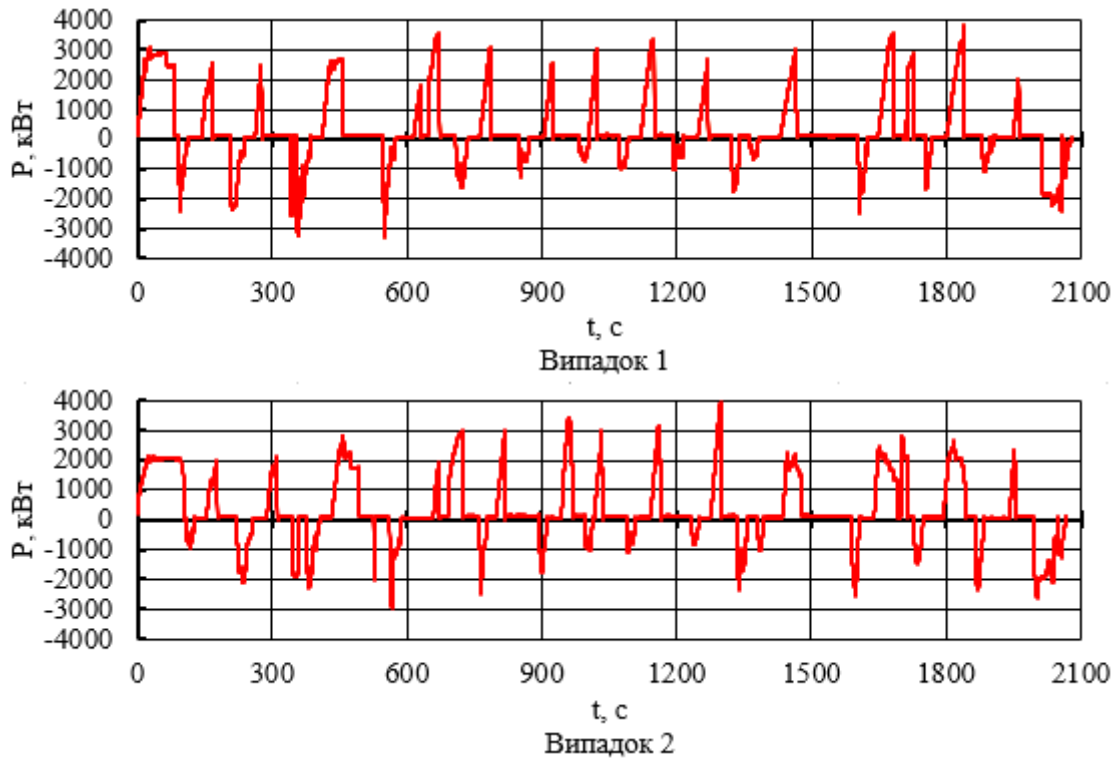


Рис. 6. Часові діаграми потужності тягового електроспоживання та енерговідновлення за один оберт електропоїзда на лінії Харківського метрополітену для двох різних дат з однаковим днем тижня та в однаковий часовий проміжок доби

На рис. 7 приведено добові діаграми електроспоживання на фідері тягової підстанції постійного струму залізниці. Діаграми побудовані на основі даних струмів та напруг фідерів тягової підстанції постійного струму залізниці, що отримані за допомогою інформаційно-діагностичного комплексу «Регіна» (дискретність вимірювання 1 с.).

Наведені часові діаграми яскраво ілюструють імпульсний характер споживання електроенергії тяговими навантаженнями. Негативні значення потужності (рис. 7) не пов'язані з рекуперацією енергії, а свідчать лише про перетікання потужності через шини тягової підстанції з інших фідерних зон. Як відомо потужність тягових підстанцій розраховується із середньо максимальних струмів споживання. Із часової діаграми (рис. 7) добре видно, що встановлена потужність тягової підстанції значно завищена в порівнянні з середньодобовою потужністю.

Моменти прибуття та відправлення електропоїздів метрополітену на станції по парному та непарному напрямку, тривалість та послідовність режимів їх роботи є взаємно неузгодженими, тобто є незалежними подіями. Таким чином ймовірним є виникнення випадку накладання

імпульсів споживання. У випадку експлуатації тягового рухомого складу з системою рекуперативного гальмування разом з цим виникає проблема надлишкової енергії рекуперації. Ці проблеми також властиві і системі електричної тяги у якій експлуатуються електропоїзди для здійснення приміських пасажирських перевезень.

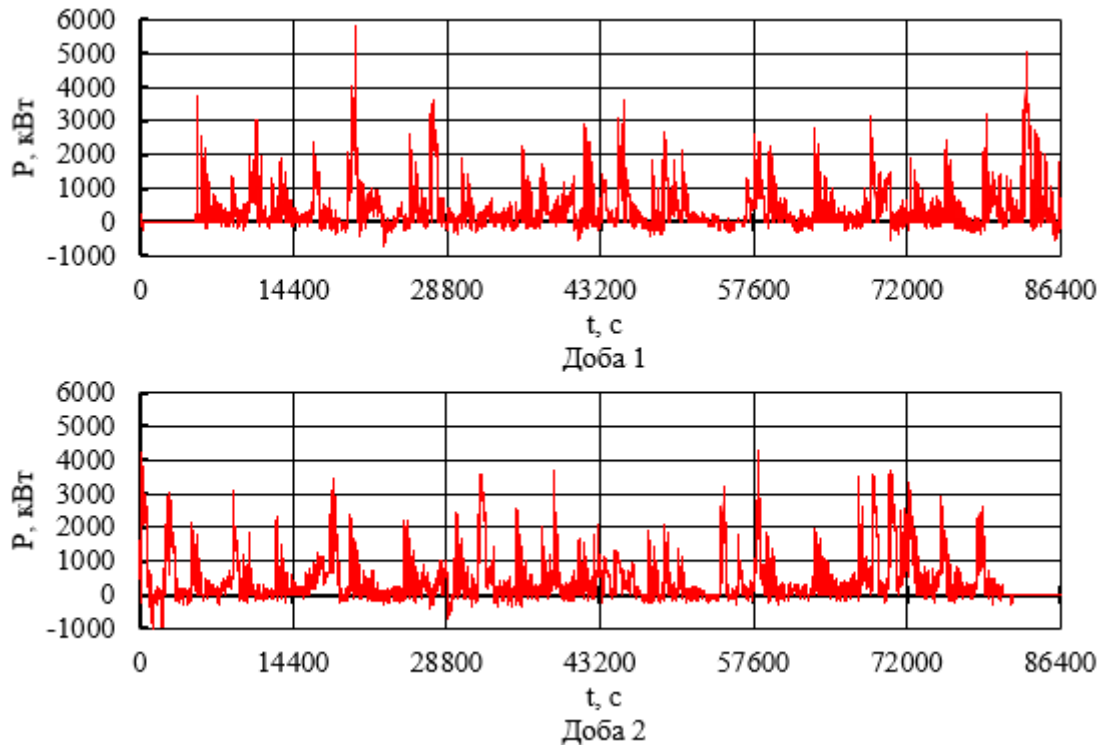


Рис. 7. Часові діаграми потужності електроспоживання на фідері тягової підстанції постійного струму

Для часових діаграм (рис. 6, 7) було проведено кількісну оцінку нерівномірності споживання енергії у даних випадках. Оцінка проводилася на основі інтегральних енергетичних показників пік-фактор (формула 1) та коефіцієнт форми (формула 2). Пік фактор являє собою відношення максимальної потужності споживання до її середнього значення за період усереднення:

$$\Pi = \frac{P_{max}}{P_{cp}} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}, \quad (1)$$

T – період усереднення;

P_{max} – максимальна потужність за період T ;

P_{cp} – середнє значення потужності за період T ;

$P(t)$ – миттєва потужність;

Коефіцієнт форми являє собою відношення діючого значення потужності за період усереднення до її середнього значення:

$$K_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}, \quad (2)$$

T – період усереднення;

P_{cp} – середнє значення потужності за період T ;

$P(t)$ – миттєва потужність;

P_{ϕ} – діюче значення потужності за період T .

Втрати у системі електропостачання можна вважати пропорційними квадрату коефіцієнта форми. Період усереднення має відповідати характерним періодам графіку руху.

Дані інтегральні показники дозволяють оцінити позитивний ефект від запровадження технічних рішень щодо керування процесами енергообміну у системах електричної тяги. Вони характеризують такі критерії:

Пік-фактор – надлишкова потужність системи електропостачання;

Коефіцієнт форми – втрати в системі тягового електропостачання.

У таблиці 1 приведено результати кількісної оцінки нерівномірності тягового електроспоживання для представлених раніше діаграм електроспоживання (рис. 6, 7).

Таблиця 1. Результати кількісної оцінки нерівномірності тягового електроспоживання

Інтегральний енергетичний показник	Рисунок 6				Рисунок 7	
	Випадок 1		Випадок 2		Доба 1	Доба 2
	З рек. гальм.	Без рек. гальм.	З рек. гальм.	Без рек. гальм.		
Пік-фактор	13,05	7,82	12,75	7,57	16,84	10,54
Коефіцієнт форми	3,92	2,06	3,65	1,88	2,01	1,94

Для метрополітену період усереднення відповідав часу одного оберту електропоїзду. Для тягової підстанції період усереднення був рівний одній добі. Суттєву розбіжність показників пік-фактора для часових графіків електроспоживання з фідера тягової підстанції можна пояснити зміною інтенсивності завантаження цієї фідерної зони протягом двох діб. Також була проведена оцінка за різних технічних реалізацій режимів гальмування електропоїздом метрополітену – з використанням рекуперативного гальмування (рис. 7) та при перетворенні енергії гальмування у тепло (від’ємні значення потужності на часових діаграмах не враховуються при проведенні розрахунку інтегральних енергетичних показників). З отриманих результатів можна зробити висновок, що рекуперативне гальмування посилює нерівномірність електроспоживання, збільшуючи завантаженість тягової мережі та сприяє виникненню струмів імпульсного характеру в силових агрегатах тягової підстанції та системи зовнішнього електропостачання унаслідок неузгодженості режимів роботи тягових навантажень. З енергетичної точки транзит енергії рекуперації по тяговій мережі призводить до виникнення непродуктивних втрат в елементах тягової мережі та її додаткової завантаженості.

На сьогодні одним з основних інструментів для подолання проблем нерівномірності електроспоживання та використання надлишкової енергії рекуперації є інтеграції накопичувачів енергії у систему тяги [6, 12, 18, 19]. Вони виступають у ролі демпфіруючого елемента між генеруючими установками і споживачами системи тяги у нестационарних режимах [6, 7, 12, 20]. На залізничному транспорті найбільшого розповсюдження набули електрохімічні, індуктивні, ємнісні та інерційні накопичувачі енергії [21-24]. Вибір того чи іншого типу накопичувача зумовлений

відповідністю його технічних характеристик висунутим критеріям. Як правило вибір типу накопичувача проводиться за такими критеріями: гравеметрична щільність енергії; гравеметрична щільність потужності; об'ємна щільність енергії; об'ємна щільність потужності; ефективність зарядно-розрядного циклу; інтенсивність саморозряду; кількість циклів роботи; питома вартість; безпека експлуатації. Тобто вибір типу накопичувача енергії є багатокритеріальною задачею і належить до задач вибору найкращого проектного рішення. При цьому вагомість критеріїв може бути різною відповідно до умов експлуатації, місця розміщення, визначених обмежень та притаманних режимів роботи тяговим навантаженням. За місцем їх розміщення у системі електричної тяги існує декілька варіантів, а саме: розміщення їх у системі електропостачання та на борту рухомого складу. Як показують результати досліджень при повторного-короткочасних режимах роботи тягового рухомого складу оптимальним варіантом розміщення накопичувача є розміщення безпосередньо на борту рухомого складу [6-8, 14, 22]. У порівнянні зі стаціонарними накопичувачами, це додатково розкриває можливість виключити транзит енергії по тяговій мережі у моменти рекуперативного гальмування та скоротити його при тяговому енергоспоживанні. Також накопичувачі енергії знаходять розповсюдження і серед автономного тягового рухомого складу для забезпечення більш рівномірного завантаження дизеля.

Основною задачею при використанні накопичувача енергії у системі тяги є організація оптимального керування протіканням енергообмінних процесів за рахунок узгодження режимів роботи накопичувача енергії та системи тяги. На рис. 8 представлено можливі концепції оптимального керування протіканням енергообмінних процесів за рахунок узгодження режимів роботи накопичувача енергії та системи тяги.

Концепція №1 передбачає стабілізацію транзиту потужності по системі тягового електропостачання у моменти пікового електроспоживання тяговим рухомим складом за рахунок попередньо накопиченої енергії електричного гальмування. Дана концепція не виключає передачі електроенергії у мережу під час режиму електричного гальмування. Однак значення потужності при цьому мінімізується за рахунок накопичення енергії з піковим значенням. Для концепцій №2 та №4 процес керування енергообміном у моменти пікового електроспоживання тяговим рухомим складом є аналогічним концепції №1. Концепції №3 та №5 передбачають зниження швидкості зміни потужності електроенергії, що споживається тяговим рухомим складом протягом розгону поїзду за рахунок попередньо накопиченої енергії. Процес накопичення енергії для даних концепцій відрізняється. Що стосується використання електроенергії рекуперативного гальмування то концепції №2 та №3 передбачають реалізацію режиму заряду накопичувача у проміжки часу коли поїзд слідує на вибігу. Для концепцій №4 та №5 режим заряду накопичувача реалізується на протязі часу реалізації режиму рекуперативного гальмування. За рахунок реалізації режиму заряду накопичувача у вказаний проміжок часу відбувається обмеження пікового значення потужності електроенергії рекуперації та зниження швидкості її зміни у системі тягового електропостачання.

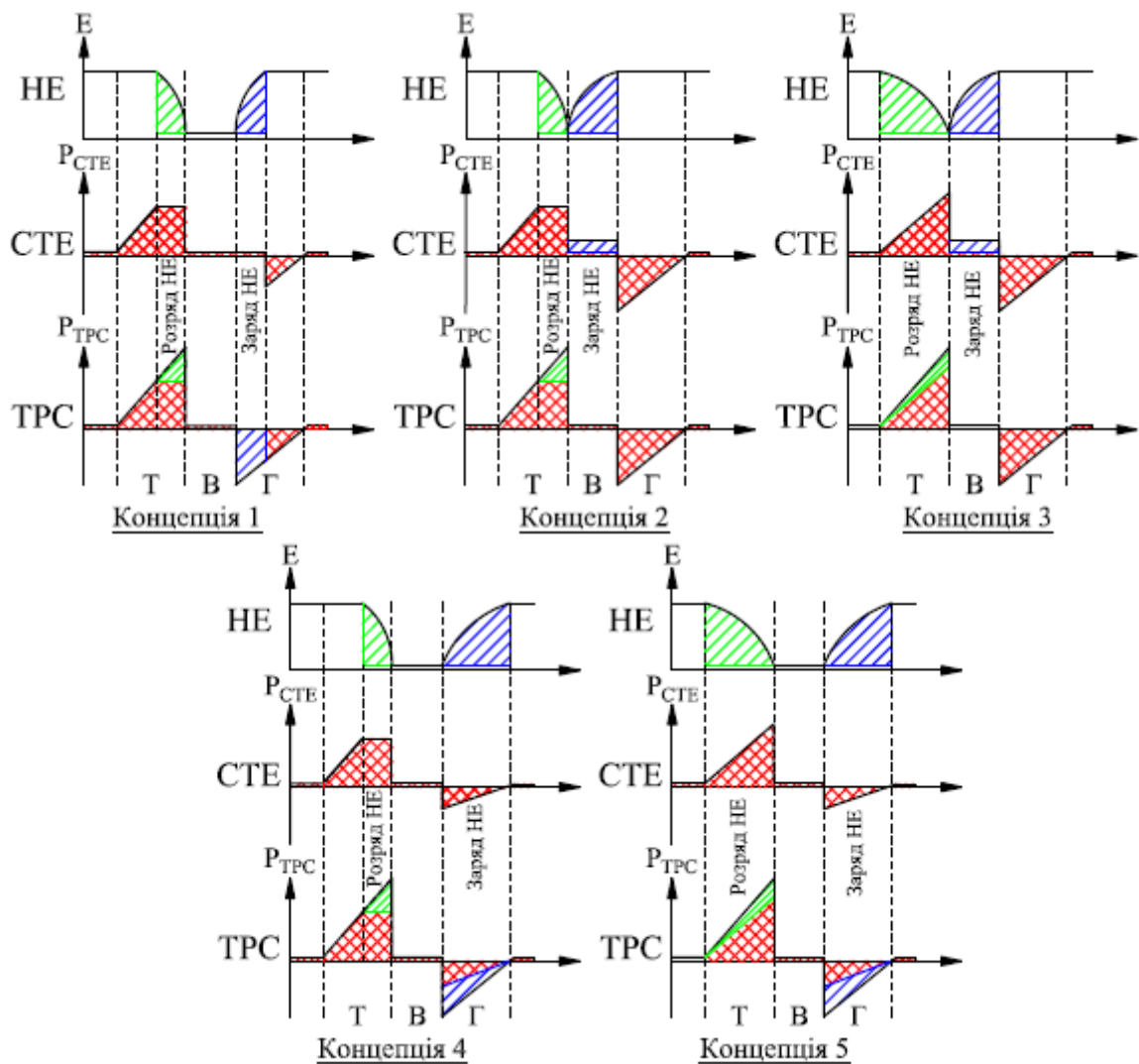


Рис. 8. Циклограми роботи бортового накопичувача енергії за різних концепцій організації керування енергообмінними процесами у системі тяги

НЕ – накопичувач енергії; ТМ – система тягового електропостачання; ТРС – тяговий рухомий склад; Т – режим тяги; В – вибіг; Г – режим електричного гальмування; $P_{СТЕ}$ – потужність електроенергії, що протікає по системі тягового електропостачання; $P_{ТРС}$ – потужність електроенергії на струмоприймачі ТРС

Висновки. Проведений аналіз умов експлуатації тягового рухомого складу залізничного транспорту показав, що характерними для приміського залізничного транспорту є повторно-короточасні режими роботи з високо інтенсивним, несталим споживанням та генеруванням енергії значної потужності тривалістю десятки секунд. Результати проведеного аналізу часових діаграм електроспоживання приміського та міського електротранспорту показав, що експлуатація електропоїздів метрополітену супроводжується більш значною нерівномірністю електроспоживання та більш суттєвими втратами в агрегатах системи тяги у порівнянні з електропоїздами приміського сполучення. Інтегральні енергетичні показники пік-фактор та коефіцієнт форми дозволяють кількісно оцінити нерівномірність споживання електроенергії та величину втрат у системі тягового електропостачання. Встановлено, що реалізація режиму

гальмування з рекуперацією енергії призводить до збільшення нерівномірності електроспоживання у системі тяги та призводить до виникнення додаткових втрат у системі. Наведено одні із перспективних концепцій керування протіканням енергообмінних процесів за рахунок узгодження режимів роботи накопичувача енергії та системи тяги, що сприятимуть зменшенню нерівномірності електроспоживання. В подальшому має бути проведено порівняльну оцінку наведених концепцій керування енергообмінними процесів за критерієм «мінімуму втрат» з врахуванням складності реалізації алгоритму керування сумісної роботи елементів системи електричної тяги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Залізничний транспорт. Міністерство інфраструктури України. URL: <http://mtu.gov.ua/timeline/Zaluznichniy-transport.html> (дата звернення: 15.04.2022).
2. Стратегічне бачення розвитку транспорту України. Міністерство інфраструктури України. URL: <http://mtu.gov.ua/content/strategiya-2015.html> (дата звернення: 15.04.2022).
3. Кузнецов В. Г., Саблін О.И., Губский П. В., Кольхаев Е.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена. // Гірнична електромеханіка та автоматика. 2015. №95. С. 81-89.
4. Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі і електричного транспорту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.09 / УДУНТ. Дніпро, 2018. 364 с.
5. Інтегрований звіт АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» за 2019 рік. URL: http://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/Book_UZ_19_UA_FIN_web.pdf (дата звернення: 15.04.2022).
6. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage // International Journal of Renewable Energy Research. 2019. Vol. 9, № 2. P. 848-858.
7. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : дис. ... д-ра техн. наук. МИИТ. Москва, 2013. 424 с.
8. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии : дис. ... д-ра техн. наук. МИИТ. Москва, 2000. 451 с.
9. Сулим А. А., Сичев С. Д., Распопин В. Р. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена // Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации: материалы X междунауч.-тех. конф. Кременчуг : КНУ им. М. Остроградского, 2012. С. 344.
10. Sheng Lin, Di Huang, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Rui Luo, Guotao Lu. Research on The Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. P. 7329-7339. doi: 10.1109/TVT.2019.2921161.
11. Yang Z., Xia H., Wang B., Lin F. An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation // International Power Electronics Conference IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA. 2014. P. 2133-2139. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
12. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock // Computational problems of electrical engineering journal. 2019. Vol. 9, № 1. P. 44-51.
13. Pena-Alcaraz M., Fernandez A., Cucala A. P., Ramos A., Pecharroman R. R., Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy // Journal of rail and rapid transit. 2012. vol. 226, № 4. P. 397-408. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
14. Lelas M., Pavlovic T., Ban Z. A. Supercapacitor based energy storage system for urban transportation energy efficiency improvement // International conference on electrical drives and power electronics. 2015. P. 430-436. doi: 10.1109/EDPE.2015.7325333.
15. Укрзалізниця визначила найпопулярніші поїзди та напрямки в Україні. Офіційний сайт Укрзалізниці. URL: http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/545833 (дата звернення: 07.02.2022).
16. Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу : навч. посіб. Ч. 2. Харків : Аспект, 2005. 259 с.
17. Цукало П. В., Ерошкин Н. Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р : Транспорт, 1986. 249 с.
18. Sumpravakup C., Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T. Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy // Journal of modern transportation. 2017. Vol. 25, № 4. P. 223-235. doi: 10.1007/s40534-017-0146-6.
19. Dominguez M., Fernández-Cardador A., Cucala A. P., Pecharroman R. R. Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles // IEEE transactions on automation science and engineering. 2012. Vol. 9, № 3. P. 496-504. doi: 10.1109/tase.2012.2201148.
20. Sulym A. On the question of a reasonability of capacitive storages use in the metro // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2015. Vol. 29, № 1. P. 94-100.

21. Liu X., Li K. Energy storage devices in electrified railway systems: a review //Transportation safety and environment. 2020. Vol. 2, № 3. P. 183–201. doi: 10.1093/tse/tdaa016.
22. Omelyanenko V. I., Riabov Ie. S., Overianova L. V., Omelianenko H. V. Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train // Electrical engineering & electromechanics. 2021. № 4. P. 64-72. doi: 10.20998/2074-272x.2021.4.08.
23. Омеляненко В. И., Омеляненко Г. В., Оверьянова Л. В. Инерционные накопители энергии для железных дорог // Локомотив-информ. 2020. № 1. С. 26-32.
24. Thompson, R. C.; Kramer, J.; Hayes, R. J. Response of an urban bus flywheel battery to a rapid loss-of-vacuum event // Journal of advanced materials. 2005. Vol. 37. № 3. P. 42–50.

REFERENCES

1. Zaliznychnyi transport. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. [Railway transport. Ministry of Infrastructure of Ukraine]. *mtu.gov.ua*. Retrieved from <http://mtu.gov.ua/timeline/Zaliznichniy-transport.html> [in Ukrainian].
2. Stratehichne bachennia rozvytku transportu Ukrainy. [Strategic vision of transport development in Ukraine]. *mtu.gov.ua*. Retrieved from <http://mtu.gov.ua/content/strategiya-2015.html> [in Ukrainian].
3. Kuznetsov V. H., Sablyn O. Y., Hubsnyi P. V., Kolikhaev E. H. (2015) Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemyi rekuperatsii energii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena [Analysis of energy saving reserves during the implementation of the energy recovery system on the trains of the Dnepropetrovsk metro]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining Electromechanics and Automation*, 95, 81–89 [in Ukrainian].
4. Sablin O. I. (2018) Rozvytok metodiv i zasobiv pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia enerhii rekuperatsii v systemi elektrychnoho transportu [Development of Methods and Means for Improvement of the Energy Regeneration Efficiency in the Electric Transport System]. Doctor's thesis. Dnipro: USUST [in Ukrainian].
5. Intehrovanyi zvit AT «UKRZALIZNYTsla» za 2019 rik. [Intehrovanyy zvit AT «UKRZALIZNYTSYA» za 2019 rik [Integrated report of JSC UKRZALIZNYTSYA for 2019.]. (n.d.). www.uz.gov.ua. Retrieved from http://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/Book_UZ_19_UA_FIN_web.pdf [in Ukrainian].
6. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. (2019). Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(2), 848–858.
7. Shevlyugin M. V. (2013) Energoberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuyemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii [Energy-saving technologies in railway transport and subways implemented using energy storage devices]. *Doctor's thesis*. Moscow: MIIT [in Russian].
8. Pavelchik M. (2000) Povysheniye effektivnosti elektricheskoy tyagi pri pomoshchi nakopiteley energii [Increasing the efficiency of electric traction with energy storage]. Doctor's thesis. Moscow: MIIT [in Russian].
9. Sulim A. A., Sichev S. D., Raspopin V. R. Ekonomiya elektroenerhii pri ispol'zovanii rekuperativnogo tormozheniya na vagonakh metropolitena [Saving energy when using regenerative braking on subway cars]. *Elektromekhanicheskiye i energeticheskiye sistemy, metody modelirovaniya i optimizatsii – Electromechanical and power systems, modeling and optimization methods*: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, p. 344, Kremenchug: KNU M. Ostrogradsky [in Ukrainian].
10. Sheng Lin, Di Huang, Wang Aimin, Huang Yujian, Zhao Liping, Rui Luo, Guotao Lu (2019). Research on The Regeneration Braking Energy Feedback System of Urban Rail Transit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 7329–7339. doi: 10.1109/TVT.2019.2921161.
11. Yang Z., Xia H., Wang B., Lin F. (2019) An overview on braking energy regeneration technologies in Chinese urban railway transportation. *International Power Electronics Conference IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA*, 2133–2139. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
12. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya. (2019) Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering journal*, 9(1), 44–51.
13. Pena-Alcaraz M., Fernandez A., Cucala A. P., Ramos A., Pecharroman R. R. (2012) Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. *Journal of rail and rapid transit*, 226(4), 397–408. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869883.
14. Lelas M., Pavlovic T., Ban Z. A. (2015) Supercapacitor based energy storage system for urban transportation energy efficiency improvement. *International conference on electrical drives and power electronics*, 430–436. doi: 10.1109/EDPE.2015.7325333.
15. Ukrzaliznytsya vyznachyla naypopulyarnishi poyizdy ta napryamky v Ukrayini. Ofitsiynyy sayt Ukrzaliznytsi. [Ukrzaliznytsia has identified the most popular trains and destinations in Ukraine. Official site of Ukrzaliznytsia]. www.uz.gov.ua. Retrieved from http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/545833 [in Ukrainian].
16. Basov H. H., Yats'ko S. I. (2005). *Rozvytok elektrychnoho motorvahonnoho rukhomoho skladu* [Development of electric railcar rolling stock]. Kharkiv: VTD «Apeks+» [in Ukrainian].
17. Tsukalo P. V., Yeroshkin N. G. (1986). *Elektropoyezda ER2 i ER2R* [Electric trains ER2 and ER2R]. Moscow: VTD «Transport» [in Russian].

18. Sumpavakup C., Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T. (2017). Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy. *Journal of modern transportation*, 259(4), 223–235. doi: 10.1007/s40534-017-0146-6.
19. M. Dominguez M., Fernández-Cardador A., Cucala A. P., Pecharroman R. R. (2012) Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 9(3), 496–504. doi: 10.1109/tase.2012.2201148.
20. Sulym A. (2015). On the question of a reasonability of capacitive storages use in the metro // *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 29(1), 94–100.
21. Liu X., Li K. (2020). Energy storage devices in electrified railway systems: a review. *Transportation safety and environment*, 2(3), 183–201. doi: 10.1093/tse/tdaa016.
22. Omelyanenko V. I., Riabov Ie. S., Overianova L. V., Omelianenko H. V. (2021) Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train. *Electrical engineering & electromechanics*. (4), 64–72. doi: 10.20998/2074-272x.2021.4.08.
23. Omel'yanenko V. I., Omel'yanenko G. V., Over'yanova L. V. (2020). Inertsionnyye nakopiteli energii dlya zheleznykh dorog [Inertial energy storage devices for railways]. *Lokomotyv-inform – Locomotive-inform*, 1, 26–32 [in Ukrainian].
24. Thompson, R. C.; Kramer, J.; Hayes, R. J. (2005). Response of an urban bus flywheel battery to a rapid loss-of-vacuum event. *Journal of advanced materials*, 37(3), 42–50.

Anatolii Sydorenko¹, Serhii Yatsko²

¹ Senior engineer of ELAKS company, Kharkiv, Ukraine

² PhD (Tech). Associate Professor, department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square 7, Kharkiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE OPERATING MODES OF THE ELECTRIC TRACTION SYSTEM ON LOSSES FROM UNEVENNESS OF ELECTRICITY CONSUMPTION AND MEASURES TO REDUCE THEM

The article considers the current problem of uneven electricity consumption in railway transport and steps to reduce it. The analysis of conditions of operation of traction rolling stock is carried out. Based on the results of the analysis, the characteristics of the modes of operation of traction rolling stock of railway transport and energy processes in the system of electric traction during their implementation are given. The factors that lead to energy losses due to uneven traction power consumption are presented. Indicators for estimating the unevenness of traction electricity consumption in the case of the subway and suburban rail transport are proposed. The use of integrated energy indicators peak factor and shape coefficient is proposed as indicators. The peak factor characterizes the level of excess power of the power supply system, the shape coefficient - losses in the traction power supply system. According to these indicators, the time diagrams of electricity consumption at the feeder of the railway traction substation and the subway electric train were evaluated. The results of the quantitative assessment confirmed the adverse effect of certain factors on the unevenness of traction power consumption. It was found that the modes of operation of the subway electric train provoke more significant energy losses in the elements of the traction power supply system compared to the railway. It is proved that regenerative braking increases the unevenness of energy consumption, increasing the load on the traction network and contributing to the emergence of pulsed currents in the traction power supply system. Concepts for overcoming the problems of uneven traction power consumption and the use of excess energy recovery are based on the use of energy storage as an additional power source for traction drive.

Keywords: mode of operation, uneven power consumption, losses, peak factor, shape coefficient, energy storage.

Сергій Михалків¹, Денис Жалкін², Сергій Жалкін³, Василь Равлюк⁴

¹Доцент, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0425-6295>

²Професор, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3450-160X>

³Професор, кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0089-3489>

⁴Доцент, кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

¹Автор, відповідальний за листування: svm_m@kart.edu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ СКЛАДОВИХ МЕТОДОМ ШВИДКОЇ ЕКСЦЕСОГРАМИ ДЛЯ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

У статті розглядаються властивості методу швидкої ексцесограми для вібродіагностування підшипників кочення електричного двигуна. Зважаючи на недоліки класичних методів вібродіагностування у часовому поданні, для вибору прийнятної частотної смуги для демодуляції та побудови спектру обвідної вібрації запропоновано використовувати метод швидкої ексцесограми, яка розраховує спектральний ексцес сигналу та визначає центральну частоту та ширину частотної смуги. Упродовж експериментальних досліджень реєструвалась вібрація підшипника кочення електричного двигуна мотор-компресора електровоза ЧС7 та будувався широкосмуговий спектр вібрації. Для отримання спектрів обвідної вібрації на широкосмуговому спектрі в діапазоні 0 – 9 кГц за допомогою емпіричного підходу обирались відповідні чотири частотні смуги з резонансними сплесками. На жодному з побудованих спектрів обвідної вібрації відповідних інформативних складових серед безлічі випадкових компонентів виявлено не було. Застосування методу швидкої ексцесограми дозволило обрати відповідну частотну смугу з найвищим ексцесом для здійснення демодуляції. Отриманий спектр обвідної вібрації містив дуже виражені три гармоніки частоти перекочування роликів відносно зовнішнього кільця, що відповідає діагностичній ознаці несправного зовнішнього кільця підшипника кочення.

Ключові слова: амплітуда, вібрація, двигун, діагностування, діапазон, ексцес, обвідна, підшипник, спектр, частота

Вступ. У різноманітних галузях промисловості механічне обладнання застосовує підшипники кочення, елементи яких можуть зазнавати пошкоджень і в разі можливої відмови дуже впливати на вартість ремонту встаткування, яка значно вища за вартість заміни підшипників. Зокрема в морській галузі вихід з ладу електричних двигунів із причин відмови підшипників кочення становить 37 % [1].

Також від технічного стану підшипників кочення буксових вузлів сучасного високошвидкісного рухомого складу залежить його безвідмовна експлуатація впродовж тривалого часу. Згідно з [2] відмови буксових вузлів високошвидкісних поїздів становлять 22 % серед інших відмов екіпажної частини.

Здебільшого відмови в підшипниках трапляються передчасно й викликані корозією, тріщинами, раковинами, браком змащування, потраплянням сторонніх компонентів між кільцями, надмірними навантаженнями, непередбачуваними наслідками внаслідок теплового впливу. Перелічені причини відмов упродовж тривалого часу актуалізують розробку ефективних діагностичних заходів, зокрема методів вібраційного діагностування.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Вібраційні сигнали роликів підшипників кочення з пошкодженнями містять багато завад та сторонніх компонентів, що ускладнює отримання корисної інформації для ранішнього діагностування технічного стану. Загальноживані методи вібродіагностування мають спільну властивість, яка полягає в потребі попереднього вибору частотної смуги в якій проявляються діагностичні ознаки наявних пошкоджень.

Для подолання недоліків спектральної щільності потужності Двайером був розроблений метод ексцесу в частотному поданні, який розраховує ексцес амплітуд спектральних складових, визначаючи вплив гармонік, які внаслідок випадкових коливань зазнають розмивання [3].

Натхнений цим методом, Антоні розробив метод спектрального ексцесу, який обчислює ексцес обвідної відфільтрованих сигналів з реалізацією адаптивного процесу смугової фільтрації, що зрештою дозволило йому розробити метод ексцесограми, яка базується на віконному перетворенні Фур'є (ВПФ) та спектральному ексцесі [4, 5]. Отже, спектральний ексцес володіє здатністю виявляти й локалізувати наявність короткотривалих складових сигналу. Однак для виявлення вузькосмугового короткотривалого фрагменту в шумі слід зважати на залежність спектрального ексцесу від частоти й частотної роздільності [6].

У комерційних діагностичних системах алгоритми обробки сигналів передбачають виділення вузькочастотних діапазонів для подальшого отримання обвідної, однак подібний підхід не здатен розв'язати проблему оптимального вибору центральної частоти й ширини бажаної частотної смуги оскільки ці два параметри невідомі навіть априорі й обираються емпірично, а сильні завади та інші компоненти сигналу, які з'являються впродовж роботи електричного завдання, поглиблюють згадану проблему ще більше [7].

Мета і завдання дослідження. Метою статті є визначення центральної частоти та ширини частотної смуги вібраційного сигналу підшипника кочення для пошуку діагностичних ознак його технічного стану методом швидкої ексцесограми.

Завдання дослідження є такими:

обґрунтувати переваги методу швидкої ексцесограми;

здійснити вібродіагностування підшипника кочення електричного двигуна мотор-компресора електровоза ЧС7.

Матеріали та методи дослідження. Основною ідеєю вібродіагностування є виявлення характерних частот, які носять квазіперіодичний характер і властиві пошкодженням елементів підшипників кочення. Зважаючи на імпульсну природу, навіть слабка вібрація внаслідок раннього пошкодження елементів підшипника має широкосмуговий характер. З'являються несучі, які моделюються слабкими вібраційними складовими, й вібрація з ознаками пошкодження може бути демодульована в прийнятній частотній смузі з подальшим виділенням обвідної та одночасною ізоляцією завад.

Методика вібродіагностування складається з таких етапів:

реестрація вібрації. Аналоговий вібраційний сигнал рееструється вібраційним датчиком на підшипниковому вузлі електричного двигуна з подальшим набуттям дискретної форми завдяки аналого-цифровому перетворювачу;

смугова фільтрація. Цифрова смугова фільтрація залучається до дискретної вібраційної послідовності в прийнятній резонансній частотній смузі, що дозволяє позбутись інших складових поза межами обраної смуги та підвищити видимість слабких імпульсних компонентів у межах обраної смуги;

виділення обвідної. Обвідна відфільтрованої вібраційної смуги виділяється завдяки перетворенню Гілберта;

спектр обвідної. Виділена обвідна перетворюється на спектр обвідної в якому можливо виявити частотні складові, які властиві пошкодженням на ранніх стадіях розвитку [8].

Найскладнішим є другий етап вібродіагностування, оскільки вібраційні сигнали підшипників кочення містять шум із невідомим відношенням сигнал/шум (ВСП). Це відношення визначає залежність потужності сигналу до потужності шуму й може оцінювати рівень завод. Подібний шум суттєво приховує компоненти вібраційного сигналу, які містять інформацію про наявні пошкодження в механічних вузлах. ВСП зазвичай не піддається контролю, тому періодична імпульсна компонента, що містить інформацію про пошкодження, прихована в шумі та її ефективне виділення є ускладненим. Частина діагностичних методів здатна визначати наявність періодичних імпульсних компонентів у часовій формі вібрації за результатами обчислення коефіцієнта ексцесу з подальшим порівнянням отриманого значення з пороговим значенням, яке дорівнює трьом [9]. Якщо обчислене значення зареєстрованого сигналу менше або дорівнює трьом, то періодична імпульсна компонента відсутня, а значить відсутнє й пошкодження. Однак задеклароване припущення позбавлене будь-яких доказів, які спираються на відповідну теорію.

Короткотривалі імпульсні складові часової форми вібрації підшипників у частотному просторі розповсюджуються вздовж широкої частотної смуги, а збудження з найвищою амплітудою фіксується навкруги резонансного вузькосмугового діапазону. Здебільшого періодичні короткотривалі складові в зареєстрованих вібраційних сигналах підшипників кочення заховані в шумі у відповідних смугах усього частотного діапазону.

Антоні запропонував більш досконалий метод – швидку ексцесограму, яка розглядає тільки обрані частотні смуги для побудови ексцесограми та володіє коротшою тривалістю обчислення [10]. Швидка ексцесограма розраховує спектральний ексцес сигналу на $(f, \Delta f)$ площині. Частота f і частотна роздільність Δf є ключовими для визначення амплітуди спектрального ексцесу, а пошук їх найкращої комбінації дозволяє отримати максимальний ексцес, що й визначає концепцію швидкої ексцесограми. Цей метод для обробки сигналу залучає 1/3-бінарне дерево фільтрів із подальшим конструюванням деревоподібного смугового фільтру. Цей процес складається з таких кроків:

Крок 1. Відбувається поділ спектральних меж. Зареєстрований сигнал знаходиться на нульовому рівні в частотній смузі $\Delta f \in [0, F_s/2]$, де F_s – частота дискретизації. Є дві схеми поділу частотних смуг на цьому кроці:

поділ рівня 0 на дві частини: низьку та високу частоту й отримання рівня 1. Частотні смуги двох частин перебувають у діапазонах $[0, F_s/4]$ та $[F_s/4, F_s/2]$;

поділ рівня 0 на три частини: низьку, середню та високу частоти з формуванням рівня 1,6. Три частотні смуги перебувають у діапазонах $[0, F_s/6]$, $[F_s/6, F_s/3]$ і $[F_s/3, F_s/2]$, що є еквівалентом поділу частотної смуги $[0, F_s/2]$ на три частини.

Дві частини рівня 1 використовують для подальшого поділу. Згідно з першою схемою поділу чотири частини, а саме: низька-низька частота, низька-висока частота, висока-низька частота, висока-висока частота належать рівню 2. Згідно з другою схемою шість частин, а саме: низька-низька частота, низька-середня частота, низька-висока частота, висока-низька частота, висока-середня частота та висока-висока частота належать рівню 2,6. Повторення згаданих кроків розкладань призведе до досягнення межі найнижчої частотної компоненти, що відповідає рівню k $[0, F_s/2^{k+1}]$. Насамкінець отримують відповідну конструкцію з частотним поділом – швидку ексцесограму, що зображена на рис. 1.

Крок 2. Здійснюється відновлення сигналу. Після поділу сигналу в частотному поданні згідно з кроком 1, слід здійснити зворотнє перетворення кожної частотної компоненти для отримання сигналу в часовому поданні. Цей метод залучає виконне перетворення Фур'є та фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ) для розкладання та фільтрації сигналів.

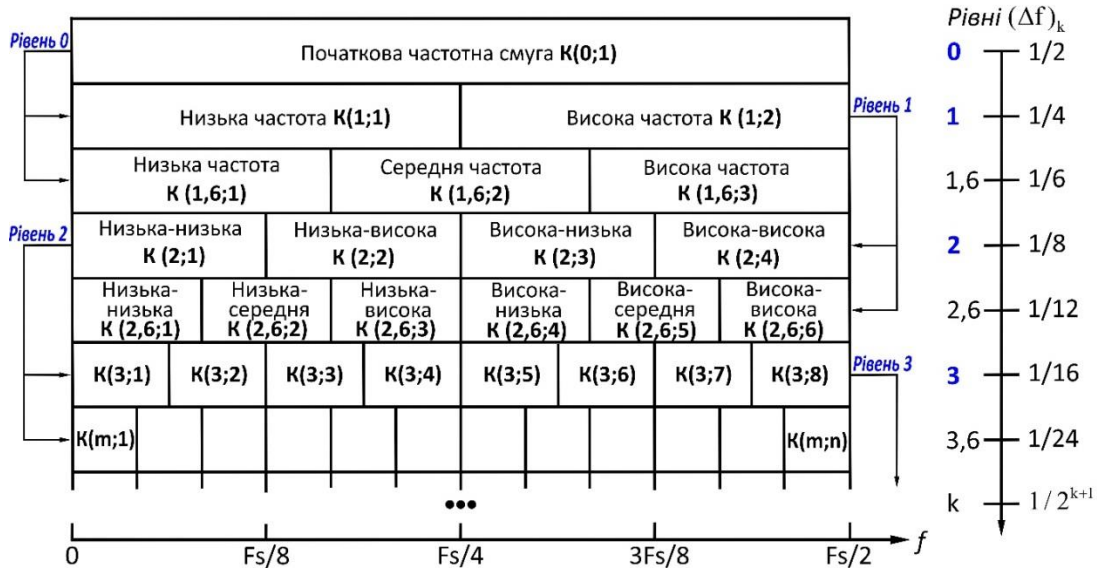


Рис. 1. Частотно-смуговий розподіл із застосуванням 1/3-бінарного дерева фільтрів

Залучають межі двох частотних смуг на рівні 1 для конструювання двох фільтрів: низькочастотного $h_0(n)$ та високочастотного $h_1(n)$

$$\begin{cases} h_0(n) = h(n)e^{\frac{j\pi n}{4}} = h(n) \left[\cos\left(\frac{\pi n}{4}\right) + j \sin\left(\frac{\pi n}{4}\right) \right] \\ h_1(n) = h(n)e^{\frac{j3\pi n}{4}} = h(n) \left[\cos\left(\frac{3\pi n}{4}\right) + j \sin\left(\frac{3\pi n}{4}\right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

де $h(n)$ — низькочастотний КИХ фільтр з частотою зрізу $f_c = 1/8 + \varepsilon$. На цьому етапі сигнал зазнає фільтрації сконструйованими низько- й високочастотними фільтрами для отримання високочастотного та низькочастотного сигналів.

Цей метод використовує три групи меж у частотному поданні на рівні 1,6 для конструювання трьох фільтрів: низькочастотний фільтр, смуговий фільтр, високочастотний фільтр. Насамкінець отримують низькочастотний сигнал, високочастотний сигнал і спектр усередині високочастотного й низькочастотного сигналів. За аналогічним сценарієм із використанням чотирьох меж у частотному поданні отримують рівень 2 для конструювання фільтра й отримання чотирьох компонент сигналу.

Крок 3. Побудова швидкої ексцесограми. Слід розрахувати кожну компоненту згідно з кроком 2 й заповнити відповідні позиції на схемі рис. 1 із залученням різних кольорів для відображення відповідних значень ексцесу.

Крок 4. Пошук відповідної компоненти. Слід відшукати компоненту, яка відповідає максимальному значенню ексцесу та здійснити її демодуляцію з подальшою побудовою спектру обвідної вібрації [11].

Упродовж експериментальних досліджень на першому етапі вібродіагностування здійснювалась реєстрація цифровим самописцем вібраційного сигналу підшипникового вузла електродвигуна мотор-компресора електровоза ЧС7 п'єзоелектричним віброакселерометром у частотному діапазоні 0 – 9 кГц (рис. 2, 3). Частота обертання валу становила 7 Гц.

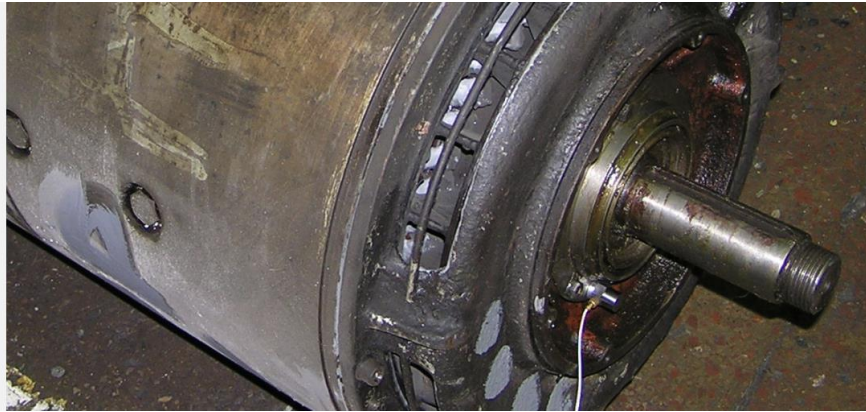


Рис. 2. Електричний двигун мотор-компресора електровоза ЧС7

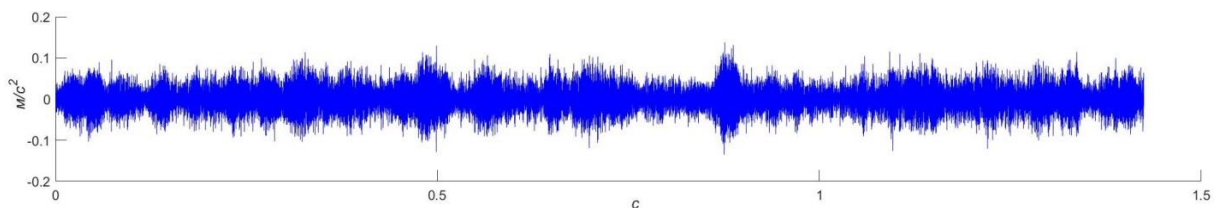


Рис. 3. Часова форма зареєстрованого вібраційного сигналу підшипника кочення

Загальноживаним методом, який демонструє дієвість упродовж багатьох років, є аналіз обвідної вібрації за результатом резонансної демодуляції [8]. Процедурі демодуляції передують побудова та аналіз широкосмугового спектру вібрації (рис. 4).

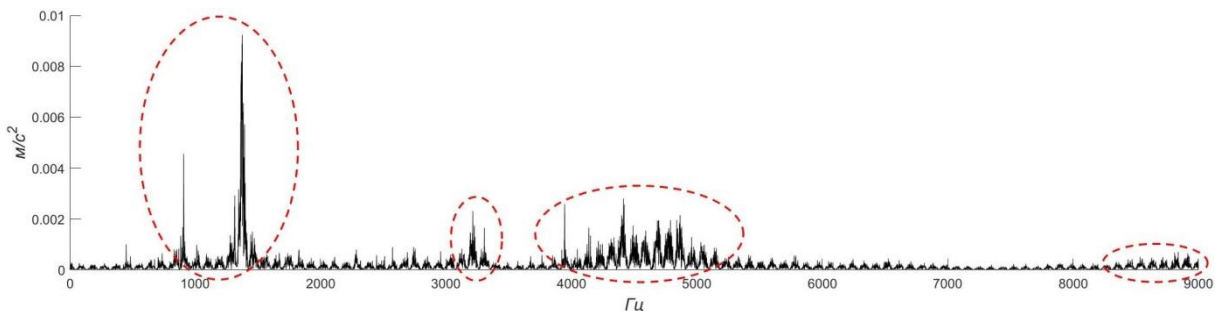


Рис. 4. Широкосмуговий спектр вібрації підшипника кочення

Відомо, що обвідна вібрації демонструє високу чутливість до наявних широкосмугових завад, які спотворюють кінцевий результат діагностування. Частково уникнути подібної несприятливої обставини дозволяє попередній інтуїтивний вибір прийнятної частотної смуги всередині якої наявні резонансні сплески [8]. На рис. 4 відокремлені чотири частотні смуги з відповідними сплесками.

Чотири спектри обвідної вібрації у зазначених діапазонах наведені на рис. 5.

На кожному побудованому спектрі обвідної вібрації наявна велика кількість гармонік (червоні позначки), однак розраховані за класичними виразами [12 – 15] характерні комбінації гармонік, які властиві відповідним пошкодженням елементів підшипника кочення відсутні. Окрема п'ята роторна гармоніка $5 \cdot f_{об}$ (рис. 5 б), перша $f_{зовн}$ й третя $3 \cdot f_{зовн}$ гармоніки частоти перекошування роликів відносно зовнішнього кільця (рис. 5 б, в) не дозволяє встановити вид пошкодження з високою достовірністю.

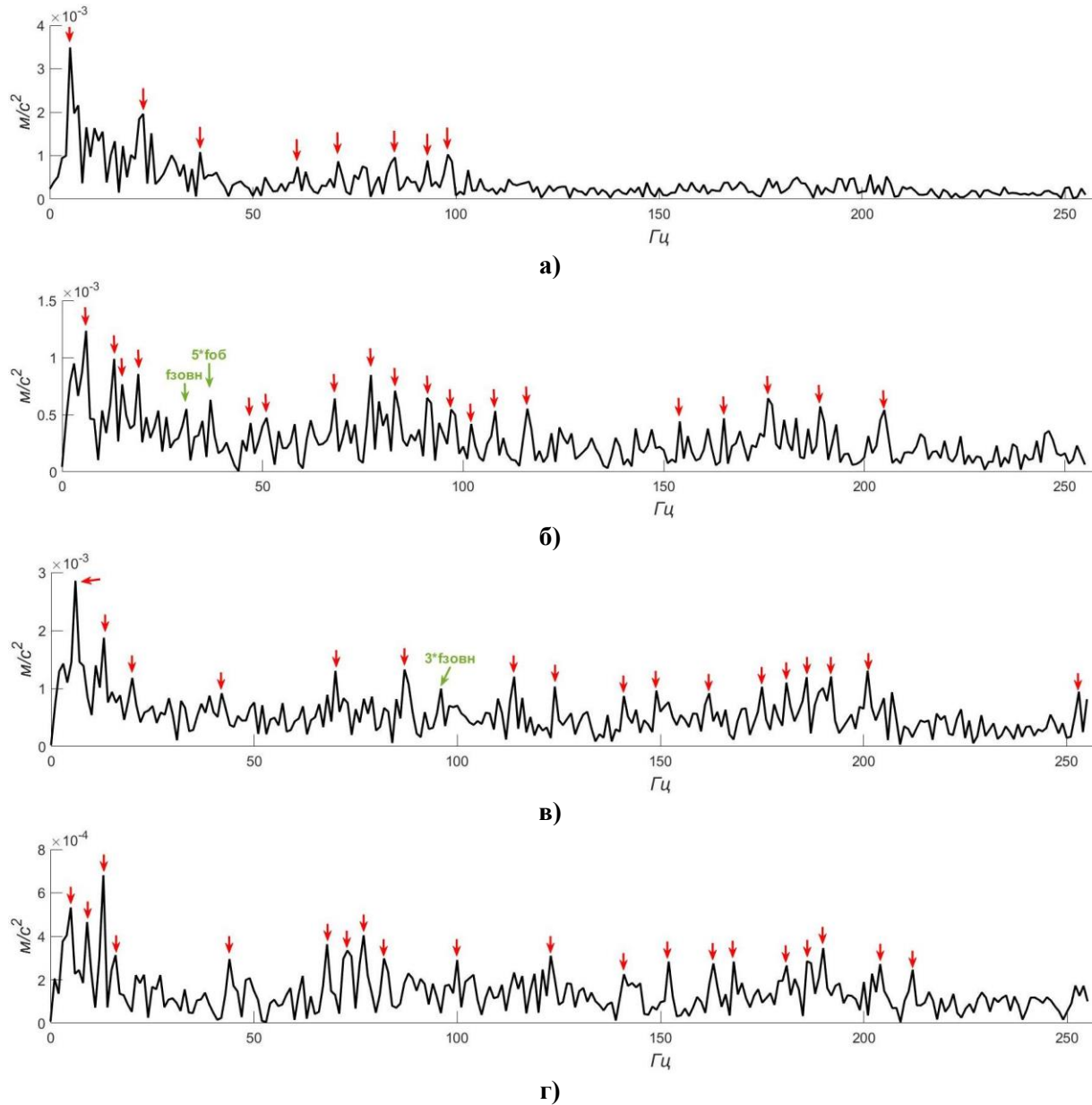


Рис. 5. Спектри обвідної вібрації:

а) у діапазоні 0,9 – 1,5 кГц, б) у діапазоні 3,0 – 3,5 кГц, в) у діапазоні 4,0 – 4,5 кГц, г) у діапазоні 8,4 – 9,0 кГц

Результатом реалізації методу швидкої ексцесограми став розрахунок центральної частоти $f_c = 120$ Гц, ширини частотної смуги $B_w = 240$ Гц у якій ексцес досяг максимального значення $K_{max} = 4,7$ (рис. 6).

В отриманій частотній смузі, де ексцес досяг найвищого значення, відбувалась демодуляція з подальшою побудовою спектру обвідної вібрації (рис. 7). Згідно з [7], для ефективного вібродіагностування підшипників кочення достатньо виявити на спектрі обвідної вібрації до трьох гармонік, які відповідають ознаці пошкодження елементів підшипника. Незважаючи на складність отримання послідовності трьох гармонік, які можуть швидко спадати аж до рівня завад, вдалося виділити комбінацію з трьох гармонік частоти перекочування роликів відносно зовнішнього кільця: $f_{\text{зовн}} = 31$ Гц, $2 \cdot f_{\text{зовн}} = 63$ Гц, $3 \cdot f_{\text{зовн}} = 94$ Гц. Подібна комбінація є діагностичною ознакою пошкодження зовнішнього кільця і є достатньою для реалізації ефективного вібродіагностування.

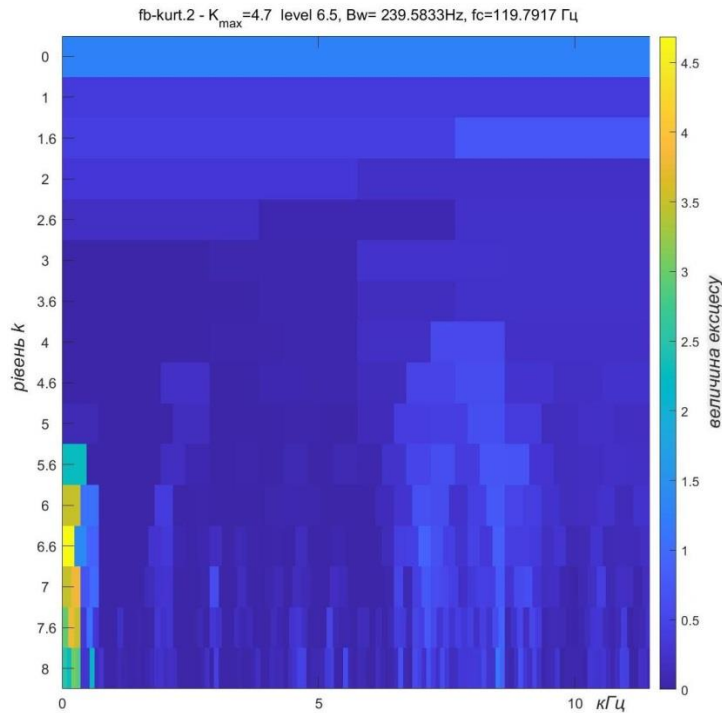


Рис. 6. Швидка ексцесограма зареєстрованої вібрації підшипника кочення

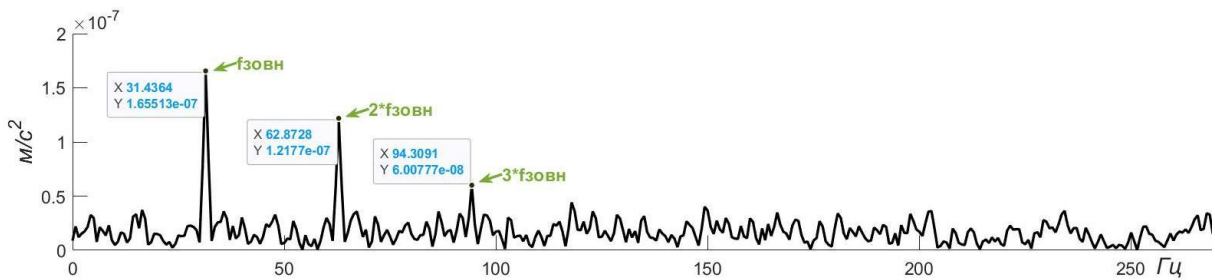


Рис. 7. Спектр обвідної вібрації у діапазоні 0 – 240 Гц

Висновки. Метод швидкої ексцесограми відкидає потребу в апіорних знаннях стосовно об'єкта діагностування, забезпечуючи швидкий вибір оптимальних параметрів фільтру та використання спектрального ексцесу для пошуку короткотривалих імпульсів, а також дозволяє усувати завади завдяки розрахунку центральної частоти й ширини частотної смуги.

Результати вібродіагностування роликового підшипника кочення з використанням емпіричного підходу до вибору частотних смуг для подальшої демодуляції виявились незадовільними. Метод швидкої ексцесограми згідно з найвищим значенням ексцесу розрахував відповідну частотну смугу в діапазоні 0 – 240 Гц із центральною частотою 120 Гц для наступної побудови спектру обвідної

вібрації, де зафіксована діагностична ознака пошкодження зовнішнього кільця підшипника кочення у вигляді послідовності трьох відповідних гармонік.

ЛІТЕРАТУРА

1. Osorio Santander E. J., Silva Neto S. F., Vaz L. A., Monteiro U. A. Using spectral kurtosis for selection of the frequency bandwidth containing the fault signature in rolling bearings. *Marine Systems & Ocean Technology*. 2020. Vol. 15(4). P. 243 – 252. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00084-2>
2. Rongye L., Zhiwen L., Yulin J. Instantaneous frequency estimation for wheelset bearings weak fault signals using second-order synchrosqueezing S-transform with optimally weighted sliding window. *ISA Transactions*. 2021. Vol. 115. P. 218 – 233. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.010>
3. Dwyer R. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain Kurtosis estimation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1983. P. 607 – 610.
4. Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20(2). P. 282 – 307. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.001>
5. Antoni J., Randall R. B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20(2). P. 308. – 331. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.002>
6. Ren Y., Li W., Zhang B., Zhu Z., Jiang F. Fault diagnosis of rolling bearings based on improved kurtogram in varying speed condition. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(6). P. 1157. <https://doi.org/10.3390/app9061157>
7. Barszcz T., Jabł ński A. A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25(1). P. 431 – 451. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.05.018>
8. Guo Y., Na J., Li B., Fung R-F. Envelope extraction based dimension reduction for independent component analysis in fault diagnosis of rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*. 2014. Vol. 333(13). P. 2983 – 2994. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.038>
9. Dyer D., Stewart R. M. Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Journal of Mechanical Design*. 1978. Vol. 100(2). P. 229 – 235. <https://doi.org/10.1115/1.3453905>
10. Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21(1). P. 108 – 124. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.12.002>
11. Xu Y., Zhang K., Ma C., Cui L., Tian W. Adaptive Kurtogram and its applications in rolling bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 130. P. 87 – 107. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.05.003>
12. Gupta P., Pradhan M. K. Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4(2). P. 2085 – 2094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>
13. Jena D. P., Panigrahi S. N. Precise measurement of defect width in tapered roller bearing using vibration signal. *Measurement*. 2014. Vol. 55. P. 39 – 50. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.023>
14. Saruhan H., Sandemir S., Çiçek A., Uygur I. Vibration analysis of rolling element bearings defects. *Journal of Applied Research and Technology*. 2014. Vol. 12(3). P. 384 — 395. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71620-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71620-7)
15. Tyagi S., Panigrahi S. K. An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2017. Vol. 4(4). P. 305 – 317. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.05.002>

REFERENCES

1. Osorio Santander E. J., Silva Neto S. F., Vaz L. A., Monteiro U. A. (2020). Using spectral kurtosis for selection of the frequency bandwidth containing the fault signature in rolling bearings. *Marine Systems & Ocean Technology*. Vol. 15(4). 243 – 252. <https://doi.org/10.1007/s40868-020-00084-2>
2. Rongye L., Zhiwen L., Yulin J. (2021). Instantaneous frequency estimation for wheelset bearings weak fault signals using second-order synchrosqueezing S-transform with optimally weighted sliding window. *ISA Transactions*, Vol. 115. 218 – 233. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.01.010>
3. Dwyer R. (1983). Detection of non-Gaussian signals by frequency domain Kurtosis estimation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 607 – 610.
4. Antoni J. (2006). The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 20(2). 282 — 307. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.001>
5. Antoni J., Randall R. B. (2006). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 20(2). 308. – 331. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.002>
6. Ren Y., Li W., Zhang B., Zhu Z., Jiang F. (2019). Fault diagnosis of rolling bearings based on improved kurtogram in varying speed condition. *Applied Sciences*. Vol. 9(6). 1157. <https://doi.org/10.3390/app9061157>

7. Barszcz T., Jabł ouski A. (2011). A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 25(1). 431 – 451. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.05.018>
8. Guo Y., Na J., Li B., Fung R-F. (2014). Envelope extraction based dimension reduction for independent component analysis in fault diagnosis of rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 333(13). 2983 – 2994. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.02.038>
9. Dyer D., Stewart R. M. (1978). Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis. *Journal of Mechanical Design*. Vol. 100(2). 229 – 235. <https://doi.org/10.1115/1.3453905>
10. Antoni J. (2007) Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 21(1). 108 – 124. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.12.002>
11. Xu Y., Zhang K., Ma C., Cui L., Tian W. (2019). Adaptive Kurtogram and its applications in rolling bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 130. 87 – 107. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.05.003>
12. Gupta P., Pradhan M. K. (2017). Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 4(2). 2085 – 2094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>
13. Jena D. P., Panigrahi S. N. (2014). Precise Measurement of Defect Width in Tapered Roller Bearing using Vibration Signal. *Measurement*. Vol. 55. 39 – 50. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.023>
14. Saruhan H., Sandemir S., Çiçek A., Uygur I. (2014). Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects. *Journal of Applied Research and Technology*. Vol. 12(3). 384 – 395. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71620-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71620-7)
15. Tyagi S., Panigrahi S. K. (2017). An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis. *Journal of Computational Design and Engineering*. Vol. 4(4). 305 – 317. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.05.002>

Serhii Mykhalkiv¹, Denys Zhalkin², Sergey Zhalkin³, Vasyl Ravlyuk⁴

¹Associate Professor of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0425-6295>

²Professor of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3450-160X>

³Professor of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0089-3489>

⁴Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

THE IDENTIFICATION OF INFORMATIVE FEATURES BY THE FAST KURTOGRAM TECHNIQUE FOR THE VIBRODIAGNOSTICS OF ROLLING BEARINGS

The paper deals with the properties of the Fast Kurtogram technique for the vibrodiagnostics of rolling bearings of electric motor. Taking into account the disadvantages of the classic tools of vibrodiagnostics in the time domain, the proper frequency band selection procedure was suggested for the further demodulation and envelope spectrum extraction. Fast Kurtogram represents the spectral kurtosis value of the signal on the $(f, \Delta f)$ plane. The frequency and the frequency resolution are used as the key functions to determine the magnitude of the spectral kurtosis. The best combination makes the kurtosis maximum. During the experimental research the vibration of the rolling bearing of electric motor of electric locomotive ChS7 series was acquired. The broadband spectrum in the frequency range 0 – 9 kHz was extracted and with the help of empiric approach the four frequency bands with resonance excitations were selected. None of four envelope spectra did not have any informative features among numerous random components. After the selection of a proper center frequency and the frequency band by the Fast Kurtogram, the extracted envelope spectrum has shown the series of harmonics related to the outer race faults.

Keywords: amplitude, band, bearing, diagnostics, envelope, frequency, kurtosis, motor, spectrum, vibration

Ivan Kulbovskyi¹, Halyna Holub^{2*}, Svitlana Sapronova³, Snezhina Andonova⁴

¹Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine

²Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine

³Department of Wagons and Carriage Management, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine

⁴Faculty of Engineering, South-West University "Neofit Rilski", Blagoevgrad, 2700, Bulgaria

*Corresponding author: golub_gm@gsuite.duit.edu.ua

CONCEPTUAL APPROACHES FOR DETERMINATION OF PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL POTENTIAL IN TRAFFIC ROLLING STOCK PROJECTS

The article considers the problems of managing the efficiency of use of production and technological potential of rolling stock. It is investigated that in order to improve the efficiency of functioning it is necessary to determine the conceptual approaches of the components of the processes of maintenance and operation of rolling stock. This requires the use of technical means and methods of monitoring the technical condition of the wheelsets of the rolling stock.

It is investigated that the possibility of successful solution of one of the important tasks of the railway industry risk of improving the quality of repair and restoration works and prolonging the life cycle of rolling stock is possible by ensuring control over finished products and improving process management.

It is determined that the form of the concept of conceptual approaches to determining the essence of production and technological potential of maintenance and operation of traction rolling stock is a model of the life cycle of maintenance and development of its operation.

A detailed analysis of the advantages and disadvantages of existing methods of quality control of repair of wheelsets of railway rolling stock. Ways to increase the life cycle of wheelsets are considered. The mathematical model of a complex estimation of quality of repair of wheel pairs that will increase efficiency of operational work of a rolling stock and safety of transport process is offered.

The paper considers the components of conceptual approaches to improving the functioning of production and technological potential of the transport complex in the projects of traction rolling stock.

Keywords: traction rolling stock, model, diagnostic methods, technical means. production potential, information technology.

Introduction. Improving the production and technological processes of the primary links of the transport complex requires a focus on specific production conditions and economic ties that have been established. Today, the level of functioning of the transport complex in a market economy is largely determined by the efficiency of their production and technological potential. Production and technological potential has a complex structure that includes resource and functional components. For their effective use it is necessary to provide management on the basis of modern understanding of essence and definition of potential of the enterprise [1-3].

Therefore, a necessary condition for solving this problem is the study of conceptual approaches to the definition and essence of production and technological potential in the projects of traction rolling stock, its components.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to analyze the nature and determine the components of the production and technological potential of the processes of maintenance and operation of traction rolling stock.

Objectives of the study: 1. To analyze the problems of managing the efficiency of production and technological potential of traction rolling stock. 2. Investigate the model of the quality control process for the repair of wheelsets, which is based on quantitative indicators that characterize the technological process of repair in terms of workload and quality indicators. 3. Investigate the life cycle model of support and development of traction rolling stock. 4. To propose the components of conceptual approaches to the definition and essence of the production and technological potential of the transport complex in the projects of traction rolling stock.

Materials and methods of research. To study the effectiveness of the use of production and technological potential of the traction rolling stock of the transport complex, it is necessary to determine the conceptual approaches of the components of the processes of maintenance and operation of rolling stock. This requires the use of technical means and methods of input, interoperative and output non-destructive testing of the technical condition of wheelsets. Factors such as a significant percentage of worn-out rolling stock, increased repair quality requirements on the one hand, and the need to increase productivity on the other, require the development of new effective methods of non-destructive testing of wheelsets, components and rolling stock [5,6].

Currently, during the defectoscopy of the elements of the wheelsets of the rolling stock of railway transport, such control methods as magnetic powder, eddy current, ultrasonic control methods. However, with the various methods of non-destructive testing used in defectoscopy, there are still omissions of dangerous defects of wheel pairs (cracks in the disc, ridges and rims of the wheel, cracks in the middle, neck and insidious part of the axle) and quite often. The main reasons for the omission of defects are the low level of automation of the control process. In addition, the control process by the methods mentioned above requires prior preparation of the control surface, scanning of the entire monitored surface with sensors and time consuming [7].

Therefore, the creation of new conceptual approaches to methods of control and diagnosis of wheelsets is a necessary condition for improving the safety of trains and ensuring efficient operation at all stages of the life cycle of wheelsets of rolling stock. The creation of these methods is the basis for the development of an automated control system for wheelsets.

The modern technological process of repairing wheelsets as an object of control is characterized by the following factors: complexity, multifactorial, vague manifestation of causal relations in the organization of structural units of the industry, distribution of target functions in time and space, a wide range of materials, parts and components. are in constant contact with technological equipment. The main resources to increase the productivity of wheel pair repair are the modernization of repair quality control technology and the introduction of modern measuring equipment based on information technology and the development of a database of automated control systems for repair processes.

The use of control systems in the process of repairing wheelsets to ensure the control of finished products and increase the efficiency of process management opens the possibility [9] of successfully solving one of the important tasks of the railway industry risk of improving the quality of repair and restoration work. Therefore, the form of the concept of conceptual approaches to determining the essence of the production and technological potential of maintenance and operation of traction rolling stock is a model of the life cycle of maintenance and development of traction rolling stock (Fig. 1)

During the study, the control systems of technological parameters mentioned above were analyzed, as well as the parameters of the quality of wheel pair repair in the technological process [4]. Based on the analysis, a mathematical model of the process of quality control of repair of wheelsets of rolling stock was proposed, which will increase the energy efficiency of repair [8,15].

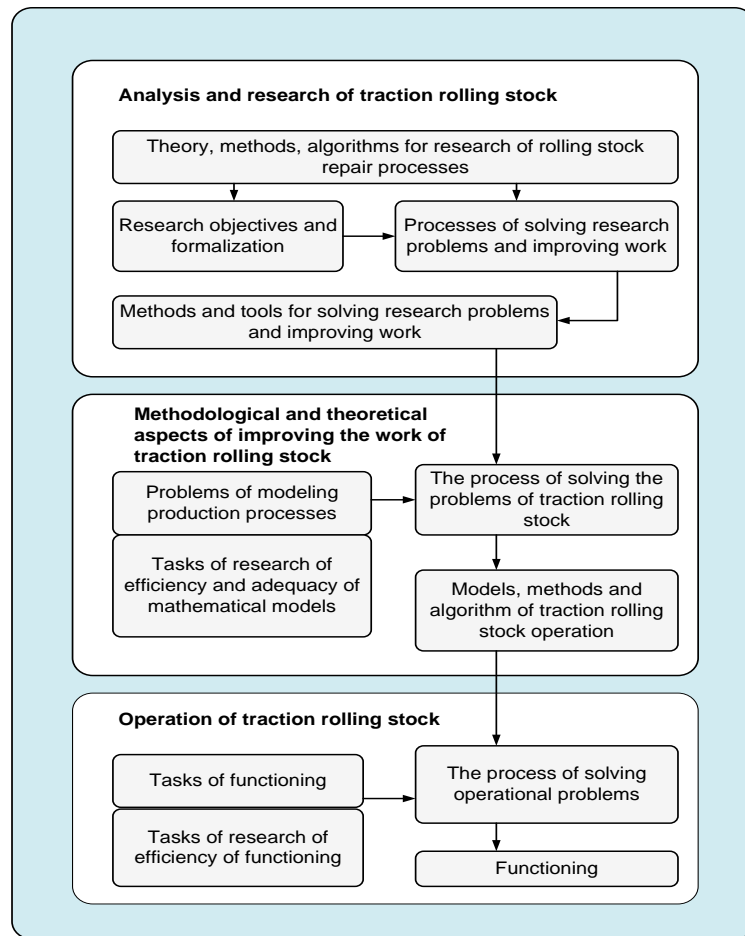


Fig.1. Life cycle model of support and development of traction rolling stock operation

This mathematical model of the process of quality control of wheel pair repair, based on quantitative indicators that characterize the technological process of repair in terms of volume of work and quality indicators. These indicators characterize the wheelset as a finished product in terms of its suitability for operating conditions and compliance of technical parameters of the wheelset to the requirements of regulatory and technical documentation, which is the basis of working condition [10,16].

The model is based on indicators of quality of repair, namely the law of distribution of random variables which characterize process of repair according to conditions of observance of technological discipline, qualification of workers and a technical condition of technical means.

$$F_i = \frac{(\sum_{j=1}^n \frac{h_z}{h_m})}{n} = \sum_{j=1}^n G_j / n, \quad (1)$$

where n – the number of operations;

h_m – normalized complex assessment of the j -th operation;

h_z – actual comprehensive assessment of the j -th operation;

G_j – coefficient that takes into account the completeness of operations on the quality of repair of wheelsets of rolling stock. In practice, the coefficient depends on the type of operations performed during the repair of wheelsets.

The model of comprehensive assessment of the quality of repair of wheelsets and the life cycle model of support and development of traction rolling stock is the basis of the conceptual approach to determining the essence of production and technological potential of maintenance and operation of traction rolling stock. .

Based on this, the article investigates the components of conceptual approaches to improving the functioning of production and technological potential of the transport complex in the projects of traction rolling stock.

According to the first component of the conceptual approach of production and technological potential, it is proposed to understand the real volume of work provided that the full amount of resources, which characterizes the available capabilities of the transport complex [11-13].

The second component of the conceptual approach of production and technological potential is characterized as a system of economic relations that arises between economic entities of different economic levels to form a production result with the most efficient use of transport resources, the current level of technical means and methods of control and diagnostics of rolling stock.

According to the third component of the conceptual approach of production and technological potential is understood the potential volume of work performed, the potential of fixed assets. Potential opportunities for the use of material and labor resources. According to this component, the production and technological potential does not include information, investment and innovation economic resources that provide not only the use but also the development of production potential.

The fourth component means the amount of work in certain units of labor costs for a limited period of time the main potential of employees using existing production assets in two modes of operation and optimization of processes in the transport complex [14].

The fifth component of the conceptual approach of production and technological potential means the ability of the enterprise to perform the required amount of work for maintenance and operation of traction rolling stock.

When studying the components of conceptual approaches to improve the functioning of production and technological potential of the transport complex in the projects of traction rolling stock should also consider their main shortcomings, which should be avoided when defining this concept, which is the basis for further research.

Conclusions. The problem of management of efficiency of use of production and technological potential of traction rolling stock is analyzed. The mathematical model of the process of quality control of wheel pair repair, which is based on quantitative indicators that characterize the technological process of repair in terms of workload and quality indicators, is studied and proposed. The model of the life cycle of support and development of traction rolling stock operation is presented. The components of conceptual approaches to the definition and essence of the production and technological potential of the transport complex in the projects of traction rolling stock are proposed, which will increase the indicators of the main aspects of the production and technological potential.

REFERENCES

1. Voronkova A.E. (2000). Strategicheskoye upravleniye konkurentosposobnym potentsialom predpriyatiya: diagnostika i organizatsiya [Strategic management of the competitive potential of an enterprise: diagnostics and organization]. Lugansk: Publishing House of the East Ukrainian National University [in Russian].
2. Blokhin, L.M., & Burichenko, M.Yu. (2003). Statychna dynamiky system upravlinnya [Static dynamics of control systems]. Kyiv: National Aviation University [in Ukrainian].
3. Levkovets, P.R., Gedz, Y.M., & Kanarchuk, O.V. (2002). Systemna efektyvnist' na transporti. Metody, modeli i statelyi [Static dynamics of control systems]. Kyiv: National transport University [in Ukrainian].
4. Gorbachev, P.F., & Dmitriev, I.A. (2002). Osnovy teorii transportnykh sistem [Fundamentals of the theory of transport systems]. Kharkiv: KhNADU [in Russian].
5. Kulbovskiy, I., Holub, H., Melenchuk, V., & Chmyr, V. (2021). Development of a system model of technical operation management intransport infrastructure projects. *Transport systems and technologies*, (37), 196-203. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-19>.

6. H. Holub, I. Kulbovskiy, Yu. Dudnyk, O. Melnychenko, M. Tkachuk, Val. Kharuta, Iu. Shcherbyna. Research of the Model of the Life Cycle of Investment Projects of Subway Rolling Stock. 2021. 25th international scientific conference *TRANSPORT MEANS 2021*, 3, 984.
7. Bushuyev, S.D., Bushuyeva, N.S., Babayev, I.A., Yakovenko V.B., et al. (2010). Kreativnyye tekhnologii upravleniya proyektami i programmami [Creative technologies for project and program management]. Kiev: Summit-Book [in Russian].
8. Kulbovskiy I., Sapronova, S., Holub, H., Tkachenko, V., & Musorina, M. (2019). Modeling of Management Strategies for Manufacturing Technological Processes in Metro Power Supply Projects. *TRANSBALTICA 2021: TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology*, 211-219.
9. Babayev, V.M. Upravlinnya proektamy: Navchal'nyy posibnyk dlya studentiv spetsial'nosti «Upravlinnya proektamy» [Project Management: Textbook for students majoring in «Project Management»]. Kharkiv: KNAMG [in Ukrainian].
10. Melnychenko, O.I., Kulbovskiy, I.I., Holub, H., & Kharuta, V. (2020) Aspekty metrolohichnoho zabezpechennya tekhnolohichnykh protsesiv informatsiyno-vymiryval'nykh system v proektakh infrastruktury transportu [Aspects of metrological support of technological processes of information and measuring systems in transport infrastructure projects]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu: Tekhnichni nauky - Bulletin of the National Transport University: Technical Sciences*, 1 (46), 226-235 [in Ukrainian].
11. Arefieva E.V., Mirgorodskaya A.P. (2012). Analiz tendentsiy ispol'zovaniya resursnogo potentsiala predpriyatiy [Analysis of trends in the use of the resource potential of enterprises]. *Ekonomika i upravleniye - Economics and Management*, 2, 8-10 [in Russian]
12. Malyarets L.M., Norik L.O. (2009). Ekonomiko-matematychni aspekty diahnostryky konkurentospromozhnosti pidpryyemstva [Economic and mathematical aspects of diagnostics of enterprise competitiveness]. Kharkiv: KhNEU [in Ukrainian].
13. Zhen, Yuy., Fomina, V. (1994). Otsenka effektivnosti investitsionnykh proyektov v usloviyakh neopredelennosti informatsii [Evaluation of the effectiveness of investment projects in the conditions of uncertainty of information]. *Energy construction* [in Russian].
14. Shcherbak, A. (2013). Informatsiynе zabezpechennya investytsiynoyi diyal'nosti na pidpryyemstvi [Information support of investment activity at the enterprise]. *Aktual'ni problemy ekonomiky - Current economic problems*, 3, 103-107 [in Ukrainian].
15. Gorobchenko, O., Nevedrov, O., Nezlina, O., & Tkachenko, V. (2021). Rozrobka -metodu klasteryzatsiyi poyiznykh sytuatsiy [Development -method of clustering train situations]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 2021, (37), 187-195 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-18>
16. Gorobchenko O. (2021). Teoretychni osnovy otsinky informatyvnosti oznak poyiznoyi sytuatsiyi dlya roboty intelektual'nykh system keruvannya lokomotyvom [Theoretical bases of estimation of informativeness of signs of a train situation for work of intelligent locomotive control systems]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, (38), 223-231 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-220-21>

Іван Кульбовський¹, Галина Голуб^{2*}, Світлана Сапронова³, Snezhina Andonova⁴

¹Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

²Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

³Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

⁴Faculty of Engineering, South-West University «Neofit Rilski», Blagoevgrad, 2700, Bulgaria

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВИРОБНИЧО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ПРОЄКТАХ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

У статті розглянуто проблеми управління ефективності використання виробничо-технологічного потенціалу рухомого складу. Досліджено, що для вдосконалення ефективності функціонування необхідно визначити концептуальні підходи складових процесів технічного обслуговування та експлуатації рухомого складу. Для цього необхідно застосування технічних засобів та методів контролю технічного стану колісних пар рухомого тягового складу.

Досліджено, що можливість успішного рішення однієї з важливих задач залізничної галузі ризику підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт та продовження життєвого циклу

рухомого складу можливе за рахунок забезпечення контролю за випуском готової продукції і підвищення ефективності управління технологічним процесом.

Визначено, що формою концепції концептуальних підходів до визначення сутності виробничо-технологічного потенціалу технічного обслуговування та експлуатації тягового рухомого складу є модель життєвого циклу підтримки та розвитку його функціонування.

Проведено детальний аналіз переваг та недоліків наявних методів контролю якості ремонту колісних пар рухомого складу залізничного транспорту. Розглянуті шляхи підвищення експлуатації життєвого циклу колісних пар. Запропоновано математичну модель комплексної оцінки якості ремонту колісних пар, що підвищить ефективність експлуатаційної роботи рухомого складу та безаварійність перевізного процесу.

У роботі розглянуто складові концептуальних підходів до покращення функціонування виробничо-технологічного потенціалу транспортного комплексу в проектах тягового рухомого складу.

Ключові слова: *тяговий рухомий склад, модель, методи діагностики, технічні засоби, виробничий потенціал, інформаційні технології.*

Олексій Фомін¹, Альона Ловська², Анна Фоміна³, Павло Прокопенко⁴

¹Професор кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

²Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

³Науковий співробітник, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, пр. Центральний, 59-а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

⁴Аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-6590>

* Автор, відповідальний за листування: alyonalovskaya.vagons@gmail.com

РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ КРИШКИ ЛЮКА НАПІВВАГОНА ІЗ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

У статті наведені результати розрахунку міцності удосконаленої конструкції кришки люка напіввагона. Особливістю удосконалення є виготовлення листа із полімерного композиційного матеріалу, а обв'язування – із П-подібного профілю, перекритого горизонтальним листом. При цьому момент опору перерізу удосконаленої конструкції обв'язування відносно поперечної осі збільшується на 17,5% у порівнянні із типовим перерізом. Важливо сказати, що запропонована кришка люка має масу на 12% нижчу за типову конструкцію.

Для визначення основних показників міцності запропонованої конструкції кришки люка напіввагона проведено розрахунок при основних схемах її навантаження. Встановлено, що з урахуванням запропонованих рішень максимальні напруження в листі кришки люка на 25% нижчі ніж у типовій конструкції, а в обв'язуванні – на 10%.

Проведені дослідження сприятимуть зменшенню пошкоджень кришок люків в експлуатації та витрат на утримання напіввагонів, а також будуть корисними напрацюваннями при проектуванні їх сучасних конструкцій.

Ключові слова: транспортна механіка, напіввагон, кришка люка, міцність, навантаженість, збереження напіввагонів.

Вступ. Одним з основних факторів успішного розвитку економіки є злагоджене функціонування транспортної галузі. Відомо, що однією з найбільш перспективних складових транспортної інфраструктури є залізничний транспорт.

Значну частку від загального вантажообігу вантажів, які перевозяться залізницею складають насипні та навалювальні. Перевезення таких вантажів здійснюється здебільшого у напіввагонах. При цьому одним з найбільш пошкоджуваних елементів несучих конструкцій напіввагонів є кришки люків (рис. 1). Наприклад, за даними 2019 р. лише за несправністю заборів кришок люків поточний ремонт пройшли 35750 вагонів. Ці дані визначені на підставі обробки даних ПЮЦ УЗ.

Така обставина зумовлює необхідність додаткових капітальних вкладень на ремонт складових напіввагонів, а відповідно викликає їх вимушений простій.

У зв'язку з цим необхідним є створення заходів, спрямованих на покращення показників міцності кришок люків напіввагонів при експлуатаційних режимах.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для забезпечення міцності кришки люка напіввагона авторами роботи [1] запропоновано заходи щодо її удосконалення. Особливістю кришки люка є посилене виконання обв'язування, гладкий лист та використання литих кронштейнів. Також у конструкції є додаткові розкоси для забезпечення достатньої міцності. Однак запропоноване удосконалення спрямоване на посилення обв'язування та вузлів кріплення кришки люка. При цьому авторами не запропоновано заходів щодо посилення листа кришки люка.

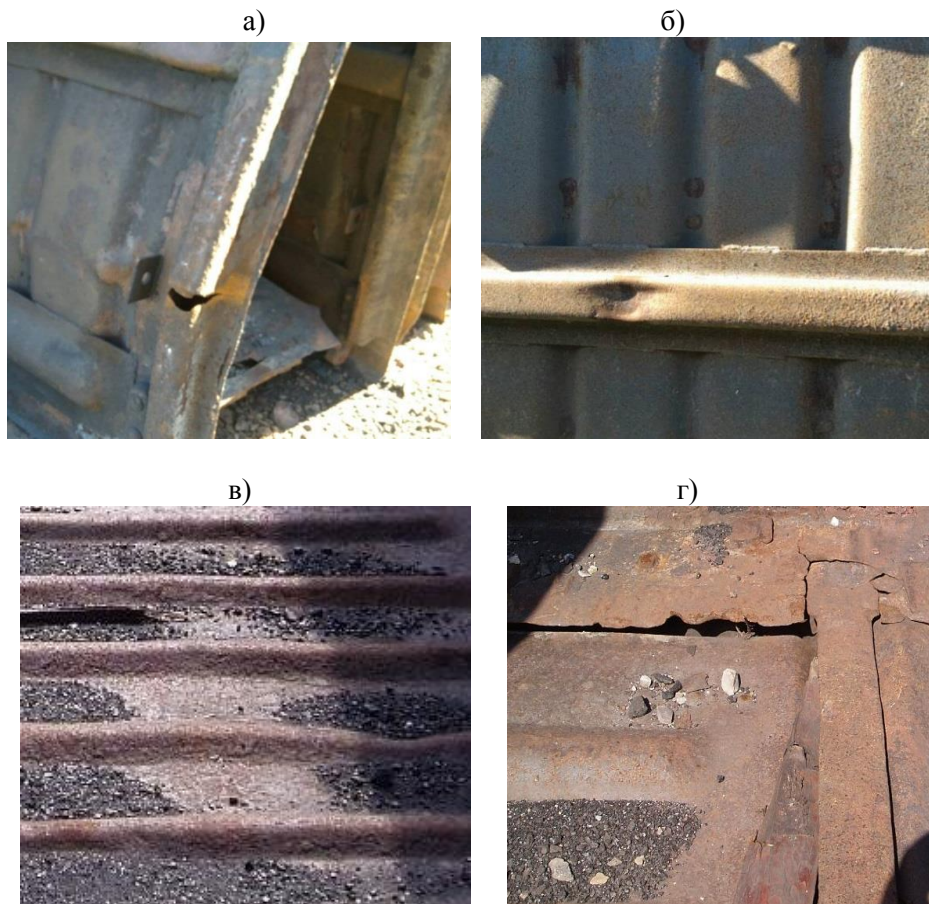


Рис. 1. Пошкодження кришок люків напіввагонів
а) тріщина в обв'язуванні ; б) деформація обв'язування;
в) деформація листа; г) корозійні пошкодження

Особливості проведення ресурсних випробувань швів приварки елементів кріплення кришки люка у напіввагоні з метою визначення їх міцності висвітлюються в роботі [2]. Встановлено, що шви приварки державок петель та планок-державок кришки люка в напіввагоні витримали прийнятий для кришки люка ресурс експлуатації протягом часу від будівництва до капітального ремонту. Разом з цим у роботі не проводилося досліджень щодо визначення міцності кришки люка, а акцент зроблений на складових її конструкції.

Визначення основних показників міцності кришки люка універсального напіввагона при падінні вантажу на неї приводиться в роботі [3]. Результати дослідження встановили, що типова конструкція кришки люка не відповідає умовам міцності, оскільки при завданому

режимі мають місце її пошкодження. Однак авторами не запропоновано заходів щодо удосконалення конструкції кришки люка для забезпечення її міцності в експлуатації.

Обґрунтування використання полімерних композитних матеріалів у вагонобудуванні приводиться в роботі [4]. При цьому запропоновані матеріали передбачається застосовувати для настилу підлоги вагона. Висвітлені результати експериментальних досліджень за методом пресування композиту у формі. Разом з цим авторами не проводиться дослідження впровадження даних матеріалів в кришки люків напіввагонів.

В роботі [5] висвітлено перспективи застосування полімерних композиційних матеріалів у вагонобудуванні. Наведено особливості застосування таких матеріалів стосовно кришки люка напіввагона. Представлені результати розрахунку на міцність кришки люка. Однак при цьому авторами проводився достатньо спрощений її розрахунок на міцність.

В роботі [6] наведено особливості удосконалення кришки люка напіввагона. Авторами запропоновано заміну профілю листа, який у частині кріплення має ступінчасту форму на більш раціональний профіль. Наведені результати розрахунків на міцність кришки люка. Разом з цим запропоноване удосконалення не сприяє зменшенню корозійних пошкоджень кришок люків у експлуатації.

Для забезпечення міцності кришки люка напіввагона в роботах [7, 8] запропоновано заходи щодо її удосконалення. Особливістю кришки люка є те, що вона складається з двох листів, які за периметром взаємодіють через Ш-подібне обв'язування. Простір, який утворюють листи та обв'язування, а також по периметру кришки люка, заповнений пружно (пружно-в'язкою) речовиною. Разом з цим така конструкція кришки люка викликає складнощі при технічному обслуговуванні і ремонті.

Аналіз літературних джерел [1 – 8] дозволяє зробити висновок, що питання удосконалення кришок люків напіввагонів для забезпечення їх міцності у експлуатації є досить актуальними і потребують проведення відповідних досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є висвітлення результатів розрахунку міцності удосконаленої конструкції кришки люка напіввагона із полімерного композиційного матеріалу. Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

запропонувати заходи щодо удосконалення конструкції кришки люка напіввагона;

провести розрахунок на міцність кришки люка напіввагона при основних експлуатаційних режимах навантаження.

Матеріали та методи дослідження. Типова конструкція кришки люка напіввагона складається з листа 1, до якого кріпиться обв'язування 2, запірні кронштейни 3 та петлі 4 (рис. 2).

Для забезпечення міцності кришки люка при експлуатаційних режимах навантаження пропонується виготовлення листа із полімерного композиційного матеріалу, а обв'язування – із П-подібного профілю, перекритого горизонтальним листом (рис. 3). В зонах взаємодії П-подібного профілю з горизонтальним листом є можливим створення округлення для зменшення концентрації напружень.

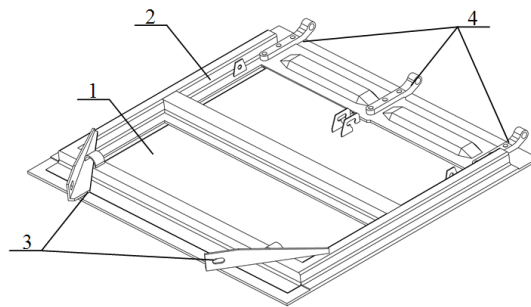


Рис. 2. Кришка люка напіввагона

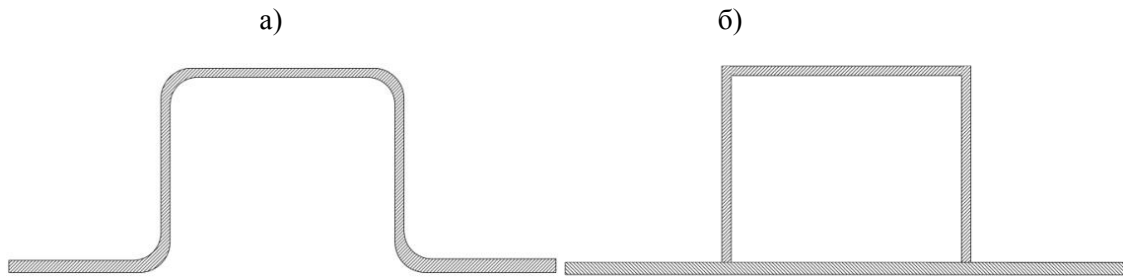


Рис. 3. Переріз обв'язування кришки люка
а) типове; б) удосконалене

При цьому момент опору перерізу удосконаленої конструкції обв'язування відносно осі Y (рис. 4) збільшується на 17,5% у порівнянні з типовим перерізом. Важливо сказати, що запропонована кришка люка має масу на 12% меншу за типову конструкцію.

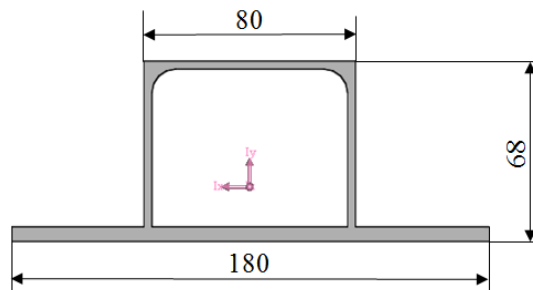


Рис. 4. Основні геометричні розміри перетину обв'язування

Для визначення міцності кришки люка проведено розрахунок в програмному комплексі SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів. Графічні роботи здійснені в програмному комплексі SolidWorks. Просторову модель кришки люка наведено на рис. 5.

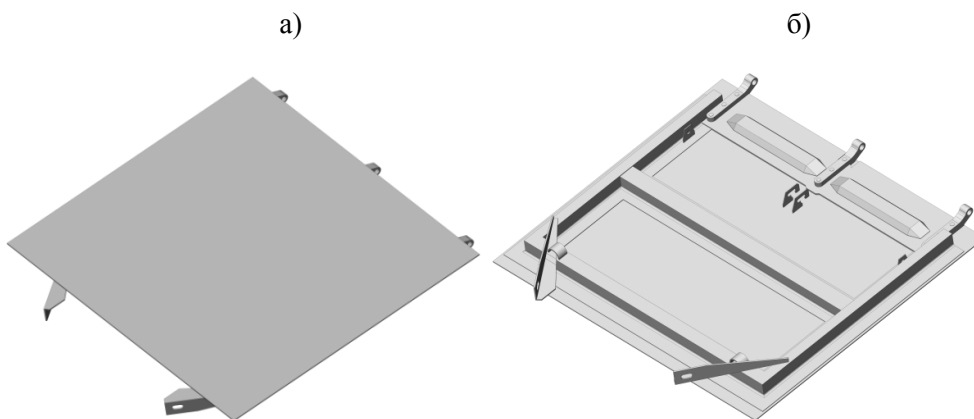


Рис. 5. Удосконалена кришка люка напіввагона
а) вид зверху; б) вид знизу

В рамках даної статті проведено визначення міцності кришки люка при таких режимах навантаження [9, 10]:

дія розподіленого в центрі кришки люка за площею 25x25 см навантаження у 50 кН (I схема);

дія за площею кришки люка рівномірнорозподіленого навантаження у 69,9 кН, яке складається з сили ваги бруто кришки люка та динамічного навантаження (II схема).

Оскільки каркас кришки люка є металевим, а лист – із полімерного композиційного матеріалу, то вони розраховувалися окремо.

Основні міцнісні характеристики матеріалу листа зведені до табл. 1. Враховано, що він має лінійні пружні ортотропні властивості.

Таблиця 1. Основні міцнісні характеристики матеріалу листа

Назва параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	$2,42 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуасона	0,394
Модуль зсуву, МПа	318,9
Межа міцності в напрямку волокон, МПа	1100 – 1300
Межа міцності в поперечному напрямку волокон, МПа	650

Як розрахунковий використаний критерій максимальних напружень [11, 12]. Закріплення листа здійснювалося в зонах його взаємодії з каркасом. При цьому використовувалося жорстке защемлення. Лист розглядався у вигляді одношарової оболонки. Для прикладення навантаження за центром листа на ньому встановлювалася накладка, яка імітувала зону дії навантаження на нього.

При складанні скінчено-елементної моделі використані ізопараметричні тетраедри [13 – 15]. Кількість елементів сітки дорівнює 127876, вузлів – 63940. Максимальний розмір елемента сітки дорівнює 120 мм, мінімальний – 10 мм.

При складанні розрахункової схеми кришки люка за її центром прикладалося навантаження P_s у 50 кН (рис. 6).

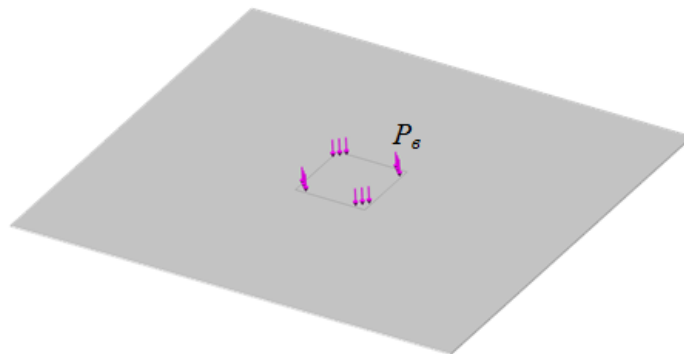


Рис. 6. Розрахункова схема листа кришки люка

Результати розрахунків показали, що максимальні напруження виникають в середній частині кришки люка та складають 102,3 МПа, тобто не перевищують допустимих значень [9, 10] (рис. 7, 8). Отримані напруження на 25% нижчі ніж у типовій конструкції кришки люка.

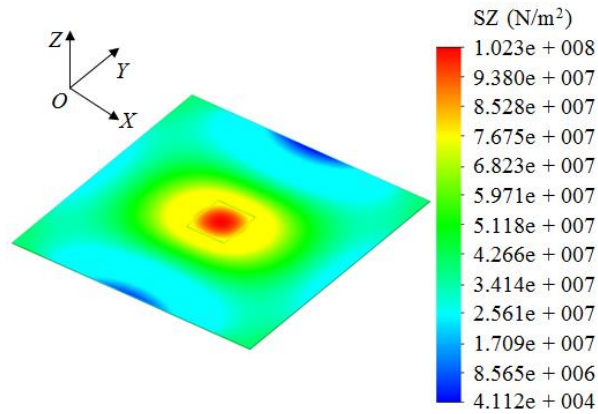


Рис. 7. Напружений стан листа кришки люка

Максимальні переміщення зафіксовані в середній частині листа і дорівнюють близько 6,0 мм (рис. 8).

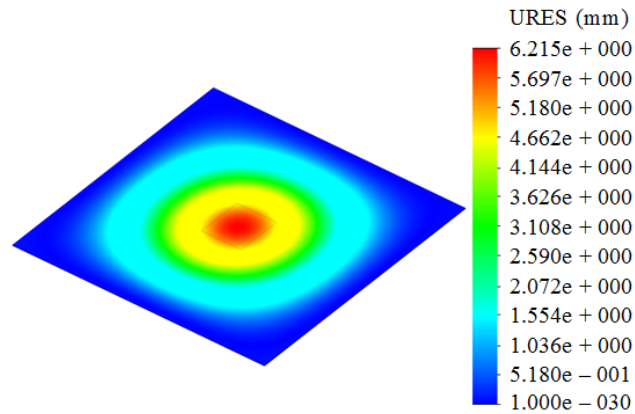


Рис. 8. Переміщення в вузлах листа кришки люка

Для визначення міцності каркаса кришки люка проведено розрахунок на міцність. Розрахункова схема каркаса наведена на рис. 9. Вона включає вертикальне навантаження P_v , а також реакції P_p на дію вертикального навантаження. Закріплення моделі відбувалося за петлі. Матеріал конструкції – сталь з лінійними ізотропними властивостями.

При складанні скінчено-елементної моделі використані ізопараметричні тетраедри. Кількість елементів сітки дорівнює 217640, вузлів – 67421. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 100 мм, мінімальний – 20 мм. Кількість елементів в колі дорівнює 9, а співвідношення збільшення розміру елементів – 1,8.

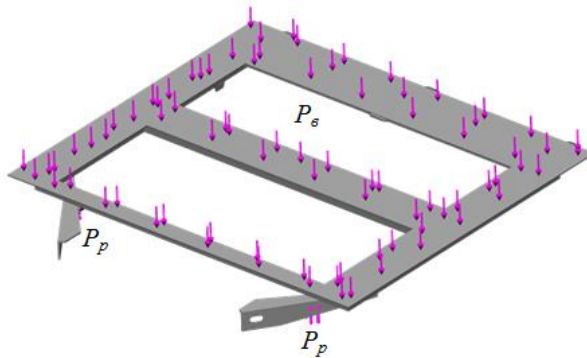


Рис. 9. Розрахункова схема каркаса кришки люка

Розрахунок проведений за критерієм Мізеса. Результати розрахунків наведено на рис. 10, 11.

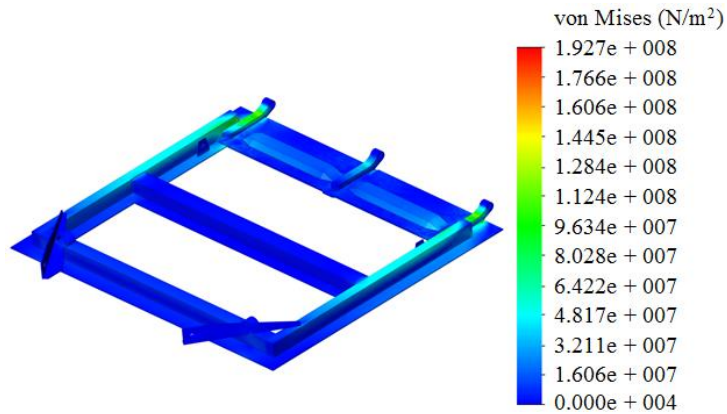


Рис. 10. Напружений стан каркаса кришки люка

Результати розрахунків показали, що максимальні еквівалентні напруження зосереджені в середньому поясі каркаса та складають 192,7 МПа, а отже не перевищують допустимі значення [9, 10]. Отримана величина напружень на 10% нижча за напруження в типовій конструкції кришки люка.

Максимальні переміщення зафіксовані в запірних кронштейнах і дорівнюють 8,4 мм.

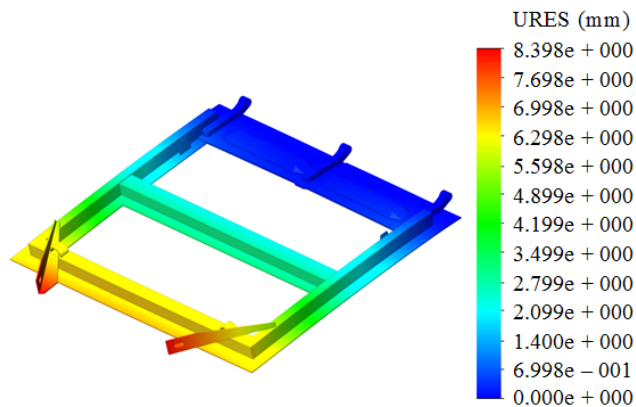


Рис. 11. Переміщення в вузлах каркаса кришки люка

Також розрахунок проведений і стосовно II схеми навантаження кришки люка. При цьому максимальні еквівалентні напруження в листі склали 97,4 МПа, а обв'язуванні – 176,1 МПа. Отже міцність запропонованої кришки люка при розглянутих схемах її навантаження забезпечується.

Наступним кроком в рамках даних досліджень є визначення міцності кришки люка при динамічних та наднормованих навантаженнях, які мають місце у експлуатації.

Висновки

1. Запропоновано заходи щодо удосконалення конструкції кришки люка напіввагона. При цьому пропонується виготовлення листа із полімерного композиційного матеріалу, а обв'язування – із П-подібного профілю, перекритого листом. Момент опору перерізу удосконаленої конструкції обв'язування відносно поперечної осі збільшується на 17,5% у порівнянні з типовим перерізом. Удосконалена конструкція кришки люка має масу на 12% нижче за типову конструкцію.

2. Проведено розрахунок на міцність кришки люка напіввагона при основних експлуатаційних режимах навантаження. Максимальні напруження в листі кришки люка при I схемі навантаження виникають в його середній частині та складають 102,3 МПа, тобто не перевищують допустимих значень, що на 25% нижчі ніж у типовій конструкції кришки люка.

Максимальні еквівалентні напруження в обв'язуванні зосереджені в середньому поясі каркаса та складають 192,7 МПа, а отже не перевищують допустимі. Отримана величина напружень на 10% нижча за напруження в типовій конструкції кришки люка.

Максимальні еквівалентні напруження в листі при II схемі навантаження склали 97,4 МПа, а в обв'язуванні – 176,1 МПа. Отже міцність запропонованої кришки люка при розглянутих схемах її навантаження забезпечується.

Проведені дослідження сприятимуть зменшенню пошкоджень кришок люків в експлуатації та витрат на утримання напіввагонів, а також будуть корисними напрацюваннями при проектуванні їх сучасних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Візник Р. І., Чепурченко І. В., Яценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2016. Вип. 159. С. 91 – 97.
2. Бородай О. О., Пасько В. В., Стринжа А. М., Худієнко В. А. Проведення ресурсних випробувань швів приварки елементів кріплення кришки люка у напіввагоні з метою визначення їх міцності. Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». Рейковий рухомий склад. 2017. №14. С. 20 – 24.
3. Пуятю А. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния крышки люка полувагона при падении кусков груза. Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. 2011. №5. С. 113 – 122.
4. Zaynitdinov Olmos Irikovich, Ruzmetov Yadgor Ozodovich, Rustam Rahimov, Waail Mahmud Lafta. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. International Journal of Engineering and Technology. 2020. Vol. 9(2). P. 378 – 381.
5. Каракаев А. К., Зарипов Р. Ю. Композитные материалы в грузовом вагоностроении. Наука и техника Казахстана. 2016. №1-2. С. 39 – 47.
6. Кебал И. Ю., Мямлин С. В. Совершенствование конструкции крышки люка полувагона. Вагонный парк. 2016. №7-8. С. 41 – 43.
7. Oleksij Fomin, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykola Gorbunov, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Vladimir Hauser. The improved hatch cover construction for universal open box-type wagon from the strength and durability point of view. MANUFACTURING TECHNOLOGY. 2019. Vol. 19, No. 2. P. 216-221.
8. Фомін О. В., Горбунов М. І., Ловська А. О., Коваленко В. В. Удосконалення конструкційних особливостей кришки люка універсального напіввагона для забезпечення її міцності в експлуатації. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2018. № 3 (75). С. 138 – 148. doi: 10.15802/stp2018/132863
9. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
10. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.

11. Kondratiev A. Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6. No. 7 (102). P. 6 – 18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>
12. A. Kondratiev, V. Gaidachuk, T. Nabokina, V. Kovalenko. Determination of the influence of deflections in the thickness of a composite material on its physical and mechanical properties with a local damage to its wholeness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4. No. 1 (100). P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174025>.
13. Алямовский А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций в среде SolidWorks. Москва: ДМК, 2010. 784 с. (Серия “Проектирование”).
14. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. Москва: ДМК, 2007. 784 с. ил. (Серия “Проектирование”).
15. Заболотный К., Жупиев А., Панченко Е., Протыняк И., Калужный С., Овчинников Ю. Проектирование подъемных барабанов в SolidWorks Simulation. САМ–СИСТЕМЫ. 2010. № 1. С. 16 – 21.

REFERENCES

1. Viznyak R. I., Chepurchenko I. V., Yacenko A. O. (2016). Osoblivosti viznachennya ekspluatacijnih navantazhen kuzova napivvagona ta shlyahi udoskonalennya jogo konstrukciji z metoyu zabezpechennya micnosti i zberezhennya. [Features of determining the operational loads of the gondola body and ways to improve its design in order to ensure strength and preservation]. *Zbirnik naukovih prac Ukrayinskogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 159. 91 – 97. (in Ukrainian).
2. Borodaj O. O., Pasko V. V., Strinzha A. M., Hudiyenko V. A. (2017). Provedennya resursnih viprobuvan shviv privarki elementiv kriplennya krishki lyuka u napivvagoni z metoyu viznachennya yih micnosti [Carrying out of resource tests of seams of welding of fastening elements of a cover of the hatch in a gondola car for the purpose of definition of their durability]. *Zbirnik naukovih prac DP «UkrNDIV». Rejkovij ruhomij sklad*, 1. 20 – 24. (in Ukrainian).
3. Putyato A. V. (2011). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kryshki lyuka poluvagona pri padenii kuskov gruzha [Simulation of the stress-strain state of the hatch cover of a gondola car when pieces of cargo fall]. *Mehanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki*, 5. 113 – 122. (in Russian).
4. Zaynitdinov Olmos Irikovich, Ruzmetov Yadgor Ozodovich, Rustam Rahimov, Waail Mahmod Lafta. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2). 378 – 381. (in English).
5. Karakaev A. K., Zaripov R. Yu. (2016). Kompozitnye materialy v gruzovom vagonostroenii [Composite materials in freight car building]. *Nauka i tehnika Kazahstana*, 1-2. 39 – 47. (in Russian).
6. Keбал I. Yu., Myamlin S. V. (2016). Sovershenstvovanie konstrukcii kryshki lyuka poluvagona [Improving the design of the gondola hatch cover]. *Vagonij park*, 7-8. 41 – 43. (in Russian).
7. Oleksij Fomin, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykola Gorbunov, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Vladimir Hauser. (2019). The improved hatch cover construction for universal open box-type wagon from the strength and durability point of view. *MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 19, 2. 216-221. (in English).
8. Fomin O. V., Gorbunov M. I., Lovska A. O., Kovalenko V. V. (2018). Udoskonalennya kontrukcijnih osoblivostej krishki lyuka universalnogo napivvagona dlya zabezpechennya yiyi micnosti v ekspluataciji [Improving the design features of the hatch cover of the universal gondola car to ensure its durability in operation]. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 3 (75). 138 – 148. doi: 10.15802/stp2018/132863 (in Ukrainian).
9. Vagony vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih) [Freight wagons. General requirements for the calculation and design of new and upgraded 1520 mm (non-self-propelled) railcars]. 162. DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian).
10. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight cars. Strength and Dynamic Requirements], 54. GOST 33211-2014 (2016). (in Russian).
11. Kondratiev A. (2019). Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 7 (102), 6 – 18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>. (in English).
12. A. Kondratiev, V. Gaidachuk, T. Nabokina, V. Kovalenko. (2019). Determination of the influence of deflections in the thickness of a composite material on its physical and mechanical properties with a local damage to its wholeness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 1 (100), 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174025>. (in English).
13. Alyamovskij A. A. (2010). COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstrukcij v srede SolidWorks [Fundamentals of Structural Analysis in SolidWorks]. Moscow: ДМК, 2010. 784 с. (Seriya “Proektirovanie”). (in Russian).
14. Alyamovskij A. A. (2007). SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Inzhenernyj analiz metodom konechnyh elementov [SolidWorks/COSMOSWorks 2006 – 2007. Finite Element Engineering Analysis]. Moscow: ДМК, 2007. 784 с. ил. (Seriya “Proektirovanie”). (in Russian).

15. Zabolotnyj K., Zhupiev A., Panchenko E., Protynyak I., Kalyuzhnyj S., Ovchinnikov Yu. (2010). Proektirovanie podemnyh barabanov v SolidWorks Simulation [Designing Lifting Drums in SolidWorks Simulation]. *SAM-SISTEMY*, 1, 16 – 21. (in Russian).

Oleksij Fomin¹, Alyona Lovska², Anna Fomina³, Pavlo Prokopenko⁴

¹Professor of Department of Cars and Carriage Facilities, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

²Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

³Scientific Employee, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Central ave., 59-a, Sievierodonetsk, 93400, Ukraine

⁴Graduate student of Department of Cars and Carriage Facilities, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

CALCULATION OF STRENGTH OF HALF WAGON COVER MADE OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIAL

The article presents the results of computer simulation of the strength of the improved design of the hatch cover of the gondola. A feature of the improvement is the production of a sheet of polymer composite material, and binding - from a U-shaped profile covered with a horizontal sheet. At the same time, the cross-sectional resistance of the improved strapping design relative to the transverse axis increases by 17.5% compared to a typical cross-section. It is important to say that the proposed hatch cover has a mass 12% lower than the typical design.

To determine the main strength indicators of the proposed design of the hatch cover of the gondola, the calculation was performed for the main schemes of its load. It was found that, taking into account the proposed solutions, the maximum stresses in the sheet of the hatch cover are 25% lower than in the standard design, and in the binding - by 10%.

The conducted researches will help to reduce damages of covers of hatches in operation and expenses for the maintenance of gondola cars, and also will be useful developments at designing of their modern designs.

Keywords: *transport mechanics, gondola car, hatch cover, strength, load, gondola car storage.*

УДК 539.3

Олена Шидула^{1*}

¹ Професор кафедри Комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, вул. Солом'янська, 7, Київ, Україна, 03110. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7385-2816>

* Автор, відповідальний за листування: ensh@ukr.net

ПОБУДОВА МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВО-АРМОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ З РОЗОРІЄНТОВАНИМИ ВОЛОКНАМИ

Запропонована модель нелінійного деформування просторово-армованих волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами і фізично нелінійною матрицею. Просторово-армований волокнистий матеріал розглядається як багатокомпонентний матеріал з випадковим розташуванням волокон. В основу покладені стохастичні диференціальні рівняння фізично нелінійної теорії пружності. Рішення задачі про напружено-деформований стан та ефективні властивості композитного матеріалу будується за методом умовних моментів Л.П.Хорошуну. Розроблений алгоритм визначення ефективних деформативних властивостей просторово-армованого матеріалу з фізично нелінійною матрицею. Рішення нелінійних рівнянь, що враховують її фізичну нелінійність, будується за ітераційним методом.

Встановлено закон зв'язку між макронапруженнями і макродеформаціями в просторово-армованому матеріалі та залежності середніх деформацій і напружень в його матриці від макродеформацій. Побудовані криві деформування матеріалу для різних значень об'ємного вмісту волокон. Вивчена залежність ефективних деформативних властивостей просторово-армованого матеріалу від об'ємного вмісту волокон. Досліджено вплив нелінійності матриці на деформування просторово-армованого композитного матеріалу. Встановлено, що нелінійність матриці суттєво впливає на ефективні деформативні властивості та напружено-деформований стан просторово-армованих матеріалів.

Ключові слова: *модель нелінійного деформування, волокнистий матеріал багатоспрямованого армування, рівномірне розорієнтування волокон, нелінійне деформування матриці, напружено-деформований стан, ефективні деформативні властивості, вплив нелінійності, комп'ютерна реалізація*

Вступ. Важлива та актуальна проблема створення безпечних та надійних елементів конструкцій для авіабудівної галузі ускладнюється необхідністю максимального зменшення ваги конструктивних елементів за умови збереження їх міцності. Це дозволяє суттєво знизити як експлуатаційні витрати, так і задовольнити жорсткі екологічні вимоги до літальних апаратів. У світовій практиці це зазвичай досягається при проектуванні на основі використання алюмінієвих сплавів (для полегшення виробів), титанових сплавів (для забезпечення міцності), а також композитних матеріалів. Тенденції сучасного авіабудування свідчать про збільшення частки використання саме композитних матеріалів. До значних переваг композитних матеріалів слід віднести їх малу щільність, високі характеристики статичної міцності та міцності при втомі, опір корозії та інші. Завдяки анізотропії деформаційно-міцностних властивостей композитних матеріалів з'являється можливість створювати ефективні матеріали із заданою структурою.

Одними з найдоступніших і недорогих композитних матеріалів, що найбільш інтенсивно використовуються в авіабудуванні, є склопластики та вуглепластики. Склопластики – вид композиційних матеріалів – пластичні матеріали, що складаються зі скловолокнистого наповнювача (скляне волокно, волокно з кварцу та ін.) та сполучної речовини (термореактивні та термопластичні полімери). Вуглепластики створюються на основі високомодульних вуглецевих волокон та полімерів. Такі матеріали поступаються сталі за абсолютними значеннями межі міцності, але у 3,5 разу легше її і перевищують сталь за питомою міцністю. При виготовленні рівномірних конструкцій зі сталі та вугле-або склопластику, така конструкція буде в кілька разів легша за сталеву. Для надання ще більшої міцності вугле-і склопластики кладуть шарами, щоразу змінюючи кут напрямку волокон. Шари скріплюються за допомогою епоксидних смол. Ще більшу жорсткість і міцність композиту у різних напрямках забезпечує багатоспрямованість волокон. Тому волокнисті матеріали з волокнами, розорієнтованими в площині, тобто шарувато-волокнисті матеріали, а також більш пріоритетні і менш досліджені просторово розорієнтовані матеріали знаходять широке застосування в багатьох галузях, де потрібні легкі та міцні конструкції, зокрема в транспортних засобах.

В зв'язку з широким застосуванням композитних матеріалів актуальним завданням є вивчення механічної поведінки композитних матеріалів під час навантаження. Поряд з експериментальними методами визначення властивостей композитних матеріалів інтенсивно розробляються теорії, присвячені вивченню їх деформування та руйнування. Проводяться дослідження щодо визначення напружено-деформованого стану, прогнозування фізико-механічних властивостей, вибору оптимальної структури композитних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. При збільшенні навантаження багато однорідних і композитних матеріалів проявляють нелінійний характер залежностей між макронапруженнями та макродеформаціями. Це може бути обумовлене фізичною нелінійністю деформування компонентів [1]. Такий вид нелінійності є типовим для композитів на основі пластичної металевої матриці, а також на основі полімерів при підвищених температурах.

Волокнисті матеріали з волокнами, розорієнтованими в просторі, широко використовуються в деталях транспортних засобів, що працюють в умовах високих силових та температурних навантажень. Тому прогнозування їх нелінійних властивостей є актуальним.

Методи розв'язання нелінійних задач механіки твердого деформівного тіла розроблялися в роботах Бленда Д. [2], Каудерера Г. [1], Лур'є А.І. [3], Митропольського Ю.О., Березовського А.А. [4, 5], Новожилова В.В. [6], Green A.E. & Adkins I.E. [7], Hill R. [8-9], Ogden R.W. [10-11] та ін. В більшості робіт застосовувався метод розкладання рішення за ступенями малого параметра, причому при розв'язанні конкретних задач обмежувалися, як правило, першими двома членами розкладання. В зв'язку з цим розв'язання задач про нелінійне деформування матеріалів отримано для слабо нелінійних деформацій, тобто для таких деформацій, для яких матеріал деформується за нелінійним законом, близьким до лінійного. Вивченню механічної поведінки композитних матеріалів з компонентами, що нелінійно деформуються, або матеріалів, що нелінійно деформуються, присвячені роботи Васильєва В.В. та Солдатова С.А. [12], Крегера А.Ф. та Мелбардіса Ю.Г. [13], Малмейстер А.К. та Янсона Ю.О. [14], Хорошуна Л.П. та Маслова Б.П. [15], Цурпала І.А. [1], Hill R. [9-10], Ogden R.W. [11-12] та ін.

Розв'язання лінійної задачі про деформування стохастично неоднорідних композитів різних типів армування було отримано Хорошуном Л.П. [16, 17]. Різні аспекти деформування волокнистих та шарувато-волокнистих композитних матеріалів з нелінійною матрицею були вивчені в роботах Хорошуна Л.П., Шикуди О.М. [18-28]. Однак для матеріалів просторового армування автори вивчали лише лінійне деформування [18, 29, 30]. Не було побудовано моделі деформування просторово орієнтованих волокнистих матеріалів у разі нелінійного деформування матриці.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є побудова моделі та дослідження нелінійного деформування просторово армованих волокнистих матеріалів. Завданнями

дослідження є побудова моделі нелінійного деформування таких матеріалів, розробка алгоритму визначення напружено-деформованого стану та ефективних деформативних властивостей просторово армованого матеріалу з розорієнтованими волокнами та фізично нелінійною матрицею, а також дослідження залежності деформування матеріалу від об'ємного вмісту матриці. В основу покладено стохастичні диференціальні рівняння фізично нелінійної теорії пружності Л.П.Хорошуна [16-19].

Матеріали та методи дослідження. Розглянемо просторово армований волокнистий матеріал стохастичною структури, що є системою волокон N напрямків, пов'язаних матрицею. Цей матеріал будемо розглядати як багатокомпонентний, вважаючи, що матриця і волокна кожного напрямку є окремими компонентами. Будемо вважати, що в кожному напрямку є досить велика кількість статистично розташованих волокон, матеріал волокон – трансверсально-ізотропний з віссю симетрії уздовж волокон, матеріал матриці – ізотропний. Волокна k -го напрямку характеризуються напрямними косинусами (рис. 1)

$$\begin{aligned} \gamma_1^{(k)} &= \sin \theta_k \cos \varphi_k; \gamma_2^{(k)} = \sin \theta_k \sin \varphi_k; \gamma_3^{(k)} = \cos \theta_k \\ (0 \leq \theta_k &\leq \pi/2; 0 \leq \varphi_k \leq 2\pi; k = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (1)$$

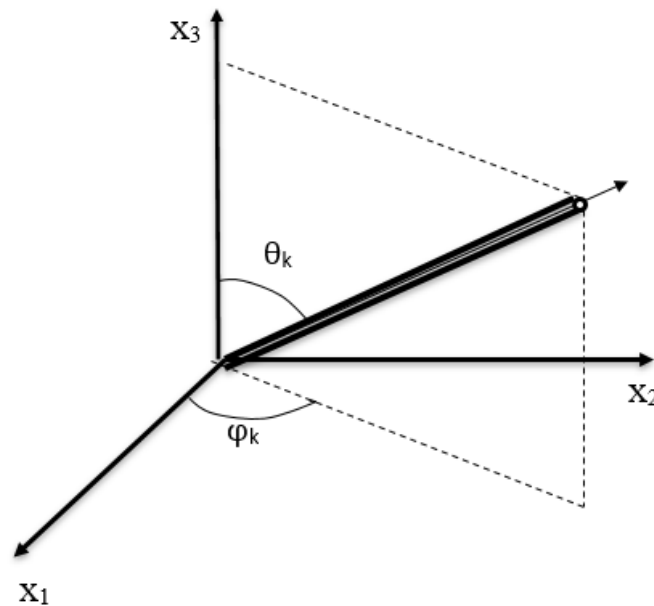


Рис. 1. Напрямні косинуси волокон k -го напрямку

Наближене визначення ефективних пружних характеристик просторово-армованих матеріалів будемо проводити в два етапи. На першому етапі визначаються властивості підсистем, орієнтованих певним чином щодо осей основної системи координат. Розв'язання задачі першого етапу здійснювалося на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичної структури [18-27]. При цьому розв'язок базувався на стохастичних диференціальних рівняннях теорії пружності із застосуванням методу умовних моментів [16-19]. На другому етапі за допомогою заданої функції розподілу визначаються ефективні властивості всієї системи за обчисленими властивостями підсистем. Розв'язок базується на схемі Фойхта.

Нехай об'ємні вмісти волокон k -го напрямку і матриці дорівнюють відповідно c_{1k} і c_2 .

Загальна концентрація волокон $c_1 = \sum_{k=1}^N c_{1k}$, причому $c_1 + c_2 = 1$. Визначення ефективних постійних матеріалу будемо проводити в два етапи. На першому етапі визначаються ефективні властивості підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом, утвореним волокнами k -го напрямку і частиною матриці з об'ємним вмістом $c_{2k} = \frac{c_2}{c_1} c_{1k}$. На другому етапі визначасмо ефективні властивості всієї системи за обчисленими властивостями підсистем. Розв'язання задачі першого етапу будемо проводити на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичною структури, другого – на основі схеми Фойхта.

Визначення ефективних деформівних властивостей волокнистого матеріалу просторового армування. Нехай макрооб'єм волокнистого матеріалу просторового армування знаходиться в умовах однорідних навантаження. Позначимо пружні сталі волокон k -го напрямку $\lambda_{ij}^{(k)}$, а пружні коефіцієнти матриці λ_2, μ_2 залежать від деформації, $\lambda_2(\varepsilon), \mu_2(\varepsilon)$. Будемо виходити з рівнянь рівноваги в мікроточці

$$\sigma_{ij,j}^{(k)} = 0, \quad (2)$$

співвідношень пружності

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^{(k)} &= (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \varepsilon_{pq}^{(k)} + (\lambda_{12}^{(k)} \varepsilon_{rr}^{(k)} + \lambda_{13}^{(k)} \varepsilon_{33}^{(k)}) \delta_{pq}; \\ \sigma_{33}^{(k)} &= \lambda_{13}^{(k)} \varepsilon_{rr}^{(k)} + \lambda_{33}^{(k)} \varepsilon_{33}^{(k)}; \quad \sigma_{p3}^{(k)} = 2\lambda_{44}^{(k)} \varepsilon_{p3}^{(k)} \quad (p, q, r = 1, 2), \end{aligned} \quad (3)$$

і співвідношень Коші

$$\varepsilon_{ij}^{(k)} = u_{(i,j)}^{(k)} = \frac{1}{2} (u_{i,j}^{(k)} + u_{j,i}^{(k)}). \quad (4)$$

Підставивши (3), (4) в (2), приходимо до статистично нелінійних рівнянь рівноваги відносно переміщень $u_i^{(k)}$ в підсистемі

$$\begin{aligned} & [(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) u_{m,r}^{0(k)}]_{,r} + [(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) u_{r,r}^{0(k)}]_{,m} = \\ & = -2[\lambda_{12}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr} \rangle^{(k)} \delta_{ml} + (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \langle \varepsilon_{ml} \rangle^{(k)} \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{33} \rangle^{(k)} \delta_{ml}]_{,l}; \\ & (\lambda_{44}^{(k)} (u_{3,r}^{0(k)})_{,r}) = -(2\lambda_{44}^{(k)} \langle \varepsilon_{m3} \rangle^{(k)})_{,m} \quad (m, l, r = 1, 2, p = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (5)$$

Флуктуації переміщень дуже малі в порівнянні з їх середніми значеннями при $x_j \rightarrow \infty$, тому на нескінченності флуктуації переміщень приймаємо рівними нулю.

Усереднюючи співвідношення (3), отримуємо вирази для середніх напружень у вигляді

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{pq} \rangle^{(k)} &= c_1^{(k)} (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \langle \varepsilon_{pq}^1 \rangle^{(k)} + c_1^{(k)} (\lambda_{12}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr}^1 \rangle^{(k)} + \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{33}^1 \rangle^{(k)}) \delta_{pq} + \\ & + c_2^{(k)} \lambda_2 \langle \varepsilon_{ss}^2 \rangle^{(k)} \delta_{pq} + 2c_2^{(k)} \mu_2 \langle \varepsilon_{pq}^2 \rangle^{(k)}; \\ \langle \sigma_{33} \rangle^{(k)} &= c_1^{(k)} \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr}^1 \rangle^{(k)} + c_1^{(k)} \lambda_{33}^{(k)} \langle \varepsilon_{33}^1 \rangle^{(k)} + c_2^{(k)} \lambda_2 \langle \varepsilon_{ss}^2 \rangle^{(k)} + 2c_2^{(k)} \mu_2 \langle \varepsilon_{33}^2 \rangle^{(k)}; \\ \langle \sigma_{p3} \rangle^{(k)} &= 2c_1^{(k)} \lambda_{44}^{(k)} \langle \varepsilon_{p3}^1 \rangle^{(k)} + 2c_2^{(k)} \mu_2 \langle \varepsilon_{p3}^2 \rangle^{(k)} \quad (p, q, r = 1, 2, s = 1, 2, 3), \quad \lambda_2, \mu_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Скориставшись функцією Гріна, рівняння (5) можна привести до інтегральної форми. За допомогою методу умовних моментів [16-19], усереднюючи ці рівняння за умовною щільністю, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь відносно середніх деформацій компонентів в підсистемі. Визначимо з цієї системи середні деформації компонентів в підсистемі $\langle \varepsilon_{ij}^1 \rangle^{(k)}$ і $\langle \varepsilon_{ij}^2 \rangle^{(k)}$ як функції середніх деформацій композиту $\langle \varepsilon_{ij} \rangle^{(k)}$ і підставимо в вираз (6). В результаті отримаємо залежність макронапружень в підсистемі від макродеформацій в ній

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{pq} \rangle^{(k)} &= (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \langle \varepsilon_{pq} \rangle^{(k)} + (\lambda_{12}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr} \rangle^{(k)} + \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{33} \rangle^{(k)}) \delta_{pq}; \\ \langle \sigma_{33} \rangle^{(k)} &= \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr} \rangle^{(k)} + \lambda_{33}^{(k)} \langle \varepsilon_{33} \rangle^{(k)}; \\ \langle \sigma_{p3} \rangle^{(k)} &= 2\lambda_{44}^{(k)} \langle \varepsilon_{p3} \rangle^{(k)} \quad (p, q, r=1, 2), \end{aligned} \quad (7)$$

а вирази для ефективних коефіцієнтів підсистеми мають вигляд [18-20]

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{*(k)} + \lambda_{12}^{*(k)} &= c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k (\lambda_2 + \mu_2) - \frac{c_1^k c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)^2}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{11}^{*(k)} - \lambda_{12}^{*(k)} &= c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k \mu_2 - \frac{c_1^k c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)} - 2\mu_2)^2}{2c_1^k \mu_2 + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + \frac{2m^{(k)} n^{(k)}}{n^{(k)} + 2m^{(k)}}}; \\ \lambda_{13}^{*(k)} &= c_1^k \lambda_{13}^{(k)} + c_2^k \lambda_2 - \frac{c_1^k c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2) (\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{33}^{*(k)} &= c_1^k \lambda_{33}^{(k)} + c_2^k (\lambda_2 + 2\mu_2) - \frac{2c_1^k c_1^k (\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)^2}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{44}^{*(k)} &= c_1^k \lambda_{44}^{(k)} + c_2^k \mu_2 - \frac{c_1^k c_2^k (\lambda_{44}^{(k)} - \mu_2)^2}{c_1^k \mu_2 + c_2^k \lambda_{44}^{(k)} + s^{(k)}}; \end{aligned} \quad (8)$$

де

$$2m^{(k)} = c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k \mu_2; \quad 2n^{(k)} = c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k (\lambda_2 + \mu_2); \quad s^{(k)} = c_1^k \lambda_{44}^{(k)} + c_2^k \mu_2, \quad (9)$$

якщо жорсткість матриці більше жорсткості волокон, і

$$2m^{(k)} = \left(\frac{c_1^k}{\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}} + \frac{c_2^k}{2\mu_2} \right)^{-1}; \quad 2n^{(k)} = \left(\frac{c_1^k}{\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}} + \frac{c_2^k}{2(\lambda_2 + \mu_2)} \right)^{-1}; \quad s^{(k)} = \left(\frac{c_1^k}{\lambda_{44}^{(k)}} + \frac{c_2^k}{\mu_2} \right)^{-1}, \quad (10)$$

якщо жорсткість волокон більше жорсткості матриці.

Якщо властивості волокон всіх напрямків однакові, то

$$\lambda_{ij}^{(k)} = \lambda_{ij}^1 \quad (11)$$

і вирази (8) – (10) від індексу k не залежать.

Ефективні коефіцієнти (8) – (10) є компонентами тензорів модулів пружності і термічних напружень в локальній системі координат $x_i^{(k)}$, де вісь $x_3^{(k)}$ паралельна волокнам k -го напрямку.

Перейдемо до загальної системи координат згідно перетворенню

$$x_i = \alpha_{ij}^{(k)} x_j^{(k)}; \quad x_i^{(k)} = \alpha_{ji}^k x_j; \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} \alpha_{11}^{(k)} &= \cos \theta_k \cos \varphi_k; & \alpha_{12}^{(k)} &= -\sin \varphi_k; & \alpha_{13}^{(k)} &= \sin \theta_k \cos \varphi_k; \\ \alpha_{21}^{(k)} &= \cos \theta_k \sin \varphi_k; & \alpha_{22}^k &= \cos \varphi_k; & \alpha_{23}^k &= \sin \theta_k \sin \varphi_k; \\ \alpha_{31}^{(k)} &= -\sin \theta_k; & \alpha_{32}^{(k)} &= 0; & \alpha_{33}^{(k)} &= \cos \theta_k. \end{aligned} \quad (13)$$

Тоді тензори модулів пружності $\lambda_{ijmn}^{*(k)}$ в загальній системі координат виражаються через відповідні тензори $\lambda_{ijmn}^{*(k)'}$ в локальній системі координат співвідношеннями

$$\lambda_{ijmn}^{*(k)} = \alpha_{ip}^{(k)} \alpha_{jq}^{(k)} \alpha_{mr}^{(k)} \alpha_{ns}^{(k)} \lambda_{pqrs}^{*(k)'}. \quad (14)$$

Ефективні коефіцієнти всієї системи відповідно до схеми Фойхта визначаються формулами

$$\lambda_{ijmn}^{**} = \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_{1k} \lambda_{ijmn}^{*(k)}. \quad (15)$$

Підставляючи (15) в (14) і переходячи до матричних позначень, отримуємо

$$\begin{aligned} \lambda_{ijmn}^{**} &= \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_{1k} \{ [\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \\ &+ \frac{1}{2} (\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)})] \lambda_{11}^{*(k)} + \\ &+ [\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)} - \\ &- \frac{1}{2} (\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)})] \lambda_{12}^{*(k)} + \\ &+ \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} \lambda_{33}^{*(k)} + [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)} + \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)})] \lambda_{13}^{*(k)} + \\ &+ [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} + \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)}) + (\alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) (\alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} + \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)})] \lambda_{44}^{*(k)} \}. \end{aligned} \quad (16)$$

Формули (8) – (10), (16) визначають ефективні пружні властивості просторово армованого матеріалу через властивості волокон і матриці. Зауважимо, що в випадку фізичної нелінійності матриці, оскільки $\lambda_2 (< \varepsilon_2 >), \mu_2 (< \varepsilon_2 >)$, ці ефективні пружні коефіцієнти також є функціями середніх в ній деформацій $< \varepsilon_2 >$.

Якщо властивості волокон і їх об'ємний вміст в кожному напрямку однакові, то

$$c_{1k} = \frac{c_1}{N}; \quad \lambda_{ij}^{*(k)} = \lambda_{ij}^*, \quad (17)$$

що спрощує обчислення.

Визначення ефективних пружних властивостей волокнистих матеріалів просторового армування з розорієнтованими волокнами. В випадку, коли волокна розорієнтовані в просторі з функцією розподілу $f(\theta, \varphi)$, ефективні пружні коефіцієнти визначаються за формулами

$$\lambda_{ijmn}^{**} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi) \lambda_{pqrs}^* d\theta d\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi) \alpha_{ip}^{(k)} \alpha_{jq}^{(k)} \alpha_{mr}^{(k)} \alpha_{ns}^{(k)} \lambda_{pqrs}^* d\theta d\varphi; \quad (18)$$

Якщо волокна рівномірно розорієнтовані в просторі, то функція розподілу має вигляд

$$f(\theta, \varphi) = 1. \quad (19)$$

Підставляючи (19) в (18) з урахуванням (16) отримуємо ізотропний матеріал, у якого залежності макронапружень від макродеформацій визначаються за формулами

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \lambda^{**} \langle \varepsilon_{pp} \rangle \delta_{ij} + 2\mu^{**} \langle \varepsilon_{ij} \rangle, \quad (20)$$

де ефективні коефіцієнти мають вигляд

$$\begin{aligned} \lambda^{**} &= \frac{1}{45} [9(\lambda_{11}^* + \lambda_{12}^*) - 12(\lambda_{44}^* + \lambda_{66}^*) + 24\lambda_{13}^* + 3\lambda_{33}^*]; \\ \mu^{**} &= \frac{1}{30} [(\lambda_{11}^* + \lambda_{12}^*) + 12(\lambda_{44}^* + \lambda_{66}^*) - 4\lambda_{13}^* + 2\lambda_{33}^*]; \end{aligned} \quad (21)$$

а $\lambda_{11}^*, \lambda_{12}^*, \lambda_{13}^*, \lambda_{33}^*, \lambda_{44}^*, \lambda_{66}^*$ визначаються за формулами (8) – (11), (17).

Алгоритм для визначення ефективних деформативних властивостей та напружено-деформованого стану композиту. Ефективні деформативні коефіцієнти просторово-армованих волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами і фізично нелінійною матрицею визначаються за формулами (8) – (11), (17), (21) і є функціями середніх в матриці деформацій $\langle \varepsilon_2 \rangle$.

Ефективні коефіцієнти будемо визначати ітераційним методом за наступним алгоритмом. Нульове наближення відповідає випадку фізично лінійної матриці. Тоді для нульового наближення

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{*[0]} + \lambda_{12}^{*[0]} &= c_1 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2c_2 [\lambda_2(0) + \mu_2(0)] - \frac{c_1 c_1 [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2\lambda_2(0) - 2\mu_2(0)]^2}{2c_1 [\lambda_2(0) + \mu_2(0)] + c_2 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{11}^{*[0]} - \lambda_{12}^{*[0]} &= c_1 (\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2c_2 \mu_2(0) - \frac{c_1 c_2 [\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1 - 2\mu_2(0)]^2}{2c_1 \mu_2(0) + c_2 (\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + \frac{2mn}{n+2m}}; \\ \lambda_{13}^{*[0]} &= c_1 \lambda_{13}^1 + c_2 \lambda_2(0) - \frac{c_1 c_1 [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2\lambda_2(0) - 2\mu_2(0)] [\lambda_{13}^1 - \lambda_2(0)]}{2c_1 [\lambda_2(0) + \mu_2(0)] + c_2 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{33}^{*[0]} &= c_1 \lambda_{33}^1 + c_2 [\lambda_2(0) + 2\mu_2(0)] - \frac{2c_1 c_1 [\lambda_{13}^1 - \lambda_2(0)]^2}{2c_1 [\lambda_2(0) + \mu_2(0)] + c_2 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{44}^{*[0]} &= c_1 \lambda_{44}^1 + c_2 \mu_2(0) - \frac{c_1 c_2 [\lambda_{44}^1 - \mu_2(0)]^2}{c_1 \mu_2(0) + c_2 \lambda_{44}^1 + s}; \end{aligned} \quad (22)$$

де

$$2m = c_1 (\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2c_2 \mu_2(0); \quad 2n = c_1 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2c_2 [\lambda_2(0) + \mu_2(0)]; \quad s = c_1 \lambda_{44}^1 + c_2 \mu_2(0), \quad (23)$$

якщо жорсткість матриці більше жорсткості волокон, і

$$2m = \left[\frac{c_1}{\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1} + \frac{c_2}{2\mu_2(0)} \right]^{-1}; \quad 2n = \left[\frac{c_1}{\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1} + \frac{c_2}{2(\lambda_2(0) + \mu_2(0))} \right]^{-1}; \quad s = \left[\frac{c_1}{\lambda_{44}^1} + \frac{c_2}{\mu_2(0)} \right]^{-1}, \quad (24)$$

якщо жорсткість волокон більше жорсткості матриці.

$$\lambda^{**[0]} = \frac{1}{45} [9(\lambda_{11}^{*[0]} + \lambda_{12}^{*[0]}) - 12(\lambda_{44}^{*[0]} + \lambda_{66}^{*[0]}) + 24\lambda_{13}^{*[0]} + 3\lambda_{33}^{*[0]}];$$

$$\mu^{**[0]} = \frac{1}{30} [(\lambda_{11}^{*[0]} + \lambda_{12}^{*[0]}) + 12(\lambda_{44}^{*[0]} + \lambda_{66}^{*[0]}) - 4\lambda_{13}^{*[0]} + 2\lambda_{33}^{*[0]}]; \quad (25)$$

$$\langle \varepsilon_{ij}^2 \rangle^{[0]} = \frac{2\mu^{**[0]}[\mu_2(0) - \bar{\mu}_1](K^{**[0]} - \bar{K}_1) - 3K^{**[0]}[K_2(0) - \bar{K}_1](\mu^{**[0]} - \bar{\mu}_1)}{6c_2\mu^{**[0]}[\mu_2(0) - \bar{\mu}_1][K_2(0) - \bar{K}_1]} \langle \varepsilon_{rr} \rangle \delta_{ij} +$$

$$+ \frac{\mu^{**[0]} - \bar{\mu}_1}{c_k[\mu_2(0) - \bar{\mu}_1]} \langle \varepsilon_{ij} \rangle, \quad (26)$$

де

$$K^{**[0]} = \frac{1}{9} [2(\lambda_{11}^{*[0]} + \lambda_{12}^{*[0]}) + 4\lambda_{13}^{*[0]} + \lambda_{33}^{*[0]}]; \quad \bar{K}_1 = \frac{1}{9} [2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 4\lambda_{13}^1 + \lambda_{33}^1];$$

$$\bar{\mu}_1 = \frac{1}{30} [(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 12(\lambda_{44}^1 + \lambda_{66}^1) - 4\lambda_{13}^1 + 2\lambda_{33}^1]. \quad (27)$$

Для першого наближення отримаємо

$$\lambda_{11}^{*[1]} + \lambda_{12}^{*[1]} = c_1(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2c_2[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})] -$$

$$\frac{c_1 c_1 [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})]^2}{2c_1[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})] + c_2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m};$$

$$\lambda_{11}^{*[1]} - \lambda_{12}^{*[1]} = c_1(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2c_2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \frac{c_1 c_2 [\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1 - 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})]^2}{2c_1\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + c_2(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + \frac{2mn}{n+2m}};$$

$$\lambda_{13}^{*[1]} = c_1\lambda_{13}^1 + c_2\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \frac{c_1 c_1 [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})][\lambda_{13}^1 - \lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})]}{2c_1[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})] + c_2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m};$$

$$\lambda_{33}^{*[1]} = c_1\lambda_{33}^1 + c_2[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})] - \frac{2c_1 c_1 [\lambda_{13}^1 - \lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})]^2}{2c_1[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})] + c_2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m};$$

$$\lambda_{44}^{*[1]} = c_1\lambda_{44}^1 + c_2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \frac{c_1 c_2 [\lambda_{44}^1 - \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]})]^2}{c_1^k \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) + c_2\lambda_{44}^1 + s}. \quad (28)$$

$$\lambda^{*[1]} = \frac{1}{45} [9(\lambda_{11}^{*[1]} + \lambda_{12}^{*[1]}) - 12(\lambda_{44}^{*[1]} + \lambda_{66}^{*[1]}) + 24\lambda_{13}^{*[1]} + 3\lambda_{33}^{*[1]}];$$

$$\mu^{*[1]} = \frac{1}{30} [(\lambda_{11}^{*[1]} + \lambda_{12}^{*[1]}) + 12(\lambda_{44}^{*[1]} + \lambda_{66}^{*[1]}) - 4\lambda_{13}^{*[1]} + 2\lambda_{33}^{*[1]}]; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_{ij}^2 \rangle^{[1]} = & \frac{2\mu^{**[1]}[\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \bar{\mu}_1](K^{**[1]} - \bar{K}_1) - 3K^{**[1]}[K_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \bar{K}_1](\mu^{**[1]} - \bar{\mu}_1)}{6c_2\mu^{**[1]}[\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \bar{\mu}_1][K_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \bar{K}_1]} \langle \varepsilon_{rr} \rangle \delta_{ij} + \\ & + \frac{\mu^{**[1]} - \bar{\mu}_1}{c_k[\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[0]}) - \bar{\mu}_1]} \langle \varepsilon_{ij} \rangle, \end{aligned} \quad (30)$$

де

$$K^{**[1]} = \frac{1}{9}[2(\lambda_{11}^{*[1]} + \lambda_{12}^{*[1]}) + 4\lambda_{13}^{*[1]} + \lambda_{33}^{*[1]}]. \quad (31)$$

І для n -го наближення

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{*[n]} + \lambda_{12}^{*[n]} &= c_1(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2c_2[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})] - \\ & - \frac{c_1 c_1 [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})]^2}{2c_1[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})] + c_2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{11}^{*[n]} - \lambda_{12}^{*[n]} &= c_1(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + 2c_2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \frac{c_1 c_2 [\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1 - 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})]^2}{2c_1\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + c_2(\lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1) + \frac{2mn}{n+2m}}; \\ \lambda_{13}^{*[n]} &= c_1\lambda_{13}^1 + c_2\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \\ & - \frac{c_1 c_1 [\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 - 2\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})][\lambda_{13}^1 - \lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})]}{2c_1[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})] + c_2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{33}^{*[n]} &= c_1\lambda_{33}^1 + c_2[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + 2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})] - \\ & - \frac{2c_1 c_1 [\lambda_{13}^1 - \lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})]^2}{2c_1[\lambda_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})] + c_2(\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) + 2m}; \\ \lambda_{44}^{*[n]} &= c_1\lambda_{44}^1 + c_2\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \frac{c_1 c_2 [\lambda_{44}^1 - \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]})]^2}{c_1^k \mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) + c_2\lambda_{44}^1 + s}. \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \lambda^{**[n]} &= \frac{1}{45}[9(\lambda_{11}^{*[n]} + \lambda_{12}^{*[n]}) - 12(\lambda_{44}^{*[n]} + \lambda_{66}^{*[n]}) + 24\lambda_{13}^{*[n]} + 3\lambda_{33}^{*[n]}]; \\ \mu^{**[n]} &= \frac{1}{30}[(\lambda_{11}^{*[n]} + \lambda_{12}^{*[n]}) + 12(\lambda_{44}^{*[n]} + \lambda_{66}^{*[n]}) - 4\lambda_{13}^{*[n]} + 2\lambda_{33}^{*[n]}]; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_{ij}^2 \rangle^{[n]} = & \frac{2\mu^{**[n]}[\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \bar{\mu}_1](K^{**[n]} - \bar{K}_1) - 3K^{**[n]}[K_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \bar{K}_1](\mu^{**[n]} - \bar{\mu}_1)}{6c_2\mu^{**[n]}[\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \bar{\mu}_1][K_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \bar{K}_1]} \times \\ & \times \langle \varepsilon_{rr} \rangle \delta_{ij} + \frac{\mu^{**[n]} - \bar{\mu}_1}{c_k[\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle^{[n-1]}) - \bar{\mu}_1]} \langle \varepsilon_{ij} \rangle, \end{aligned} \quad (34)$$

де

$$K^{**[n]} = \frac{1}{9}[2(\lambda_{11}^{*[n]} + \lambda_{12}^{*[n]}) + 4\lambda_{13}^{*[n]} + \lambda_{33}^{*[n]}]. \quad (35)$$

Запропонований метод дозволяє визначити ефективні коефіцієнти просторово-армованого волокнистого матеріалу з розорієнтованими волокнами та фізично нелінійною матрицею з будь-яким заданим ступенем точності.

Дослідження впливу нелінійності матриці на деформування композиту. Як конкретну задачу будемо досліджувати нелінійне деформування просторово-армованих волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами і фізично нелінійною матрицею, в якого модуль об'ємного стиску матриці K_2 є сталим, а модуль зсуву μ_2 задається функцією

$$\mu_2(\langle \varepsilon_2 \rangle) = \begin{cases} \mu_{02}, & J_\varepsilon^2 < \frac{k_2}{2\mu_{02}}; \\ \mu_2' + \left(1 - \frac{\mu_2'}{\mu_{02}}\right) \frac{k_2}{2J_\varepsilon^2}, & J_\varepsilon^2 \geq \frac{k_2}{2\mu_{02}}, \end{cases} \quad (36)$$

де $\mu_{02}, \mu_2', k_2 = \sigma_{02} \sqrt{\frac{2}{3}}$ – сталі матриці матеріалу, σ_{02} – межа її плинності, $J_\varepsilon^2 = (\langle \varepsilon_{pq}^2 \rangle' \langle \varepsilon_{pq}^2 \rangle')^{1/2}$, $\langle \varepsilon_{pq}^2 \rangle'$ – девіатор середніх в матриці деформацій.

За допомогою комп'ютерного моделювання було проведено чисельне дослідження залежності деформування волокнистого композиту з рівномірно розорієнтованими волокнами від об'ємного вмісту компонентів. Як компоненти взяті відповідно високомодульні вуглецеві волокна з характеристиками [31]

$$E_1^1 = 8 \text{ ГПа}; \quad E_3^1 = 226 \text{ ГПа}; \quad \nu_{12}^1 = 0,3; \quad \nu_{13}^1 = 0,2; \quad G_{13}^1 = 60 \text{ ГПа}; \quad (37)$$

Об'ємним вмістом $c_1 = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ і епоксидна матриця з характеристиками [19, 31]

$$E_2 = 3 \text{ ГПа}; \quad \nu_2 = 0,35; \quad E_2' = 0,02 \text{ ГПа}; \quad \sigma_{02} = 0,12 \text{ ГПа}; \quad (38)$$

де E_2, ν_2 – відповідно модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матриці; E_1^1 і E_3^1, ν_{12}^1 і ν_{13}^1, G_{12}^1 і G_{13}^1 – відповідно поперечний і поздовжній модулі Юнга, коефіцієнти Пуассона і модулі зсуву волокон, які пов'язані з $\lambda_{11}^1, \lambda_{12}^1, \lambda_{13}^1, \lambda_{33}^1, \lambda_{44}^1$ формулами

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 &= E_1^1 E_3^1 \left[E_3^1 \left(2 - \frac{E_1^1}{2G_{12}^1} \right) - 2E_1^1 (\nu_{13}^1)^2 \right]^{-1}; \quad \lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 = G_{12}^1; \\ \lambda_{13}^1 &= \nu_{13}^1 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1); \quad \lambda_{33}^1 = (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) \frac{E_3^1}{E_1^1} \left(2 - \frac{E_1^1}{2G_{12}^1} \right); \quad \lambda_{44}^1 = G_{13}^1. \end{aligned} \quad (39)$$

На основі отриманих залежностей було досліджено ефективні діаграми нелінійного деформування просторово-армованого волокнистого матеріалу з розорієнтованими волокнами та фізично нелінійною матрицею при різних об'ємних концентраціях волокон в випадку заданих макропараметрів.

$$\langle \varepsilon_{11} \rangle \neq 0; \quad \langle \sigma_{22} \rangle = \langle \sigma_{33} \rangle = 0. \quad (40)$$

В цьому випадку згідно (20) макронапруження $\langle \sigma_{11} \rangle$ в композиті пов'язані з макродеформацією $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ співвідношенням

$$\langle \sigma_{11} \rangle = \frac{(3\lambda^{**} + 2\mu^{**})\mu^{**}}{\lambda^{**} + \mu^{**}} \langle \varepsilon_{11} \rangle. \quad (41)$$

На рис. 2 наведено графіки залежностей макронапруження $\langle \sigma_{11} \rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ для просторово-армованого волокнистого матеріалу з розорієнтованими волокнами та фізично нелінійною матрицею при різних об'ємних концентраціях волокон c_1 . Як бачимо, фізична нелінійність матриці матеріалу істотно впливає на характер діаграм деформування для всіх значеннях об'ємного вмісту волокон $c_1 < 1$.

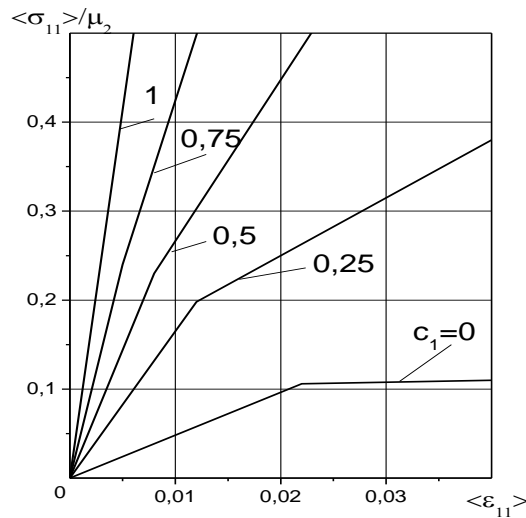


Рис. 2. Залежності макронапруження $\langle \sigma_{11} \rangle / \mu_2$ від макродеформації для $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ просторово-армованого волокнистого матеріалу з розорієнтованими волокнами при різних об'ємних концентраціях волокон c_1

Висновки. В цій роботі проведено дослідження нелінійного деформування просторово-армованих волокнистих матеріалів з фізично нелінійною матрицею. Побудовано модель нелінійного деформування таких композитних матеріалів, розроблено алгоритм визначення напружено-деформованого стану та ефективних деформативних властивостей просторово-армованих волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами та фізично нелінійною матрицею, а також досліджено залежність деформування матеріалу від об'ємного вмісту волокон. Встановлено, що фізична нелінійність матриці істотно впливає на характер діаграм деформування на всіх значеннях об'ємного вмісту волокон $c_1 \ll 1$. На відміну від випадку лінійного деформування матриці, коли залежності макронапружень від макродеформацій є лінійними, матеріал за межею пружності деформується за параболічним законом при всіх об'ємних концентраціях волокон $c_1 \ll 1$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Каудерер Г. Нелинейная механика. URL: <https://www.razym.org/naukaobraz/disciplini/fizika/277596-kauderer-g-nelineynaya-mekhanika.html> . (дата звернення 10.09.2021).

2. Бленд Д. Нелинейная динамическая теория упругости. URL: <https://www.nehudlit.ru › books › detail91160> . (дата звернення 21.02.2022).
3. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. URL: <teoriyauprugosti1980.djvu> . URL: <http://bookshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=lure-ai&book=1980&page=N> (дата звернення 21.02.2022).
4. Митропольский Ю.А., Березовский А.А., Шхануков М.Х. Пространственно-временная локализация в задачах со сводными границами для нелинейного уравнения второго порядка // Укр.мат.журнал. 2006. Т. 58, № 2. С. 202–211.
5. Митропольский Ю.О., Березовский А.А. Задачи з вільними межами та нелокальні задачі для нелінійних параболічних рівнянь // Укр.мат.журн. 2007. Т. 59, № 1. С. 84–97.
6. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. . URL: <https://www.twirpx.com/file/238530/> (дата звернення 21.02.2022).
7. Green A.E., Adkins I.E. Large classic deformations. Oxford: Clarendon Press, 2000. 325 p.
8. Hill R. Theory of mechanical properties of finite strengthened materials // J. Mech. Phys. Solids. 1995. V. 43, N 4. P. 189-198.
9. Hill R. On a class of constitutive relations for nonlinear infinitesimal elasticity // J. Mech. Phys. Solids. 2007. V. 55, N 5. P. 565-576.
10. Ogden R.W. On the overall moduli of nonlinear elastic composite materials // J. Mech. Phys. Solids. 2004. V. 52, N 6. P. 265-282.
11. Ogden R.W. Extremum principles in nonlinear elastic composites materials // J. Mech. Phys. Solids. 2008. V. 56, N 4. P. 541-554.
12. Васильев В.В., Солдатов С.А. Соотношения нелинейной механики композитных материалов // Механика композит. материалов. 2009, №3. С. 3-8.
13. Крегерс А.Ф., Мелбардіс Ю.Г. Расчет деформируемости пространственно-армируемого композита с упругопластической матрицей // Механика композитных материалов. 2002, № 4. С. 601-607.
14. Малмейстер А.К., Янсон Ю.О. Прогнозирование деформативности физически нелинейных материалов при сложном напряженно состоянии // Механика композитных материалов. 2001, № 2. С. 314-318.
15. Хорошун Л.П., Маслов Б.П. Нелинейные свойства композитных материалов стохастической структуры. К.: Наук. думка, 2003. 132 с.
16. Хорошун Л.П. Методы теории случайных функций в задачах о макроскопических свойствах микронеоднородных сред // Прикладная механика. 1978. Т. 14, № 2. С. 3–17.
17. Хорошун Л.П. Метод условных моментов в задачах механики композитных материалов // Прикладная механика. 1987. Т. 23, № 10. 100–108.
18. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Шикуча Е.Н., Назаренко Л.В. Механика композитов: В 12-х т. / под общ. ред. А.Н.Гузя / Т.3 Статистическая механика и эффективные свойства материалов. К.: Наук. думка, 1993. 390 с.
19. Гузь А.Н., Хорошун Л.П., Михайлова М.И., Бабич Д.В., Шикуча Е.Н. Механика композитов: В 12 т. / под общ. ред. А.Н.Гузя / Т. 12: Прикладные исследования. К: «А.С.К.», 2003. 398 с.
20. Хорошун Л.П., Шикуча Е.Н., Деформирование физически нелинейных стохастических композитных материалов. Деформирование и кратковременная повреждаемость физически нелинейных стохастических композитных материалов / Успехи механики: В 6-ти томах / под редакцией А.Н.Гузя. / Том 6 (книга 2). К.: Литера ЛТД, 2011. 832 с. С. 161–191, 436-463.
21. Хорошун Л. П., Шикуча Е.Н. Нелинейные деформативные свойства дисперсно-упрочненных материалов // Механика композитных материалов. 2002. Т. 38, № 4. С. 473-486
22. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Deformation of physically nonlinear stochastic composites // International Applied Mechanics. 2008. V. 44. N 12. P. 1325-1351.
23. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Deformation and short-term damage of physically nonlinear stochastic composites // International Applied Mechanics. 2009. V. 45. N 6. P. 1204-1232.
24. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Deformation and damage of composite materials of stochastic structures: physically nonlinear problems // International Applied Mechanics. 2012. V. 48. N 4. P. 359-413.
25. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Deformation and long-term damage of physically nonlinear fibrous materials // International Applied Mechanics. 2014. Vol. 50, N 1. P. 58-67.
26. Хорошун Л. П., Шикуча Е.Н. Ефективні деформівні властивості волокнистих композитних матеріалів при нелінійному деформуванні компонентів // Доповіді Національної академії наук України. 2016. № 6. С. 47 - 55.
27. Шикуча Е.Н., Хорошун Л. П. Нелинейное деформирование волокнистых материалов // Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного. К.: КДАВТ, 2016. № 2 (25). С. 29 - 36.
28. Хорошун Л. П., Шикуча Е.Н. Nonlinear deformation of laminated fiber-reinforced composites // International Applied Mechanics. 2005. Vol. 41. N 6. P.455–461
29. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Thermoelastic properties of spatially reinforced materials // International Applied Mechanics. 2011. Vol. 47, N 1. P. 13-20.
30. Шикуча О.М. Модель деформування волокнистих матеріалів багатоспрямованого армування з розорієнтованими волокнами // Транспортні системи і технології. К.: ДУІТ. 2021. № 37. С. 119-129.
31. Крегерс А. Ф. Математическое моделирование термического расширения пространственно армированных композитов // Механика композитных материалов. 2008. № 3. С. 433-441.

REFERENCES

1. Kauderer G. Nelineynaya mekhanika. [Non-linear mechanics]. Retrieved from http://ssily.ru/admin/uploads/states/file/aktivnyie_filtryi_garmonik_rus.Pdf (Accessed 18 May 2014).
2. Blend D. Nelineynaya dinamicheskaya teoriya uprugosti. [Nonlinear dynamic theory of elasticity]. Retrieved from https://www.nehudlit.ru/books/detail91160_rus.Pdf (Accessed 18 June 2008).
3. Lur'ye A.I. Nelineynaya teoriya uprugosti. [Nonlinear theory of elasticity]. Retrieved from teoriyauprugosti1980.djvu. Retrieved from <http://bookshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=lure-ai&book=1980&page=N>. (Accessed 6 June 2009).
4. Mitropol'skiy YU.A., Berezovskiy A.A., Shkhanukov M.KH. (2006) Prostranstvenno-vremennaya lokalizatsiya v zadachakh so svodnymi granitsami dlya nelineynogo uravneniya vtorogo poryadka. [Spatiotemporal localization in problems with summary boundaries for a second-order nonlinear equation]. *Ukrainskiy Matematicheskiy Zhurnal - Ukrainian Mathematical Journal*. Vol. 58, № 2. С. 202–211.
5. Mitropol'skiy YU.A., Berezovskiy A.A. (2007). Zadachi z vil'nymy mezhamy ta nelokal'ni zadachi dlya neliniynykh parabolichnykh rivnyan'. [Free boundary value problems and nonlocal problems for nonlinear parabolic equations]. *Ukrainskiy Matematicheskiy Zhurnal - Ukrainian Mathematical Journal*. Vol. 59, № 1. С. 84–97.
6. Novozhilov V.V. Osnovy nelineynoy teorii uprugosti. [Fundamentals of the nonlinear theory of elasticity]. Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/238530/> (Accessed 28 July 2017).
7. Green A.E., Adkins I.E. (2000). Large classic deformations. Oxford: Clarendon Press. 325 p. (in English).
8. Hill R. (1995). Theory of mechanical properties of finite strengthened materials // *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 43, N 4. P. 189-198. (in English).
9. Hill R. (2007). On a class of constitutive relations for nonlinear infinitesimal elasticity // *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 55, N 5. P. 565-576. (in English).
10. Ogden R.W. (2004). On the overall moduli of nonlinear elastic composite materials // *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 52, N 6. P. 265-282. (in English).
11. Ogden R.W. (2008). Extremum principes in nonlinear elastic composites materials // *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 56, N 4. P. 541-554. (in English).
12. Vasil'ëv V.V., Soldatov S.A. (2009). Sootnosheniya nelineynoy mekhaniki kompozitnykh materialov [Relationships of Nonlinear Mechanics of Composite Materials]. // *Mekhanika kompozitnykh materialov - Mechanics of composite materials*. №3. С. 3-8.
13. Kregers A.F., Melbardis YU.G.(2002). Raschet deformiruyemosti prostranstvenno-armiruyemogo kompozita s uprugoplasticheskoy matritsey [Calculation of the Deformability of a Spatially Reinforced Composite with an Elastic-Plastic Matrix]. // *Mekhanika kompozitnykh materialov - Mechanics of composite materials*. № 4. С. 601-607.
14. Malmeyer A.K., Yanson YU.O. (2001). Prognozirovaniye deformativnosti fizicheski nelineynykh materialov pri slozhnom napryazhenno sostoyanii [Predicting the Deformability of Physically Nonlinear Materials under a Complex Stress State]. // *Mekhanika kompozitnykh materialov - Mechanics of composite materials*. № 2. С. 314-318.
15. Khoroshun L.P., Maslov B.P. (2003). Nelineynnye svoystva kompozitnykh materialov stokhasticheskoy struktury. [Nonlinear Properties of Composite Materials with a Stochastic Structure]. K.: Nauk. Dumka.
16. Khoroshun L.P. (1978). Metody teorii sluchaynykh funktsiy v zadachah o makroskopicheskikh svoystvakh mikroednorodnykh sred [Methods of the theory of random functions in problems of macroscopic properties of microinhomogeneous media]. *Prikladnaya mehanika - Applied Mechanics*. Vol. 14, 2, 3–17.
17. Khoroshun L.P. (1987). Metod uslovykh momentov v zadachah mehaniki kompozitnykh materialov [The method of conditional moments in the problems of mechanics of composite materials]. *Prikladnaya mehanika - Applied Mechanics*. Vol. 23, 10. 100–108.
18. Khoroshun L.P., Maslov B.P., Shikula E.N., & Nazarenko L.V. (1993) *Mekhanika kompozitov*. (Vols. 1-12). Vol. 3. Statisticheskaya mehanika i effektivnye svoystva materialov [Mechanics of composites. (Vols. 1-12). Vol. 3. Statistical mechanics and effective properties of materials]. K.: Nauk. Dumka.
19. Guz A.N., Khoroshun L.P., Mihaylova M.I., Babich D.V., Shikula E.N. (2003) *Mekhanika kompozitov*. (Vols. 1-12). Vol. 12. Prikladnye issledovaniya [Mechanics of composites. (Vols. 1-12). Vol. 12. Applied research]. K.: «A.S.K.»
20. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2011) Deformirovaniye fizicheski nelineynykh stokhasticheskikh kompozitnykh materialov. Deformirovaniye i kratkovremennaya povrezhdaemost fizicheski nelineynykh stokhasticheskikh kompozitnykh materialov [The deformation of physically nonlinear stochastic composite materials. Deformation and short-term damage of physically nonlinear stochastic composite materials]. *Uspеhi mehaniki - (Vols. 1-6; Vol. 6.2)*. K.: Litera LTD.
21. Khoroshun L. P., Shikula E.N. (2002) Nelineynnye deformativnye svoystva dispersno-uprochnennykh materialov [Nonlinear deformation properties of dispersion-hardened materials] // *Mekhanika kompozitnykh materialov - Mechanics of composite materials*. Vol. 38, 4, 473-486.
22. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2008). Deformation of physically nonlinear stochastic composites // *International Applied Mechanics*. 2008.V. 44. N 12. P. 1325-1351. (in English).
23. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2009). Deformation and short-term damage of physically nonlinear stochastic composites // *International Applied Mechanics*. V. 45. N 6. P. 1204-1232. (in English).

24. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2012). Deformation and damage of composite materials of stochastic structures: physically nonlinear problems // International Applied Mechanics. V. 48. N 4. P. 359-413. (in English).
25. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2014). Deformation and long-term damage of physically nonlinear fibrous materials // International Applied Mechanics. Vol. 50, N 1. P. 58-67. (in English).
26. Khoroshun L.P., Shikula O.M. (2016) Efektyvni deformivni vlastyvoli voloknystykh kompozytnykh materialiv pry neliniynomu deformuvanni komponentiv [Effective deformable properties of fibrous composite materials in nonlinear deformation of components] // Dopovidi Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy - Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 6, 47-55.
27. Shikula E.N., Khoroshun L. P. (2016) Nelinejnoe deformirovanie voloknistykh materialov [Nonlinear deformation of fibrous materials] // Vodnij transport. Zbirnik naukovih prac' Kiivs'koï derzhavnoï akademii vodnogo transportu imeni get'mana Petra Konashevicha-Sagajdachnogo - Water transport. Collection of scientific works of the Kyiv State Academy of Water Transport named after Hetman Petro Konashevich-Sagaydachny. K.: KDAVT. Vol 25, 2, 29-36.
28. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2011) Thermoelastic properties of spatially reinforced materials // International Applied Mechanics. Vol. 47, 1, 13-20. (in English)
29. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2011) Thermoelastic properties of spatially reinforced materials // International Applied Mechanics. Vol. 47, 1, 13-20. (in English)
30. Shikula E.N. (2021) Model' deformuvannya voloknystykh materialiv bahatospryamovanoho armuvannya z rozoriyentovanyimi voloknami [Model of deformation of fibrous materials of multidirectional reinforcement with disoriented fibers] // Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies. K.: DUIT, 37, 119-129.
31. Kregers A. F. (2008). Matematicheskoe modelirovanie termicheskogo rasshirenija prostranstvenno armiro-vannykh kompozitov [Mathematical modeling of thermal expansion of spatially reinforced composites] // Mehanika kompozitnykh materialov - Mechanics of composite materials. Vol. 24, 3, 433-441.

*Elena Shikula*¹

¹ Professor of the Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Solomianska Street, 7, Kyiv, 03110

CONSTRUCTION OF A MODEL OF NONLINEAR DEFORMATION OF SPATIALLY-REINFORCED FIBER MATERIALS WITH DISORDERED FIBERS

A model of nonlinear deformation of fibrous materials of multidirectional reinforcement with misoriented fibers and a physically nonlinear matrix is proposed. A spatially reinforced fibrous material is regarded as a multicomponent material with a random arrangement of fibers. It is based on stochastic differential equations of the physically nonlinear theory of elasticity. The solution to the problem of the stress-strain state and the effective properties of the composite material is constructed by the method of conditional moments of L.P. Khoroshun. An algorithm for determining the effective deformative properties of a spatially reinforced material with a physically nonlinear matrix has been developed. The solution of nonlinear equations taking into account its physical nonlinearity is constructed by an iterative method. The law of connection between macrostresses and macrostrains in a spatially reinforced material and the dependence of average strains and stresses in its matrix on macrostrains have been established. Material deformation curves are plotted for various values of the fiber volumetric content. The dependence of the effective deformative properties of the spatially reinforced material on the volumetric content of fibers has been studied. The influence of the nonlinearity of the matrix on the deformation of a spatially reinforced composite material is investigated. It has been established that the nonlinearity of the matrix has a significant effect on the effective deformative properties and the stress-strain state of spatially reinforced materials.

Keywords: *model of nonlinear deformation, fibrous material of multidirectional reinforcement, uniform misorientation of fibers, nonlinear deformation of the matrix, stress-strain state, effective deformation properties, influence of nonlinearity, computer implementation.*

Інна Саяпіна^{1*}, Олександр Горобченко², Володимир Демченко³, Штомпель Юлія⁴

¹ Доцент кафедри “Системи штучного інтелекту та телекомунікаційні технології”, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

² Професор кафедри електромеханіки і рухомого складу залізниць Державного університету інфраструктури та технологій, м. Київ, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9868-3852>

³ Доцент кафедри “Електромеханіка та рухомий склад залізниць”, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-2478-364X>

⁴ Викладач, Київський електромеханічний фаховий коледж, пр. Повітрофлотський, 35, м. Київ, 03037, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3150-575X>

* Автор, відповідальний за листування: inna.saiapina@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТОНАЛЬНОГО РЕЙКОВОГО КОЛА

Для вдосконалення відомого методу підвищення завадостійкості тонального рейкового кола, заснованого на вирізанні завад в інтервалах між імпульсами корисного сигналу, проведений аналіз коливань часу проходження сигналу в тракці передачі тонального рейкового кола залежно від параметрів його роботи: частоти сигнального струму, довжини рейкової лінії, опору ізоляції та температури навколишнього середовища. Для цього розроблено імітаційну модель роботи тонального рейкового кола. За результатами моделювання створена реляційна база даних зі значеннями характеристик вимірювань. З використанням методів інтелектуального аналізу визначено, що основним фактором, який впливає на час проходження сигналу у тракці передачі тонального рейкового кола, є частота сигнального струму. Визначені основні залежності параметрів роботи тонального рейкового кола та часу проходження сигналу. Отримані результати дозволяють підвищити завадостійкість роботи тональних рейкових кіл за рахунок точнішого налаштування інтервалу вирізання завад між імпульсами корисного сигналу.

Ключові слова: тональне рейкове коло, імітаційна модель, база даних, інтелектуальний аналіз, завадостійкість.

Вступ. Основним колійним датчиком на залізницях України є рейкові кола і від їх безперебійної роботи залежить безвідмовність та безпечність процесу перевезень. На ділянках швидкісного руху широке розповсюдження набули тональні рейкові кола (ТРК). Рейкові кола працюють у складних умовах дії великої кількості завад. Впровадження локомотивів на основі асинхронних електроприводів, застосування централізованого електричного опалення пасажирських поїздів, використання тиристорного імпульсного регулювання тягових двигунів створює небезпечні завади в тому числі в робочому діапазоні частот ТРК [1, 2]. Тому актуальним є удосконалення методів підвищення завадостійкості роботи ТРК.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. У публікаціях [3, 4] наводиться приклад французьких багаторічних досліджень, в результаті яких розроблене безстикове

рейкове коло UM71 з низькою частотою модуляції, що демонструє гарні характеристики з завадостійкості. Китайські дослідники зазначають [5], що на основі французької моделі рейкового розроблено безстикове рейкове коло ZPW-2000A, що зберігає технічні переваги UM71, має підвищену надійність та актуалізоване відповідно до вимог китайської залізниці.

Автори статті [6] для підвищення надійності роботи ТРК пропонують використання рекурентних нейронних мереж з довготривалою пам'яттю (LSTM) на основі використання доступних даних, що вимірюються. При цьому вони моделюють напругу сигналу завдяки побудові математичної моделі ТРК. За результатами їх вимірювання дані мережі краще виконують задачі з ідентифікації несправностей, ніж згорткові мережі. Італійські дослідники в матеріалі [7] також наводять приклад моделювання та верифікації ТРК на високошвидкісній магістралі Турин – Новара, і відзначають значну допомогу моделювання роботи ТРК у різних умовах експлуатації, прогнозування впливу завад, що може замінити серію попередніх вимірювань та прискорити процес налаштування обладнання тонального рейкового кола на місці.

Велика кількість досліджень, що стосуються ТРК, присвячена саме проблемі завадостійкості їх роботи. У статті [8] зазначається, що електромагнітні завади та несприятливі погодні умови можуть суттєво змінювати параметри сигнального струму. Для усунення небезпечних впливів пропонується застосування автоматичної системи діагностики параметрів роботи ТРК на основі нейро-нечіткої логіки. У роботі [9] автори аналізують вплив температури навколишнього середовища на надійність роботи ТРК за допомогою моделі лінійної регресії. Але у даній роботі не запропоновано засобів покращення надійності роботи ТРК у складних умовах.

У статтях [10, 11] досліджуються методи захисту від завад тягового струму. В роботі [12] запропоновано автоматизоване виявлення завад за рахунок застосування вейвлет-перетворення та використання нейромережевого класифікатора.

Але запропоновані методи підвищення завадостійкості не дозволяють повною мірою виключити факт впливу завад на приймальну апаратуру ТРК, тому дослідження цього питання залишається актуальним.

У публікаціях [13-15] описано метод підвищення завадостійкості тональних рейкових кіл, що дозволяє зменшити вплив завад на вході колійного приймача в інтервалах між імпульсами сигналу контролю стану ТРК. Для реалізації даного методу до апаратури ТРК додатково вводиться регульована лінія затримки, генератор одиночного імпульсу і керований електронний ключ.

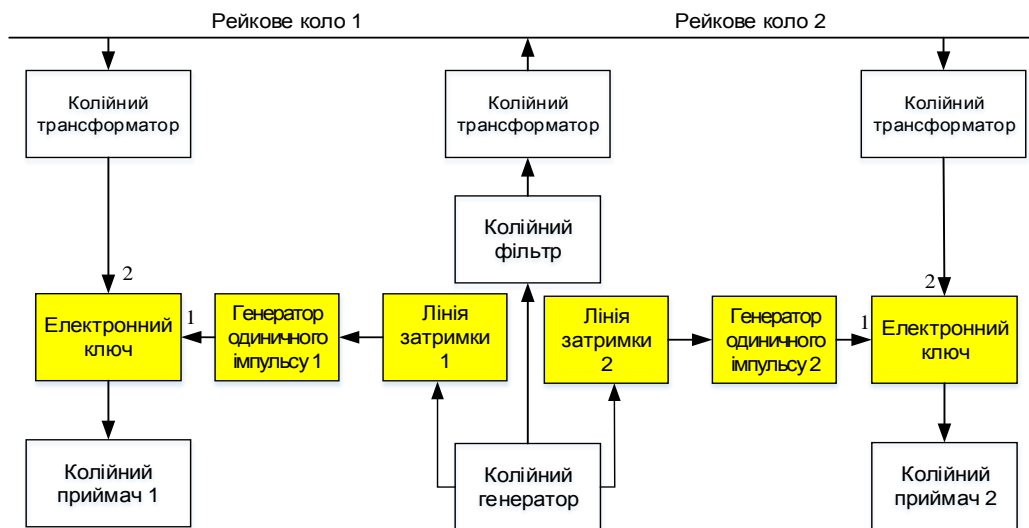


Рис. 1. Структурна схема реалізації методу підвищення завадостійкості ТРК

Реалізується даний метод завдяки розмиканню керуваного електронного ключа на вході колійного приймача під час відсутності імпульсів корисного сигналу, завдяки чому зменшується кількість завад, що надходять на вхід колійного приймача ТРК. Лінія затримки в даному випадку затримує керуючий сигнал, що подається на вхід генератора одиничного імпульсу, на час проходження корисного сигналу з виходу колійного генератора через рейкове коло на вхід колійного приймача.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є підвищення ефективності запропонованого методу [13-15] за рахунок аналізу затримки проходження сигналу залежно від його несучої частоти, довжини рейкової лінії, значення опору ізоляції та температури навколишнього середовища з метою підвищення точності налаштування лінії затримки відповідно до конкретних умов. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

розробити імітаційну модель роботи тонального рейкового кола з урахуванням впливу коливань опору ізоляції та температури навколишнього середовища для різної довжини рейкової лінії та несучої частоти корисного сигналу;

розробити базу даних, що складається з регульованих таблиць для різних значень частоти сигналу ТРК, довжини рейкової лінії, опору ізоляції та температури навколишнього середовища.

Матеріали та методи дослідження. З метою підвищення ефективності запропонованого методу підвищення завадостійкості ТРК розроблена імітаційна модель роботи ТРК третього покоління з використанням програмного математичного комплексу Matlab та Simulink (рис. 2).

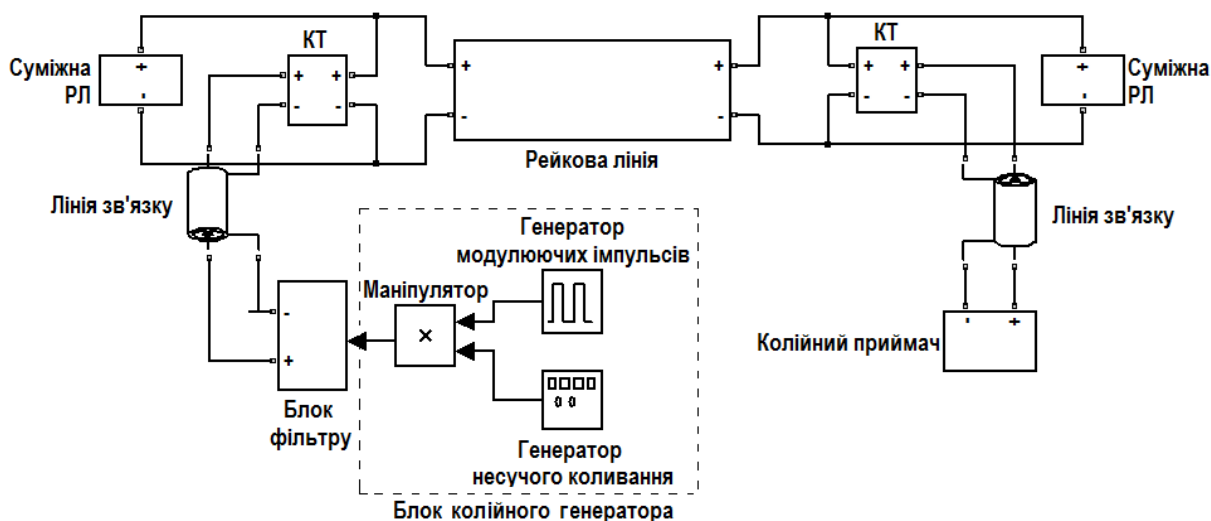


Рис. 2. Структура імітаційної моделі тонального рейкового кола третього покоління

Структура моделі складається з блоків, що моделюють роботу колійного генератора, колійного фільтра, ліній зв'язку при централізованому розміщенні апаратури, колійних трансформаторів (КТ), рейкових ліній (РЛ) суміжних рейкових кіл, рейкової лінії та колійного приймача. Блок колійного генератора представлений генератором несучої частоти, генератором імпульсів і маніпулятором. Генератор несучої частоти виробляє синусоїдальний сигнал заданої частоти і амплітуди, який надходить на перший вхід маніпулятора. На другий вхід маніпулятора подається імпульсний сигнал з частотою модуляції. Маніпулятор виконує операцію множення синусоїдального сигналу несучої частоти з імпульсним сигналом, який виробляється з частотою модуляції. Блок колійного фільтра виконаний на основі елементів ємнісного, активного і реактивного опорів. Основою блоків кабельних і рейкових ліній є

модель лінії з розподіленими параметрами. Також враховано вплив рейкових ліній суміжних ділянок на функціонування ТРК за рахунок впливу опорів суміжних ділянок РЛ на переданий сигнал за допомогою постійної поширення сигналу γ .

Вплив коливань температури навколишнього середовища на передачу сигналу в ТРК було враховано через зміну кілометричного опору рейкової нитки залежно від температури рейки, відповідно до виразу [16]:

$$R_a^{\bar{}} = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)] , \quad (1)$$

де R_{20} – кілометричний опір при температурі $+20^{\circ}\text{C}$,

α – температурний коефіцієнт опору (для рейкової сталі становить $0,0461$ 1/град.),

t – температура рейки, град.

Для перевірки адекватності розробленої моделі за результатами моделювання була отримана вибірка емпіричних значень напруги на вході колійного приймача залежно від довжини рейкової лінії, частоти сигнального струму та опору баласту. За допомогою програмного комплексу Excel ці дані були порівняні з вибіркою відповідних реальних значень напруги на вході колійного приймача та проведений дисперсійний порівняльний аналіз даних вибірок з обраним рівнем значущості $0,05$. Результати подано в табл. 1.

Таблиця 1. Результати дисперсійного аналізу вибірок значень напруги на вході колійного приймача, отриманих на реальному зразку та за допомогою моделювання

Джерело варіації	Сума квадратів відхилень	Ступінь свободи	Середній квадрат	Критерій Фішера	Р-Значення (рівень значущості)	Критичне значення критерію Фішера
Між групами	0,00128	1	0,00128	0,134000233	0,718586948	4,413873419
Всередні груп	0,17194	18	0,009552			
Разом	0,17322	19				

Отримане значення критерію Фішера є меншим за критичне, а також отримане Р-значення з довірчою ймовірністю 95% підтверджує гіпотезу про неістотність відмінностей двох вибірок.

За допомогою розробленої моделі була проведена серія досліджень, за результатами яких сформована реляційна база даних з таблицями відповідності значень параметрів роботи ТРК на основі 521 вимірювання. Для моделювання використовувались значення частот сигнального струму ТРК третього покоління 420 Гц, 480 Гц, 580 Гц, 720 Гц та 780 Гц, значення довжин рейкової лінії 200 м, 500 м, 800 м та 1000 м, значення опору ізоляції 1 Ом·км, 2 Ом·км, 10 Ом·км, 25 Ом·км та 50 Ом·км, значення температури навколишнього середовища -30°C , -20°C , 0°C , 20°C , 40°C .

Час, який витрачається на проходження сигналом тракту ТРК, був отриманий на основі різниці значення фази сигнального струму між початковою фазою та фазою на вході колійного приймача.

За допомогою пакету інтелектуального аналізу Data Mining для Excel був проведений аналіз ключових факторів впливу на величину часу затримки проходження сигналів серед частоти сигнального струму, довжини рейкової лінії та опору ізоляції. Результати показали, що найбільший вплив на час затримки має частота сигнального струму (рис. 3).

Фактор	Значення	Підходить	Відносний вплив
f_n , Гц	780	< 0,35	
f_n , Гц	720	< 0,35	
l_{PK} , м	200	< 0,35	
$R_{із}$, Ом·км	≥ 25	< 0,35	
f_n , Гц	580	0,35 - 0,47	
$R_{із}$, Ом·км	2 - 10	0,35 - 0,47	
f_n , Гц	480	0,35 - 0,47	
f_n , Гц	420	0,56 - 0,67	
f_n , Гц	420	$\geq 0,67$	
$R_{із}$, Ом·км	1 - 2	$\geq 0,67$	
l_{PK} , км	1	$\geq 0,67$	
$R_{із}$, Ом·км	< 1	$\geq 0,67$	
l_{PK} , м	800	$\geq 0,67$	

Рис. 3. Результати інтелектуального аналізу ключових факторів впливу на параметр часу затримки, мс

За допомогою вибірок отриманих за результатами моделювання даних побудовані графіки впливу параметрів роботи на час затримки проходження сигналу у тракті ТРК (рис. 4-6).

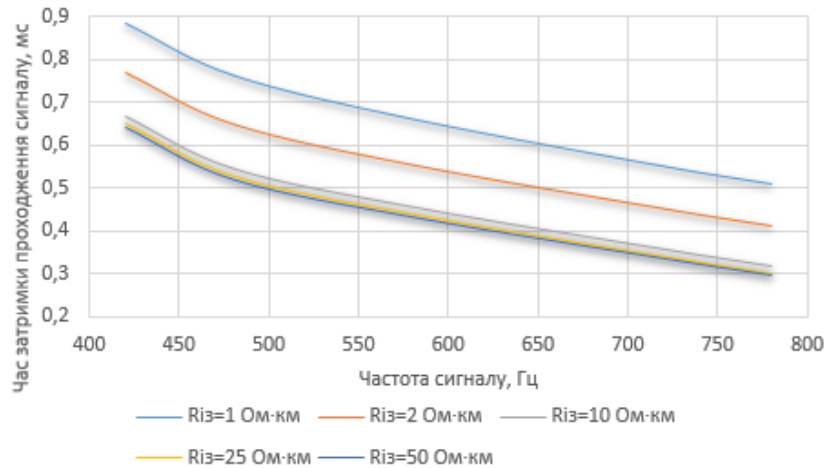


Рис. 4. Залежність часу затримки сигналу від його несучої частоти ($l_{PK}=1$ км)

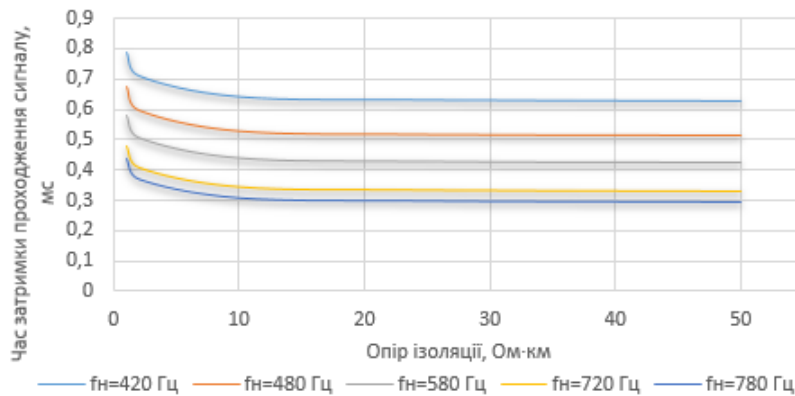


Рис. 5. Залежність часу затримки сигналу від опору баласту (для $l_{PK}=0,8$ км)

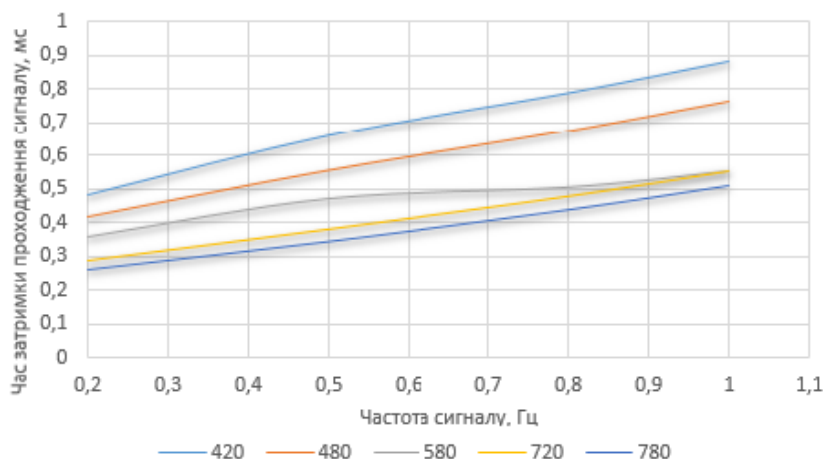


Рис. 6. Залежність часу затримки сигналу від довжини РЛ ($R_b=1 \text{ Ом}\cdot\text{км}$)

Висновки. Розроблено імітаційну модель роботи ТРК третього покоління. Дана модель враховує вплив довжини рейкового кола, опору ізоляції та температури навколишнього середовища на характеристики сигналу. В результаті моделювання створено реляційну базу даних зі значеннями характеристик 521 вимірювання. На основі інтелектуального аналізу визначено, що основним фактором, що впливає на величину часу проходження сигналу у тракці передачі ТРК є параметр частоти сигнального струму. Також визначено, що значення температури навколишнього середовища не має суттєвого впливу на час затримки. За результатами аналізу отриманих даних визначено, що мінімальний час проходження сигналу 0,246 мс відповідає сигналу з частотою 780 Гц при довжині рейкової лінії 0,2 км і опорі ізоляції 50 Ом. Максимальний час 0,927 мс відповідає сигналу з частотою 420 Гц при довжині рейкової лінії 1 км і опорі ізоляції 0,85 Ом·км. Середнє значення часу проходження сигналу становить 0,4565 мс, середньоквадратичне відхилення – 0,1453 мс і дисперсія – 0,0211 мс². Зміна фази сигналу при проходженні рейкової лінії прямо пропорційна довжині рейкової лінії, частоті сигнального струму і обернено пропорційна опорі ізоляції. Отримані результати дозволяють підвищити завадостійкість роботи тональних рейкових кіл за рахунок точнішого налаштування лінії затримки відповідно до умов роботи кола. А отримана імітаційна модель дозволяє розробляти уточнені регульовальні таблиці при коливанні основних параметрів роботи тональних рейкових кіл.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гаврилюк В.И., Щека В.И., Мелешко В.В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2015. №5 (59). С.7-15.
2. V. Havryliuk, Model of Propagation of Traction Current Harmonics from Trains to a Track Circuit Receiver // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/APEMC49932.2021.9597152.
3. K. B. Park, J. Y. Park, M. S. Jang, M. S. Lim, and S. H. Kim. A study on the internal modeling of track circuit (UM71-C) on HSL // Proceedings of. KIEE Conf. Korean Inst. Electr. Eng., 2006, pp. 1130–1131.
4. A. Debiolles, L. Oukhellou, P. Aknin, and T. Denoeux. Track circuit automatic diagnosis based on a local electrical modelling // Proceedings of WCRR, Jun. 2006, pp. 4–8.
5. Z. Zheng, S. Dai and X. Xie, Research on Fault Detection for ZPW-2000A Jointless Track Circuit Based on Deep Belief Network Optimized by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm // IEEE Access, vol. 8, pp. 175981-175997, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025628
6. T. de Bruin, K. Verbert and R. Babuška. Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 28, no. 3, pp. 523-533, March 2017, doi: 10.1109/TNNLS.2016.2551940

7. A. Mariscotti, M. Ruscelli and M. Vanti. Modeling of Audiofrequency Track Circuits for Validation, Tuning, and Conducted Interference Prediction // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 11, no. 1, pp. 52-60, March 2010, doi: 10.1109/TITS.2009.2029393.
8. V. Havryliuk. ANFIS Based Detecting of Signal Disturbances in Audio Frequency Track Circuits // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAIC51296.2020.9239127.
9. Zhanwu Huang, Shaobin Li, and Xueye Wei. Analysis of temperature impact on audio frequency track circuits using linear regression model / AIP Conference Proceedings 1834, 020019 (2017). doi: <https://doi.org/10.1063/1.4981558>
10. В.І. Щека. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад з боку контактної мережі // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. №1. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2011. С.84-90.
11. Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, В.І. Гаврилюк, В.Г. Сыченко. Принципы реализации активной фильтрации при построении современных систем электроснабжения электрической тяги // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. №1. Дніпро: Вид-во ДНУЗТ, 2011. С.67-76.
12. V. Havryliuk. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 491-496, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879833.
13. Саяпіна І.О.. Удосконалення методів і засобів підвищення заводостійкості тональних рейкових кіл: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / УкрДУЗТ. Харків, 2017. 160 с.
14. I.O. Saiapina. Analysis of an electromagnetic interference impact on the tonal track circuit's receiving equipment. Information-operating system on railway transport, 3, 24-31 (2013) (in Russian)
15. Saiapina I., Babaiev M. & Ananieva O. Reducing noise influence on an audio frequency track circuit // MATEC Web of Conferences - Les Ulis: EDP Science, 2019. V.294. P.1-6 DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403015>
16. Кулик П.Д., Ивакин В.С., Удовиков А.А. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности. Київ: Видавничий дім «Мануфактура», 2004. 288 с.

REFERENCES

1. V.I. Havryliuk, V.I. Shcheka, V.V. Meleshko (2015). Ispytaniya novykh tipov podvizhnogo sostava na elektromagnitnyuyu sovmestimost' s ustroystvami signalizatsii i svyazi [Tests of new types of rolling stock for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices]. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport], 5(59). 7-15.
2. V. Havryliuk, (2021). Model of Propagation of Traction Current Harmonics from Trains to a Track Circuit Receiver. 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 1-4. doi: 10.1109/APEMC49932.2021.9597152.
3. K. B. Park, J. Y. Park, M. S. Jang, M. S. Lim, and S. H. Kim, (2006). A study on the internal modeling of track circuit (UM71-C) on HSL. Proceedings of. KIEE Conf. Korean Inst. Electr. Eng., 1130-1131.
4. A. Debiolles, L. Oukhellou, P. Akin, and T. Denoeux, (2006). Track circuit automatic diagnosis based on a local electrical modelling. Proceedings of WCRR, 4-8.
5. Z. Zheng, S. Dai and X. Xie, (2020). Research on Fault Detection for ZPW-2000A Jointless Track Circuit Based on Deep Belief Network Optimized by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. IEEE Access, 8, 175981-175997. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025628
6. T. de Bruin, K. Verbert and R. Babuška (2017). Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28(3), 523-533. doi: 10.1109/TNNLS.2016.2551940
7. A. Mariscotti, M. Ruscelli and M. Vanti (2010). Modeling of Audiofrequency Track Circuits for Validation, Tuning, and Conducted Interference Prediction. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 11(1), 52-60. doi: 10.1109/TITS.2009.2029393.
8. V. Havryliuk (2020). ANFIS Based Detecting of Signal Disturbances in Audio Frequency Track Circuits. 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 1-6. doi: 10.1109/SAIC51296.2020.9239127.
9. Zhanwu Huang, Shaobin Li, and Xueye Wei (2017). Analysis of temperature impact on audio frequency track circuits using linear regression model. AIP Conference Proceedings 1834, 020019 doi: <https://doi.org/10.1063/1.4981558>
10. V.I. Shcheka. Orhanizatsiya zakhystu reykovykh kil vid elektromagnitnykh zavrad z boku kontaktnoyi merezhi [Organization of protection of rail circuits from electromagnetic interference from the catenary]. Elektromagnitna sumisnist' ta bezpeka na zaliznychnomu transporti [Electromagnetic compatibility and safety in railway transport], 1, 84-90. [in Ukrainian]
11. Y.P. Goncharov, N.V. Panasenko, V.I. Gavrilyuk, V.G. Sychenko (2011). Printsipy realizatsii aktivnoy fil'tratsii pri postroyenii sovremennykh sistem elektrosnabzheniya elektricheskoy tyagi [Principles for the implementation of active

filtration in the construction of modern electric traction power supply systems]. Elektromagnitna sumisnist' ta bezpeka na zaliznichnomu transport [Electromagnetic compatibility and safety in railway transport], 1, 67-76.

12. V. Havryliuk (2019). Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 491-496, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879833

13. I.O. Saiapina (2017). Improvement of methods and means to increase audio frequency track circuits noise immunity. *Thesis of PhD* Kharkiv, 160. (in Ukrainian)

14. I. O. Saiapina (2013). Issledovaniye vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na priyemnyuyu apparaturu tonal'nykh rel'sovykh tsepey [Analysis of an electromagnetic interference impact on the tonal track circuit's receiving equipment]. Informatsiyno – keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti [Information-operating systems on railway transport], 3, 24-31 (in Russian)

15. I. Saiapina, M. Babaiev, O. Ananieva (2019). Reducing noise influence on an audio frequency track circuit // MATEC Web Conf. 294 03015. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403015>

16. P.D. Kulik, V.S. Ivakin, A.A. Udovikov (2004). Tonal'nyye rel'sovyye tsepi v sistemakh ZHAT: postroyeniye, regulirovka, obsluzhivaniye, poisk i ustraneniye neispravnostey, povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti [Tone track circuits in RAT systems: construction, adjustment, maintenance, troubleshooting, improving operational reliability]. Kyiv: Vidavnychy house "Manufactory".

Inna Saiapina¹, Oleksandr Gorobchenko², Volodymyr Demchenko³, Yulia Stompel

¹ Associate Professor, Department of Artificial Intelligence and Telecommunication Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

² Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9868-3852>

³ Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock, The State University of Infrastructure and Technology, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-2478-364X>

⁴ Teacher, Kyiv Electromechanical Professional College, 35, Povitroflotsky Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3150-575X>

SIMULATION AND INTELLECTUAL ANALYSIS OF AUDIO FREQUENCY TRACK CIRCUIT PARAMETERS

To improve the method of increasing the noise immunity of a audio frequency track circuit, based on cutting out interference in the intervals between useful signal pulses, an analysis was made of fluctuations in the signal transit time in the transmission path of a audio frequency track circuit depending on its operation parameters: signal current frequency, rail line length, insulation resistance and ambient temperature. For this, a simulation model of the operation of a audio frequency track circle has been developed. Based on the simulation results, a relational database was created with the values of measurement characteristics. With the use of intellectual analysis methods it was determined that the main factor affecting the signal transit time in the transmission path of the audio frequency track circuit is the frequency of the signal current. The main dependences of the operation parameters of the audio frequency track circuit and the signal transit time are determined. The obtained results help to increase the noise immunity of the operation of audio frequency track circuits due to a more precise adjustment of the interference cut-off interval between the useful signal pulses.

Keywords: audio frequency track circuit, simulation model, database, intellectual analysis, noise immunity

Юрій Дубравін^{1*}, Віктор Ткаченко²

¹ Доцент, кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9006-5198>

² Професор, кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

* Автор, відповідальний за листування: dubravin_yf@gsuite.duit.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ

Перспективний електрорухомий склад (ЕРС) базується на застосуванні асинхронних тягових двигунів (АТД) із короткозамкненим ротором. Застосування асинхронного тягового електроприводу (АТП) дозволяє: збільшити потужність, силу тяги та швидкість ЕРС, підвищити надійність та знизити вартість життєвого циклу, збільшити термін служби. Крім того АТП подвійного живлення дає змогу забезпечити рух поїздів як на ділянках постійного струму напругою 3 кВ, так і на ділянках змінного струму напругою 25 кВ частотою 50 Гц без заміни ЕРС. У статті розглянуто математичну модель асинхронного тягового двигуна з урахуванням електричної та механічної частини тягового електроприводу. Модель описує електромагнітні процеси в обмотках статора у фіксованій системі координат α, β, γ , осі якої суміщені з осями фаз А, В, С статора. Процеси в короткозамкненому роторі описані в обертовій системі координат a, b, c . При моделюванні механічної частини електроприводу використовується основне рівняння динаміки, яке характеризує співвідношення між обертовим електромагнітним моментом і моментом опору на валу електродвигуна. В запропонованій моделі за допомогою функціональних блоків бібліотеки Simulink реалізовані методи імітаційного і структурного моделювання. Модель дозволяє досліджувати перехідні процеси з урахуванням: несинусоїдності та асиметрії напруги живлення; насиченості магнітної системи; ефекту витіснення струму в провідниках ротора; наявності міжвиткових замикань в обмотках статора та пошкоджень стрижнів ротора. Математична модель реалізована як матрична Simulink-модель асинхронного двигуна в MatLab. Достовірність математичної моделі перевірялась при проведенні віртуальних досліджень електромеханічних характеристик асинхронного двигуна типу АД914. Отримані результати підтвердили адекватність розробленої моделі та можливість використання розробленої моделі в інших практичних додатках.

Ключові слова: математична модель, асинхронний тяговий двигун, імітаційна модель, асиметричний режим, несинусоїдність напруги.

Вступ. На тяговому електрорухомому складі (ЕРС) залізниць активно впроваджуються асинхронні тягові двигуни (АТД), як на ділянках постійного струму з напругою 3 кВ, так і змінного струму з напругою 25 кВ і частотою 50 Гц. Встановлено, що застосування регульованого асинхронного тягового приводу (АТП) на ЕРС подвійного живлення є найбільш перспективним [1]. Підвищення конструкційної швидкості локомотивів базується на

застосуванні потужних АТД з короткозамкненим ротором. Показовим може бути АТП електровоза ДСЗ, де регулювання режимів роботи тягових двигунів здійснюється регулюванням напруги і частоти струму на обмотках статора за допомогою автономних інверторів напруги (АІН). АТД працюють в широкому діапазоні кутової швидкості та навантаження при живленні несинусоїдною імпульсною напругою. При низьких частотах в двигуні виникають значні пульсаційні моменти. Це створює значні механічні навантаження на стрижні ротора та інші вузли двигуна. Через комутаційні процеси в АІН в обмотці статора виникають небезпечні для ізоляції обмотки статора перенапруги. Значні пульсації струму в обмотках двигуна сприяють збільшенню втрат енергії, підвищенню температури обмоток АТД і, в результаті, – до передчасної відмови. Необхідний рівень надійності АТП в процесі експлуатації в першу чергу залежить від параметрів силового кола та системи керування АТП, які зумовлюють характер перехідних процесів та його енергетичні показники. Модель АТД, яка представлена в даній роботі, в складі моделі вхідного чотириквadrантного перетворювача [2] надає можливості для комплексного дослідження АТП ЕРС змінного струму. В процесі експлуатації АТД можливі такі дефекти, як замикання витків обмотки статора та пошкодження (обрив) стрижнів обмотки ротора. Тому розробка математичної моделі, що враховує наявність дефектів, необхідна також для розробки способів і засобів ранньої діагностики технічного стану тягових двигунів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Відомо, що залежно від прийнятої системи координат моделі асинхронних двигунів діляться на три класи:

- моделі у природних трифазних системах координат статора (ABC) та ротора (abc);
- моделі у двофазних ортогональних системах координат;
- моделі двофазні з використанням ефективних або амплітудних значень сигналів.

У більшості робіт [3 – 6] при моделюванні асинхронних машин використовуються двофазні моделі, які передбачають виконання умов симетрії обмоток статора та ротора, симетрії та синусоїдальності напруги живлення. Особливої уваги заслуговує метод симетричних складових, в якому система несиметричної напруги статора зображується, як сума прямої і зворотної послідовності [7]. В статтях [8 – 11] проведено дослідження та аналіз енергетичної ефективності асинхронних двигунів загального призначення в режимах несиметрії та несинусоїдності напруги живлення. Значну увагу приділено питанням удосконалення моделей АТД з метою оцінки технічного стану та діагностики машин [12 – 15]. Математична модель АТД з коротко замкнутим ротором, описана у роботі [16], призначена для аналізу стаціонарних і перехідних процесів при наявності пошкоджень стрижнів ротора. Фізичні процеси в машині при пошкодженні в статорних обмотках та в «білячій клітці» ротора досліджені також за допомогою математичної моделі АТД з використанням штучних нейронних мереж у роботі [17].

Удосконалений метод спектрального аналізу тягового струму електровозів змінного струму та удосконалену модель роботи асинхронного тягового двигуна за участю несиметричних обмоток статора розглянуто у статтях [18, 19].

Незважаючи на досить велику кількість публікацій, присвячених дослідженню АТД, актуальними залишаються питання дослідження ефектів насичення магнітного кола, витіснення струму в роторі та ін.

Розрахункові дані показують на значний вплив нелінійності кривої намагнічування магнітопроводу на струм статора, струм намагнічування, сумарні втрати і втрати в сталі. При дослідженні характеристик АТД часто застосовуються моделі, які не враховують реальні фізичні процеси, що протікають в машині при живленні несинусоїдною напругою від АІН. Більшість моделей розроблено стосовно асинхронних двигунів загальнотехнічного призначення, які живляться від мережі синусоїдною напругою, рівень якої достатньо близький до номінальної. Режими роботи АТД тягового ЕРС регулюються автоматизованою системою керування згідно з оптимальним законом частотного управління, сформульованим академіком М. Костенком. При цьому регулюється частота струму в обмотках статора, підведена напруга

та ковзання. В даній статті запропоновано матричну модель асинхронного приводу, навантаженого поїздом і реалізовану на її основі комп'ютерну *Simulink*-модель. В моделі передбачена можливість формування вхідної напруги фаз статора як джерелом синусоїдних сигналів *Sine Wave бібліотеки Sources* так і інвертором напруги у відповідності зі схемою ЕРС. Проведено дослідження перехідних процесів в АТД з урахуванням асиметрії напруги, насичення магнітної системи, несинусоїдності струму та режимів роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка математичної моделі АТД для дослідження впливу на електромеханічні характеристики АТД таких факторів: асиметрії напруги, насичення магнітної системи, несинусоїдності струму і напруги, дефектів обмоток статора і ротора.

Матеріали та методи дослідження. Модель АТД складається з електричної та механічної частин. В основу комп'ютерної моделі покладено математичну модель трифазного асинхронного двигуна з коротко замкнутим ротором в нерухомій системі координат α, β, γ [20], осі яких суміщені з осями фаз *A, B, C* статора. Така модель придатна без додаткових перетворень рівнянь для дослідження різноманітних асиметричних режимів роботи, пов'язаних з асиметрією параметрів фаз статора і ротора, несинусоїдністю і асиметрією напруги живлення та наявністю в ній вищих гармонійних складових. При вирішенні поставлених задач використовувалися класична теорія електричних машин, математичний апарат теорії матриць та імітаційне моделювання. При математичному описі АТД приймаємо такі допущення: намагнічуючі сили обмоток розподілені синусоїдно вздовж кола рівномірного повітряного зазору; втрати та насичення магнітних кіл у статорі і роторі відсутні; обмотки статора та ротора симетричні, тобто мають однакову кількість витків; параметри обмоток ротора приведені до статора.

Математична модель АД включає систему рівнянь рівноваги напруги статора і ротора, записаних у відповідності з законом Кірхгофа у трифазній природній системі координат. Система диференціальних рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора для миттєвих значень напруги, струмів і потокозчеплень, записаних у матричній формі [20, 21], для АД з коротко замкнутим ротором має такий вигляд:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt}; \\ 0 = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{де } [i_s] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}; \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$[u_s]$, $[i_s]$, $[\psi_s]$ – матриці миттєвих значень прикладеної напруги, струму і потокозчеплення фаз *A, B, C* обмотки статора; $[i_r]$, $[\psi_r]$ – матриці миттєвих значень струму і потокозчеплення фаз *a, b, c* обмотки ротора. Матриці активних опорів статора і приведених до статора активних опорів ротора мають вигляд:

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix}; \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Обертвий магнітний потік взаємоіндукції створює потокозчеплення машини, обумовлене протіканням струму намагнічування. Потокозчеплення будь-якої фази статора і ротора визначаються величиною власної індуктивності обмоток і взаємної індуктивності з усіма іншими обмотками. Для прикладу, потокозчеплення фази «А» статора і фази «а» ротора при ненасиченому магнітопроводі АТД:

$$\psi_A = L_A i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c; \quad (4)$$

$$\psi_a = L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c, \quad (5)$$

де L_A, L_a – відповідно індуктивності фаз статора і ротора;

L_{xy} – взаємні індуктивності між обмотками x і y .

Аналогічно записуються рівняння для решти фаз АТД. Система рівнянь потокозчеплень для контурів статора запишеться в такому вигляді:

$$\begin{cases} \psi_A = L_A i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c; \\ \psi_B = L_{BA} i_A + L_B i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c; \\ \psi_C = L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_C i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c, \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь потокозчеплень для контурів ротора має такий вигляд:

$$\begin{cases} \psi_a = L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c; \\ \psi_b = L_{bA} i_A + L_b i_B + L_{bC} i_C + L_{ba} i_a + L_b i_b + L_{bc} i_c; \\ \psi_c = L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_c i_C + L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_c i_c, \end{cases} \quad (7)$$

Система рівнянь потокозчеплень для контурів статора в матричній формі має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A & L_{BA} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{Ba} & L_b & L_{Bc} \\ L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Система рівнянь потокозчеплень для контурів ротора :

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} \\ L_{bA} & L_b & L_{bC} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Відомо, що магнітний потік машини складається з головного магнітного потоку і потоку розсіювання. Електромагнітний зв'язок між статором і ротором здійснюється головним

магнітним потоком взаємоіндукції Φ , який створює ЕРС взаємоіндукції в обмотках статора і ротора. Індуктивні опори обмоток статора X_l і ротора X_2 обумовлені наявністю потоків розсіювання, пов'язаних тільки з цими контурами. Струм намагнічування машини залежить від індуктивного опору взаємоіндукції

$$X_m = \omega_1 L_m, \quad (10)$$

де ω_1 – кутова частота обертання поля обмоток статора, с^{-1} ;

L_m – повна індуктивність однієї фази обмотки статора від основного магнітного потоку при наявності струмів у інших фазах (індуктивність від частини магнітного потоку, створеного самою обмоткою і індуктивність від частини потоку, створеного іншими обмотками статора). При цьому загальна індуктивність фази статора L_s і фази ротора L_r складаються з повної індуктивності і індуктивності розсіювання:

$$L_s = L_m + L_{s\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{r\sigma}.$$

За умови симетрії фаз, синусоїдальності магніторухійної сили, рівномірності повітряного зазору і приведення всіх величин до обмотки статора індуктивності та взаємні індуктивності визначаються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} L_A = L_B = L_C &= \frac{2}{3} L_m \left(1 + \frac{3}{2} \sigma_s\right); \\ L_a = L_b = L_c &= \frac{2}{3} L_m \left(1 + \frac{3}{2} \sigma_r\right); \\ L_{AB} = L_{BC} = L_{CA} &= L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -\frac{1}{3} L_m; \\ \sigma_s &= \frac{L_{s\sigma}}{L_m}; \sigma_r = \frac{L_{r\sigma}}{L_m}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$, σ_s , σ_r – відповідно індуктивності розсіювання фаз статора і ротора та коефіцієнти розсіювання статора і ротора.

Взаємні індуктивності між фазами статора і ротора залежать від кута повороту ротора γ_r та описуються такими виразами [21]:

$$\begin{aligned} L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} &= \frac{2}{3} L_m \cos(\gamma_r); \\ L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} &= \frac{2}{3} L_m \cos\left(\gamma_r + \frac{2\pi}{3}\right); \\ L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} &= \frac{2}{3} L_m \cos\left(\gamma_r + \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Позначимо: $c_1 = (\gamma_r)$, $c_2 = (\gamma_r + \frac{2\pi}{3})$, $c_3 = (\gamma_r + \frac{4\pi}{3})$;

$$\begin{aligned} C &= \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix}; \\ \delta_s &= 1 + \frac{3}{2} \sigma_s, \quad \delta_r = 1 + \frac{3}{2} \sigma_r. \end{aligned} \quad (13)$$

Підставляючи в (8), (9) вирази (11), (12), (13) отримаємо для потокозчеплень контурів статора та ротора за умови симетрії фаз такі рівняння в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_s & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_s & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_3 & c_2 \\ c_2 & c_1 & c_3 \\ c_3 & c_2 & c_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_r & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_r & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Вирази (14), (15) містять такі матриці індуктивностей:

$$[L_s] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_s & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_s & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_s \end{bmatrix} \text{ – матриця індуктивностей обмоток статора;}$$

$$[L_{sr}] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix} \text{ – матриця взаємних індуктивностей обмоток статора і ротора;}$$

$$[L_{rs}] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_3 & c_2 \\ c_2 & c_1 & c_3 \\ c_3 & c_2 & c_1 \end{bmatrix} = L_{sr}^T \text{ – матриця взаємних індуктивностей обмоток ротора і статора;}$$

$$[L_r] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_r & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_r & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_r \end{bmatrix} \text{ – матриця індуктивностей обмоток ротора.}$$

Врахування асиметрії фаз статора і ротора АТД. У процесі експлуатації АТД в результаті динамічних навантажень на стрижні ротора, вібрації та постійної зміни лінійних температурних розширень в матеріалі стержнів ротора відбуваються незворотні процеси, що приводять до зміни активного і індуктивного опорів ротора. При наявності пошкоджень в одному місці ротора матриця активних опорів ротора, приведених до обмотки статора буде мати вигляд:

$$[R_{rs}] = \begin{bmatrix} R_a k_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де k_{rr} – коефіцієнт, що враховує частку збільшення опору фази ротора ($k_{rr} > 1$).

Зменшення індуктивності фази ротора вводимо за допомогою коефіцієнта $k_{rl} < 1$. Це приведе до зміни коефіцієнта розсіювання ротора $\sigma_r = \frac{L_r \sigma k_{rl}}{L_m}$ та матриці індуктивностей ротора $[L_r]$.

Через комутаційні процеси в АІН в обмотці статора виникають небезпечні для ізоляції обмотки статора перенапруги, це може стати причиною пробоя ізоляції обмоток статора і міжвиткових замикань в котушках статора. При замиканні витків зменшується активний опір (R_A, R_B, R_C) відповідної фази, індуктивність розсіювання та повна індуктивність $[L_m]$ однієї фази обмотки статора. Значення вказаних параметрів залежить від кількості витків, що залишаються в роботі. Наприклад, при замиканні в фазі A статора:

$$R_{kA} = k_d R_A, \quad L_{k\sigma A} = k_d^2 L_s \sigma, \quad L_{km} = k_d L_m, \quad (17)$$

де $R_{kA}, L_{k\sigma A}, L_{km}$ – відповідно активний опір, індуктивність розсіювання, повна індуктивність пошкодженої фази;

k_d – коефіцієнт асиметрії;

$k_d = \frac{w_k}{w}$ – коефіцієнт асиметрії,

де w_k, w – кількість замкнутих витків та загальна кількість витків у фазі.

При цьому матриця індуктивностей обмоток статора

$$[L_s] = \frac{2}{3} k_d L_m \begin{bmatrix} \delta_{sk} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_s & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_s \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де $\sigma_{sk} = 1 + \frac{3}{2} \sigma_s k_d$.

Після підстановки в (14), (15) виразів (2) та введених позначень, отримаємо:

$$[\psi_s] = [L_s] \times [i_s] + [L_{sr}] \times [i_r]; \quad (19)$$

$$[\psi_r] = [L_{rs}] \times [i_s] + [L_r] \times [i_r]. \quad (20)$$

На основі експериментальних даних режиму холостого ходу АТД типу АД914, отриманих при живленні синусоїдною напругою, розраховано магнітний потік Φ , потокозчеплення ψ та повна індуктивність однієї фази обмотки статора L_m . Струм намагнічування I_m змінювався в межах $0 \div 215$ А. Графіки залежностей магнітного потоку, потокозчеплення та повної індуктивності приведені на рис.1

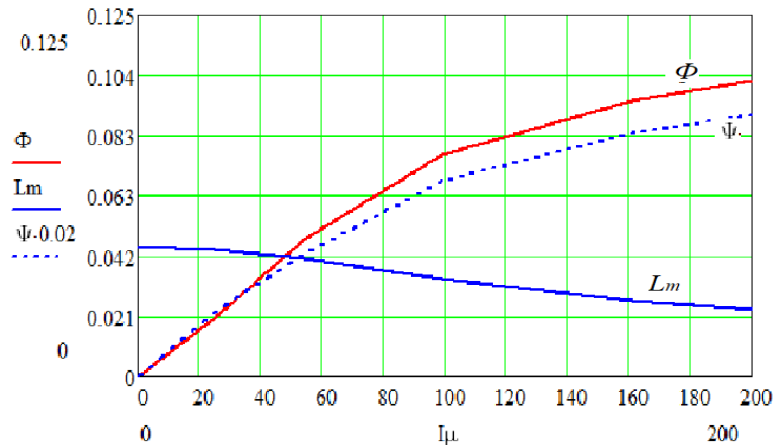


Рис. 1. Графіки залежностей магнітного потоку, потокозчеплення та повної індуктивності однієї фази обмотки статора від струму намагнічування

Крива повної індуктивності фази апроксимована поліномом четвертого порядку

$$L_m = aI_\mu^4 + bI_\mu^3 + cI_\mu^2 + dI_\mu + k, \quad (21)$$

де a, b, c, d, k – коефіцієнти апроксимації: $a = -1.965e^{-11}$; $b = 1.218e^{-8}$; $c = -2.277e^{-6}$; $d = 1.487e^{-5}$; $k = 0.045$.

Поєднуючи вектори потокозчеплень і струмів статора і ротора та матриці індуктивностей в одне ціле, отримуємо:

$$[\psi_0] = [L_0] \times [i_0], \quad (21)$$

де $[\psi_0]$, $[L_0]$, $[i_0]$ – об'єднані матриці потокозчеплень, струмів та клітинна матриця індуктивностей

$$[\psi_0] = \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix}; \quad [i_0] = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}; \quad [L_0] = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix}. \quad (22)$$

З (18) матриця об'єднаних струмів статора і ротора має вигляд:

$$[i_0] = [L_0^{-1}] \times [\psi_0], \quad (23)$$

де $[L_0^{-1}]$ – обернена матриця індуктивностей.

При моделюванні механічної частини електроприводу використовується основне рівняння динаміки, яке характеризує співвідношення між обертальним електромагнітним моментом і моментом опору на валу електродвигуна:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{EM} - M_0, \quad (24)$$

де J – момент інерції на валу АТД;

ω – кутова частота обертання вала АТД;

M_{EM}, M_0 – відповідно електромагнітний момент і момент опору на валу АТД. Рівняння електромагнітного моменту АТД має вигляд:

$$M_{EM} = \frac{P}{\sqrt{3}} \begin{cases} I_r^T D \psi_r \\ \psi_s^T D I_s \end{cases}, \quad (25)$$

де $D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ – постійний матричний коефіцієнт.

Момент інерції двигуна й інерції маси поїзда, приведений до валу АТД, можна записати так:

$$J_p = \frac{(P+Q)(1+\gamma)R_k^2}{N_d \eta_z \mu^2} \cdot 10^3, \quad (26)$$

де J_p – приведений момент інерції;

P, Q – відповідно вага локомотива та поїзда;

γ – коефіцієнт інерції поїзда;

R_k – радіус колісної пари;

N_d – кількість АТД в електроприводі електровоза;

η_z – к.к.д. тягового редуктора;

μ – передавальне відношення тягового редуктора;

Для розрахунку моменту опору на валу АТД з урахуванням поїзда застосована формула:

$$M_0 = \frac{W_k R_k}{N_d \eta_z \mu}, \quad (27)$$

де W_k – повний опір руху потяга.

Структурна схема моделі. Згідно з вихідними положеннями і рівняннями (1–27) в середовищі програмних і інструментальних засобів *MatLab* розроблена функціональна модель АТД типу АД914 з коротко замкнутим ротором (рис. 2). Основні технічні характеристики електродвигуна типу АД914 приведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики електродвигуна типу АД914

№	Назва	Величина
1	Потужність на валу, кВт	1200
2	Напруга лінійна, В	1870
3	Сила струму тривалого режиму, А	450
4	Частота напруги живлення, Гц	55,9
5	Число полюсів 2P	6

№	Назва	Величина
6	Струм холостого ходу, А	51,3
7	Активний опір фази статора при температурі 150°C, Ом	0,0344
8	Активний опір обмотки ротора приведенний до статора при температурі 150°C, Ом	0,0275
9	Індуктивний опір фази статора при частоті 50 Гц, Ом	0,213
10	Індуктивний опір обмотки ротора приведенний до статора при частоті 50 Гц, Ом	0,161

Функціональна модель АТД (рис. 2) дає змогу розраховувати перехідні процеси із врахуванням асиметрії фаз, несинусоїдності напруги, струму та насичення магнітопроводу.

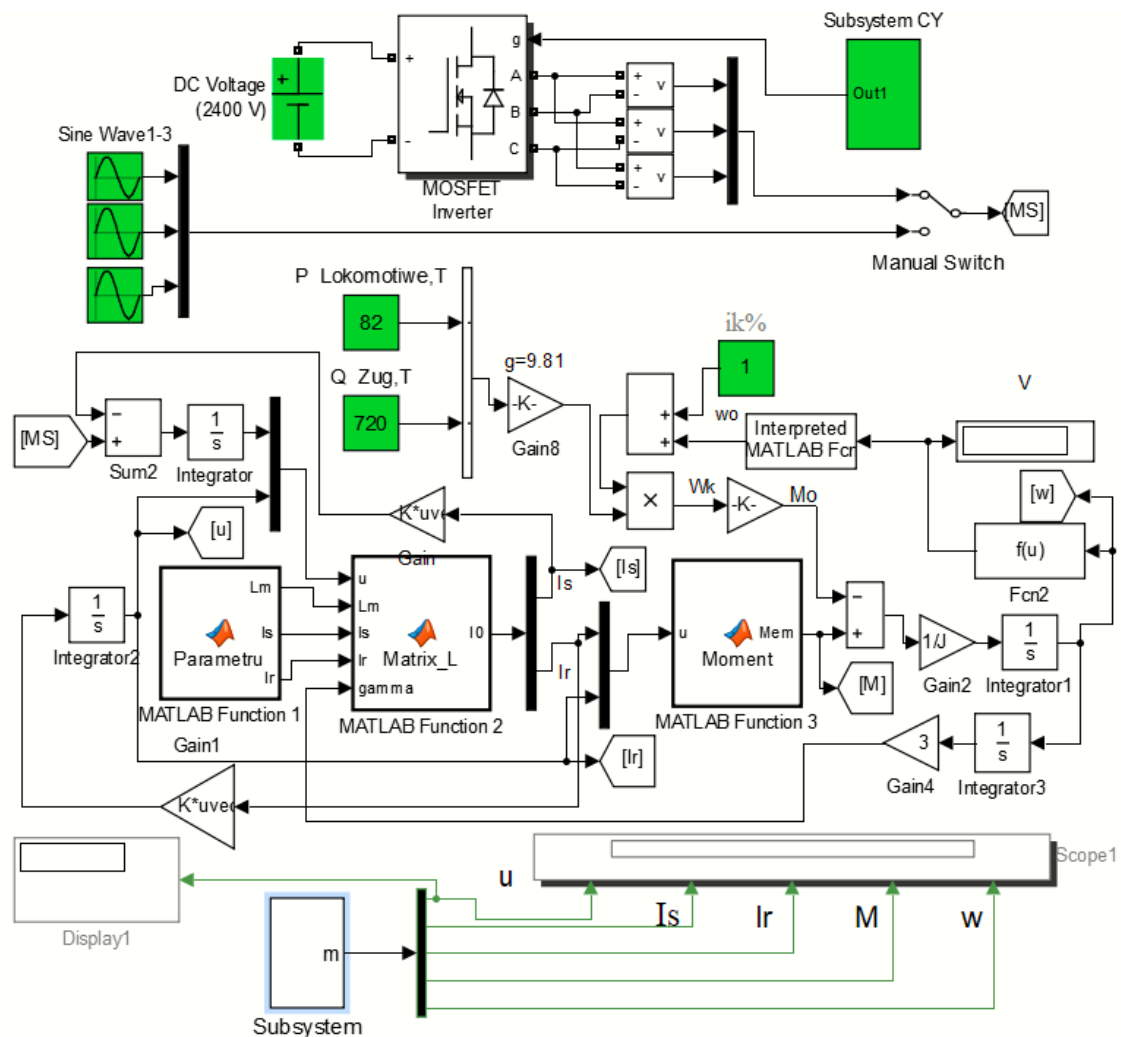


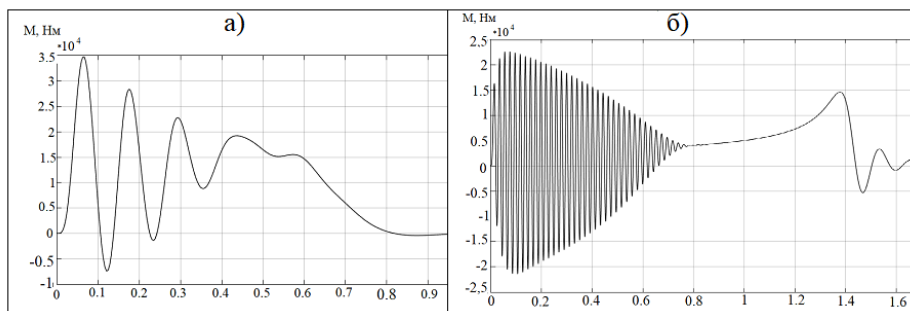
Рис. 2. Функціональна модель АТД

Вхідна напруга фаз статора U_A, U_B, U_C формується джерелом синусоїдної напруги *Sine Wave* бібліотеки *Sources*. Для дослідження несиметрії вхідної напруги достатньо в джерелах напруги ввести необхідні параметри напруги. Живлення АТД на ЕРС здійснюється

несинусоїдною напругою від АІН, який перетворює напругу ланки постійного струму в трифазну, регульовану по величині в межах $0 \div 1850$ В та по частоті в межах $0 \div 150$ Гц.

Електромагнітний розрахунок АТД АД914, згідно з методикою НДІ «Електроважмаш», передбачає варіанти живлення від синусоїдного джерела напруги при стендових випробуваннях та несинусоїдною напругою на електровозі від перетворювача частоти. Можливість дослідження електроприводу при вказаних напругах забезпечується ключом *Manual Switch*. Напрузі ланки постійного струму відповідає джерело постійного струму *DC Voltage Source* з амплітудою 2400 В. В моделі спочатку визначається потокозчеплення статора і ротора шляхом інтегрування рівнянь (1). Всі подальші операції математичної моделі виконуються за допомогою програмних засобів функцій *MATLAB Function1-3*. При цьому в *MATLAB Function1* розраховуються всі необхідні параметри моделі, а в *MATLAB Function 2* виконуються розрахунки струмів статора та ротора. Розрахунок електромагнітного моменту здійснюється за допомогою *MATLAB Function 3*.

Дослідження перехідних електромагнітних процесів в режимі холостого ходу. В ході моделювання проведено дослідження перехідних електромагнітних процесів в режимі холостого ходу, при зрушенні електровоза з місця без навантаження та в складі поїзда. Електромагнітні процеси АТД залежать від напруги, частоти струму, навантаження та від режиму роботи, який визначається законом частотного управління академіка М. Костенка. В період пуску напруга живлення АТД повинна плавно нарощуватись від мінімального значення до номінального значення синхронно зі збільшення частоти струму статора. Осцилограма моменту на валу двигуна при напрузі 300 в і частоті 10 Гц показана на рис. 3, а. Подача на статор номінальної напруги під час пуску недопустима в зв'язку з обмеженням по максимальному струму (рис. 3, б).



**Рис. 3. Осцилограми моменту на валу двигуна
(а) при зниженій напрузі живлення і частоті струму 10 Гц
та (б) при номінальній напрузі в режимі тяги одиничного електровоза**

При зростанні напруги відбувається процес насичення магнітного кола внаслідок збільшення ЕРС взаємоіндукції, магнітного потоку взаємоіндукції та магнітної індукції. Осцилограми моменту на валу двигуна та частоти обертання валу при напрузі $0,5U_n$ при зрушенні потяга приведені відповідно на рис 4, а та 4, б. Зі збільшенням навантаження зростає ковзання ротора, збільшується струм обмоток статора і зменшується ЕРС взаємоіндукції. При збільшенні ковзання в роторі відбувається зменшення індуктивного опору взаємоіндукції і збільшення струму намагнічування. Осцилограми потокозчеплення статора та ротора АТД при зрушенні електровоза з місця показані на рис. 5. Осцилограми потокозчеплення свідчать, що в початковий період пуску $0 - 0,5$ с амплітуда потокозчеплення зростає, після чого відбувається робота АТД при практично стабільному рівні потокозчеплення при незмінному магнітному потоці намагнічування. В роторі характер потокозчеплення змінюється залежно від ковзання ротора.

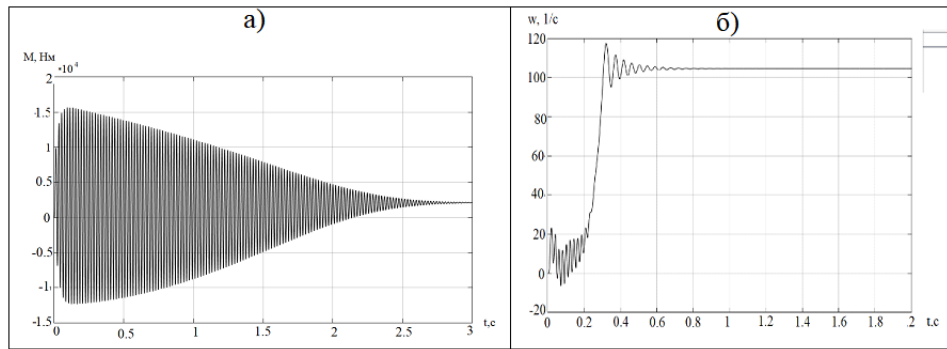


Рис.4. Осцилограми моменту на валу двигуна (а) та частоти обертання валу (б) при напрузі $0,5U_H$ при зрушенні потяга

Запропонована математична модель описує електромагнітні процеси у статорних обмотках асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, суміщеній з осями фаз A, B, C статора, а процеси в роторі – в обертовій системі координат ротора a, b, c . Використання математичного апарату для дослідження АТД має значні труднощі.

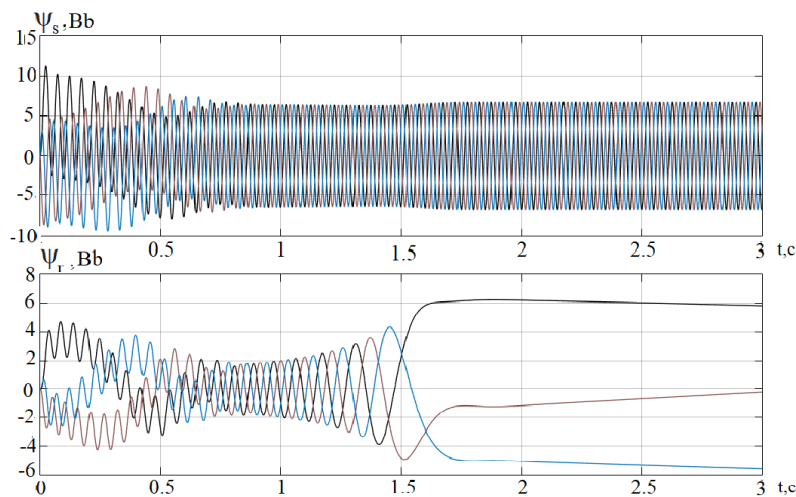


Рис. 5. Осцилограми потокозчеплення статора (верхня) та ротора (нижня) АТД при зрушенні електровоза з місця

Широкі можливості для аналізу електромагнітних процесів в АТД надає бібліотека *Simscape Library Simulink*, в підрозділі *SimPowerSystems* якої є блоки віртуальних асинхронних машин. Використання їх є найбільш зручними у застосуванні при реалізації математичної моделі. Однак, необхідно врахувати, що в основі стандартних *SPS*-моделей асинхронних двигунів бібліотеки *SimPowerSystems MatLab* лежать рівняння ідеалізованої еквівалентної двофазної машини в ортогональних двофазних координатах. Тому *SPS*-моделі не забезпечують необхідний рівень адекватності при дослідженні асиметрії АТД. В *Simulink* є можливість поєднувати методи імітаційного і структурного моделювання та створювати *S*-моделі за допомогою функціональних блоків бібліотеки *Simulink*. В запропонованій функціональній моделі використані блоки *MATLAB Function*, інтегратори, підсилювачі та інші функціональні *S*-блоки, які описують процеси в асинхронному електроприводі. Передбачена можливість живлення функціональної *S*-моделі від віртуальної *SPS*-моделі блока живлення *DC-ЗАС*. Удосконалення дають змогу досліджувати процеси як в симетричному, так і в асиметричному режимах роботи асинхронного тягового

приводу при живленні як синусоїдним, так і несинусоїдним струмом. Отримані результати свідчать про працездатність моделі і можливість її використання при дослідженні перехідних процесів в електромагнітних колах АТД. Оцінка адекватності моделі проведена шляхом порівнянням отриманих результатів моделювання з експериментальними даними досліджень електромеханічних характеристик АТД типу АД914, представленими заводом «Електроважмаш». Отримані результати підтвердили адекватність розробленої моделі та можливість використання розробленої моделі в інших практичних додатках. Розроблена модель дає змогу вирішувати широке коло дослідницьких та моніторингових задач, пов'язаних з розробкою та експлуатацією АТД.

Висновки. 1. Розроблена матрична Simulink – модель АТД з короткозамкненим ротором, яка дозволяє досліджувати перехідні процеси з урахуванням: несинусоїдності та асиметрії напруги живлення; насиченості магнітної системи; ефекту витіснення струму в провідниках ротора; наявності міжвиткових замикань в обмотках статора та пошкоджень стрижнів ротора.

2. Використання методів імітаційного і структурного моделювання на базі функціональних блоків бібліотеки Simulink забезпечують можливість розширення функціональних можливостей запропонованої моделі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иньков Ю.М., Литовченко В.В., Назаров Д.В. Особенности тягового электрооборудования перспективного электроподвижного состава. // Журнал «Электротехника». 2016. №. 9. С. 38-44. ISSN: 0013-5860
2. Дубравін Ю.Ф., Ткаченко В.П. Дослідження моделі активного чотириквadrантного перетворювача магістрального електровоза змінного струму// Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 34. К.: ДУІТ, 2019. С.155-174. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-13>.
3. Ruan J.Y., Wang S.M. Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect //IEEE Transactions On Power Electronics. 2016. Vol.: 31, №. 1. P. 497-506. Available at:www.ieee.org.
4. Chioncel C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque // International Conference on Applied Sciences 2015. P.1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005>.
5. Pakkiraiah B., Sukumar G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive // Indian Journal of Science and Technology. 2016 Vol.: 9(45). P. 1-10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313>.
6. Balara D., Timko J., Zilkova J., Leso M (SK). Neural Networks Application For Mechanical Parameters Identification Of Asynchronous Motor // Neural Network World. 2017, №3. P. 259 – 270. <https://doi.org/10.14311/NNW.2017.27.013>.
7. Goolak, S., Gerlici, J., Tkachenko, V., Sapronova, S., Lack, T., & Kravchenko, K. Determination of parameters of asynchronous electric machines with asymmetrical windings of electric locomotives. Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2019. Vol. 21(2), pp. 24-31. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>
8. P. Donolo et al. Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations//Electric Power Systems Research 140. 2016. p. 866–873.
9. A. Sapena-Bano, Manuel Pineda-Sanchez, Rubén Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, Z. Kanovic. Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries in Induction Machines Working at a Very Low Slip Using the Reduced Envelope of the Stator Current. IEEE Transactions on energy conversion.30(4). 2015. p. 1409-1419.
10. Кузнецов В.В., Николенко А.В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование 2015. Т.1, №8(73). С. 37 – 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755
11. Артеменко Ю.П., Демченко А.Г. Модель асинхронного двигателя в составе канала бортовой системы электроснабжения переменного тока. Научный Вестник МГТУ ГА Том 20, № 01, 2017 С.141-151
12. Qi Y., Shen C., Wang D., Shi J., Jiang X. Zhu Z. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 15066–15079
13. Qi Yuan, Shen C., Wang D., Shi J., Jiang X. Zhu Z. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. IEEE Access, 2017, vol. 5, pp. 15066–15079
14. Qi Yuan, Zafarani M., Akin B., Fedigan S. E. Analysis and detection of inter-turn shortcircuit fault through extended self-commissioning. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 53 (3), pp. 2730–2739.
15. Anand B. Aspalli M. Dynamic dq model of induction motor using Simulink. Intern.Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 2015, vol. 24 (5), pp. 252–257.
16. Хамидов О.Р. Математическое моделирование асинхронных тяговых двигателей с короткозамкнутым ротором. Бюллетень результатов научных исследований// Известия Петербургского университета путей сообщения.ISSN: 2223-9987.2019 С.41-47

17. Хамидов О. Р. Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей // Известия Петербургского университета путей сообщения. ISSN: 1815-5BBX. №2, 2019. С.251-262.
18. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 2020, Vol. 35(6), pp. 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.
19. Goolak, S., Liubarskyi, B., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., Glebova, M.. Improving a Model of the Induction Traction Motor Operation Involving Non-Symmetric Stator Windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 4(8(112)), pp. 45-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236825>, <https://ssrn.com/abstract=3921778>.
20. Толочко О.І. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання Simscape // Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода. Харків: НТУ «ХПІ», 2015, С.118-123.
21. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Навчальний посібник. Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.

REFERENCES

1. Inkov, YU.M., Litovchenko, V.V., Nazarov, D.V. (2016). Osobennosti tyagovogo elektrooborudovaniya perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava [Features of traction electrical equipment promising electric rolling stock]. *Zhurnal Elektrotehnika – Russ. Electr. Engin.*, 9, 38–44 [in Russian] ISSN: 0013-5860
2. Dubravin, YU.F., Tkachenko, V.P. (2019). Doslidzhennya modeli aktyvnoho chotyrykvadrantnoho peretvoryuvacha mahistral'noho elektrovoza zminnoho strumu [Investigation of the model of an active quadrangular converter of a backbone electric locomotive]. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 34, 155-174 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-13>
3. Ruan, J.Y., Wang, S.M. (2016). Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 1(31), 497-506. Available at: www.ieee.org.
4. Chioncel, C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. (2015). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. *International Conference on Applied Sciences*, 1 – 6 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005>
5. B. Pakkiraiah, G.D. Sukumar. (2016). A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45), 1–10 DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313>
6. D. Balara, J. Timko, J. Zilkova, M. Leso (SK). (2017). Neural Networks Application For Mechanical Parameters Identification Of Asynchronous Motor. *Neural Network World*, 3, 259 – 270 DOI: <https://doi.org/10.14311/NNW.2017.27.013>
7. Goolak, S., Gerlici, J., Sapronova, S., Tkachenko, V., Lack, T., Kravchenko, K. (2019). Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21(2), 24-31. ISSN 2585-7878 DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>
8. P. Donolo et al. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research*, 140, 866–873.
9. A. Sapena-Bano, Manuel Pineda-Sanchez, Rubén Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, Z. Kanovic. (2015). Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries in Induction Machines Working at a Very Low Slip Using the Reduced Envelope of the Stator Current. *IEEE Transactions on energy conversion*, 30(4), 1409-1419.
10. Kuznetsov, V.V., Nikolenko, A.V. (2015). O modelyakh funktsionirovaniya asinkhronnogo dvigatelya v usloviyakh nekachestvennoy elektroenergii [About models of functioning of an induction motor in conditions of low-quality electricity]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Energosberegayushchiye tekhnologii i oborudovaniye – Eastern European Journal of Advanced Technologies. Energy saving technologies and equipment*, №8(73), 37 – 42 [in Russian] DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36755>
11. YU.P. Artemenko, A.G. Demchenko. (2017). Model asinkhronnogo dvigatelya v sostave kanala bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka [Model of an asynchronous motor as a part of the channel of the on-board AC power supply system]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA – Scientific Bulletin MGTU GA*, 1(20), 141-151 [in Russian]
12. Y Qi. (2017). Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. *IEEE Access*, 5, 15066–15079.
13. Yuan Qi, C. Shen, D. Wang, J. Shi, X. Jiang, & Z. Zhu. (2017). Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. *IEEE Access*, 5, 15066–15079.
14. Yuan Qi, M. Zafarani, B. Akin, S.E. Fedigan. (2017). Analysis and detection of inter-turn shortcircuit fault through extended self-commissioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (3), 2730–2739.
15. B. Anand, M. Aspalli. (2015). Dynamic dq model of induction motor using Simulink. *Intern. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 24 (5), 252–257.
16. O.R. Khamidov. (2019). Matematicheskoye modelirovaniye asinkhronnykh tyagovykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom [Mathematical modeling of squirrel-cage induction traction motors]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of the Petersburg University of Railways*, ISSN: 2223-9987, 41-47 [in Russian]

17. O. R Khamidov.(2019). Diagnostirovaniye i modelirovaniye nesimmetrichnykh rezhimov asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigately lokomotivov s primeneniyyem iskusstvennykh neyronnykh setey [Diagnosis and modeling of asymmetric modes of asynchronous traction electric motors of locomotives using artificial neural networks]. // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of the Petersburg University of Railways*. ISSN: 1815-5BBX. №2. S.251-262 [in Russian]

18. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. (2020). Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 35(6), 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.

19. Goolak, S., Liubarskyi, B., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., Glebova, M. (2021). Improving a Model of the Induction Traction Motor Operation Involving Non-Symmetric Stator Windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(112)), 45-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236825>, <https://ssrn.com/abstract=3921778>.

20. Tolochko O.I.(2015). Rozrobka modeley skladnykh elektromekhanichnykh system v seredovyshchi paketa MATLAB z vykorystanniam blokiv dodatku virtual'noho fizychnoho modelyuvannya Simscape [Development of models of complex electromechanical systems in the environment of the MATLAB package using blocks of virtual physical simulation application Simscape]. // *Visnyk NTU KHPI .Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. – Bulletin of NTU KhPI. Problems of automated electric drive*, 118-123 [in Ukrainian]

21. Tolochko O.I. (2016). Modelyuvannya elektromekhanichnykh system. Matematychno modelyuvannya system asynkronnoho elektropryvodu [Modeling of electromechanical systems. Mathematical Modeling of Asynchronous Drive Systems]. *A Tutorial, NTUU KPI, – 150* [in Ukrainian]

Yuri Dubravin¹, Viktor Tkachenko²

¹ Ph.D Tech. S., Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

² Dr. Tech. S., Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

RESEARCH ON THE MODEL OF ASYNCHRONOUS TRACTION ENGINE OF THE AC ELECTRIC LOCOMOTIVE

Promising electromotive rolling stock is based on application of asynchronous traction engines with a short-circuited rotor. The use of asynchronous traction motor controller allows: increase power, tractive force and speed of electromotive rolling stock, promote reliability and bring down the cost of life cycle, increase lifetime. In addition to this asynchronous traction motor controller of double power gives an opportunity to provide train traffic through the areas of direct current with a voltage of 3 kV as well as on the areas of alternating current with voltage of 25 kV at a frequency of 50 Hz without replacement of electromotive rolling stock. In the article the mathematical model of asynchronous traction engine is considered taking into account electric and mechanical part of traction motor controller. A model describes electromagnetic processes in stator windings in the fixed α, β, γ coordinate system, which has its axis combined with the axis of stator phases A, B, C. Processes in a shortcircuited rotor are described in the rotating a, b, c coordinate system. For the modeling of mechanical part of motor controller basic equation of dynamics, that characterizes ratio between an electromagnetic torque and section modulus in the shaft of the electric motor, is used. In a proposed model simulation and structural modeling methods were implemented by means of function modules of the Simulink library. A model allows to investigate transition processes given: nonsinusoidal and asymmetric supply voltage; saturation of the magnetic system; current crowding out effect in the rotor conductors; presences of shortings between the turns of the stator winding and damages of rotor rods. A mathematical model is implemented as matrix Simulink model of asynchronous engine in MatLab. Credibility of the mathematical model was checked up while conducting virtual researches of electromechanics characteristics of asynchronous engine of type AD914. The outcome confirmed the adequacy of the implemented model and the possibility of the implemented model to be used in other applications.

Keywords : mathematical model, asynchronous traction engine, simulation model, asymmetric mode, nonsinusoidal tensions.

**Valerii Samsonkin¹, Halina Popova², Rozaliia Shcherbyna³, Oleksii Horetskyi⁴,
Oleksandra Soloviova⁵**

¹ Professor, Department of Transport Technologies and Transportation Control, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1521-2263>

² Associate Professor, Department of Psychology and Pedagogy of Social System Management, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61000, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3814-4037>

³ Associate Professor, Department of Transport Technologies and Transportation Control, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4505-921X>

⁴ Associate Professor, Department of Transport Technologies and Transportation Control, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2656-6120>

⁵ PhD candidate, Department of Transport Technologies and Transportation Control, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7933-3929>

*Corresponding author: solovyova0108@gmail.com

ANALYSIS OF EMPIRICAL RESEARCH OF STUDENTS AND GRADUATES OF THE FACULTY OF «RAILWAY TRANSPORT MANAGEMENT» ABOUT THE STATE OF PSYCHOLOGICAL CLIMATE IN RAILWAY SUBDIVISIONS

In order to develop corporate culture in the Ukrainian railway subdivisions, this article analyzes the empirical research of the psychological working climate at the regional branch of «South-Western Railway» JSC «Ukrainian Railways». The empirical research was conducted in the form of a questionnaire, based on three methods: assessment of the psychological atmosphere in the team (according to A. F. Fiedler), determination of the index of group cohesion (K. E. Sishor), assessment of job satisfaction (V. A. Rozanova). The research results showed the level of work satisfaction of employees of the selected unit (specialists in transport technology) for various factors.

Keywords: *organizational culture, psychological climate, work satisfaction, empirical research, transport technologies.*

Introduction. This article is the fourth in a series of articles on the state of corporate (organizational) culture in the railway transport of Ukraine. The first article [1] was devoted to the research of the necessity to use the principles of organizational culture in the system of railway transport specialists formation. The research findings showed that obtaining positive results in the reform of Ukraine's railway transport is possible only with the use of effective personnel management, the implementation of which is based on the principles of corporate culture.

The second article [2] concerned the impact of staff on the socio-economic activities of transport subdivisions. In the course of the research it was established that the labor potential is a vector quantity, based on which, the task of organizational culture is to set the right direction of development and the nature of the labor potential of the transport organization. The research results was proposed

method of calculating the labor potential of the organization over time, and also was formalized universal criteria for the growth of labor potential.

The third article [3] in a set of articles is devoted to the analysis of the directions of influence of organizational culture on the activity of transport enterprises. Based on the research, it was found that:

a) the total growth of individual capabilities of employees leads to an increase in the potential of workers' enterprises as a whole, an effective tool for which is the organizational culture;

b) organizational culture can help increase the competitiveness of the transport company, as increasing labor potential has a positive effect on the results of economic activity of the enterprise.

This article is devoted to continuing the research of the necessity to improve and develop corporate culture in transport enterprises. The relevance of the chosen research topic is due to growing competition in the transport sector, which requires, in turn, a set of measures to increase the competitiveness of transport enterprises. This requires not only investment in equipment and technological processes, but also the implementation of a wide range of organizational and managerial and socio-cultural innovations.

Analysis of recent research and problem statement. In the previous articles of the authors [1-3] the theoretical bases of organizational culture, features of its formation and application at the enterprises of railway transport of Ukraine are stated.

The research [4] identifies the main directions of organizational (corporate) culture application in railway transport in the future, and structural developments for the corporate culture management in the scale of the company. An example of the organizational culture methods use in the passenger economy of a railway company is also given.

Publications [5-10] provide an overview of the application of psychological methods and tools, as well as vocational training in Ukraine and abroad. An attempt is made to analyze and suggest the use of certain aspects of these components of organizational culture.

In [14] the authors determined that in railway transport corporate culture is a system of values, beliefs, ideas, symbols, norms of behavior, traditions and rituals that are formed at the enterprise, reflect its individuality, are reflected in the behavior and interaction of employees with one another and with the external environment. The article focuses on the assessment of corporate culture on such key elements as the most important characteristics of the organization, the overall leadership style in the organization, management style in the organization, the unifying essence of the organization, strategic goals, success criteria. In addition to these elements, an analysis of the propensity for a certain type of organizational culture was also conducted. According to the research, the existing corporate culture in the field of railway transport tends to a hierarchical type. A number of works by scientists of different years are devoted to the study of corporate culture in various sectors of the economy and railway transport [15-21]. For example, Hrebinska S. I., Kalinichenko L. L., Vanchenko L. V., Hrebenyuk H. M., Korin M. V., Tokmakova I. V., Kuzub A. V. and others. Authors of most of these works look into the socio-economic aspect, motivation as one of the factors in the development of the individual employee, which affects the activities of the railway company, the psychological aspects of employees and more.

In the research [22], the authors analyzed the state of corporate culture in transport companies in Slovakia and Germany. The authors found in Slovakia a hierarchical corporate culture with dominant features, such as compliance with rules and regulations (top managers of these companies continued to show a tendency to use it), and in Germany since approximately 2014 was introduced and developed clan corporate culture (top managers focused on the needs of employees and their development). The authors of the research recommend that top managers in Germany stay in this trend, and for top managers in Slovakia it is proposed to change their perception and consider employees a key factor. Employees are the owners of new creative ideas that allow companies to build their competitive advantage.

If the authors of the previous research surveyed top managers, the authors of the article [23] conducted a survey of 64 European transport companies of different ages. The aim of the work was to identify differences in the perception of the desired level of corporate culture by different generations. It has been suggested that members of each generation differ not only in their behavior but also in their views and values. Managers adapt the management style, leadership and motivation of employees so that well-

motivated employees can properly influence the efficiency of enterprise processes. According to the research results, the authors found that all generations of respondents working in European transport companies prefer a clan corporate culture for five years. This culture emphasizes employees, customers and traditions. Loyalty and teamwork are considered the main tools for business success. The authors state that the hypothesis of the existence of generational differences in the perception of corporate culture has not been confirmed.

We can also highlight the work of foreign scholars in the field of corporate culture on the activities and efficiency of enterprises in various fields, namely Yanica P. Dimitrova, Silvia Lorincová, Miloš Hitka, Žaneta Balážová, Maria Magdalena Criveanu, Katarzyna Turoń, Do Huu Hai, Nguyen Minh Hai, Nguyen Van Tien and others [24-28].

The purpose and tasks of the study. To determine the state of some aspects of corporate culture at the Regional Branch of the South-Western Railway in the opinion of specialists in transport technology.

Materials and methods of research. An empirical study in the form of a questionnaire was conducted in June-July 2021. The questionnaire was based on three methods: assessment of the psychological atmosphere in the team (according to A. F. Fiedler), determination of the index of group cohesion (K. E. Sishora), assessment of job satisfaction (V. A. Rozanova).

49 people working in various positions in the regional branch of the South-Western Railway (hereinafter – «SWR») of the Joint-Stock Company «Ukrainian Railways» were interviewed. The average age of the subjects was 28.6 years (minimum – 21 years, maximum – 42 years); average length of service – 7.6 years (minimum 1 year, maximum 19 years).

The control group of respondents consisted of recent graduates or part-time students majoring in «Transport Technology» Faculty of «Railway Transport Management» of the State University of Infrastructure and Technology. The survey was voluntary and was conducted by the authors in May-June 2021. G. V. Popova, Candidate of Psychological Sciences, Professor of NTUU KPI, assisted in the preparation of the questionnaire.

The corresponding empirical database (DB) of answers of respondents in Excel is formed. The control group of employees is divided into 5 subgroups according to experience: 1 subgroup (up to 3 years) – 6 people; 2 subgroups (3-5 years) – 18 people; 3 subgroups (6-10 years) – 11 people; 4 subgroups (11-15 years) – 7 people; 5 subgroups (more than 15 years) – 6 people.

Accordingly, five database tables were formed: DB1, DB2, DB3, DB4, DB5, with which calculations were performed.

1. At the first stage of the study, the psychological atmosphere was determined to find out what prevails in the team of employees with different work experience. To do this, a method of assessing the psychological atmosphere in the team by A. F. Fiedler [11].

The essence of the questionnaire: the proposed table (table 1) shows the opposite content of a couple of words that can be used to describe the atmosphere in the team. The closer to the right or left word in each pair is the sign «+», the more pronounced this sign in the team.

Table 1. Test material (questionnaire) by A. F. Fiedler

	1	2	3	4	5	6	7	8	
Friendliness									Animosity
Consent									Disagreement
Pleasure									Displeasure
Productivity									Unproductivity
Warmth									Coldness
Cooperation									Inconsistency
Mutual support									Malevolence
Enthusiasm									Indifference
Interest									Boredom

(Source: [11])

The answer to each of the 9 items is evaluated from left to right from 1 to 8 points. The left is the sign «+», the lower the score, the more favorable the psychological atmosphere in the team, according to the answer. The final indicator ranges from 9 (the most positive assessment) to 72 (the most negative).

Evaluation criteria for the psychological atmosphere of employees:

- high level = from 9 to 36 points;
- average level = from 37 to 54 points;
- low level = from 55 to 72 points.

In the table 2 and Fig. 1 shows the % ratio of employees with different length of service and their results.

Table 2. Levels of feeling the well-being of the psychological atmosphere in employees with different experience according to the method of A. F. Fiedler, %

The level of psychological atmosphere	Subgroups				
	1 subgroup (up to 3 years)	2 subgroup (3-5 years)	3 subgroup (6-10 years)	4 subgroup (11-15 years)	5 subgroup (more than 15 years)
High	16,7 %	0 %	0 %	14,3 %	0 %
Average	16,7 %	33,3 %	72,7 %	71,4 %	50 %
Low	66,6 %	66,7 %	27,3 %	14,3 %	50 %

Graphical display of data is shown in Fig. 1.

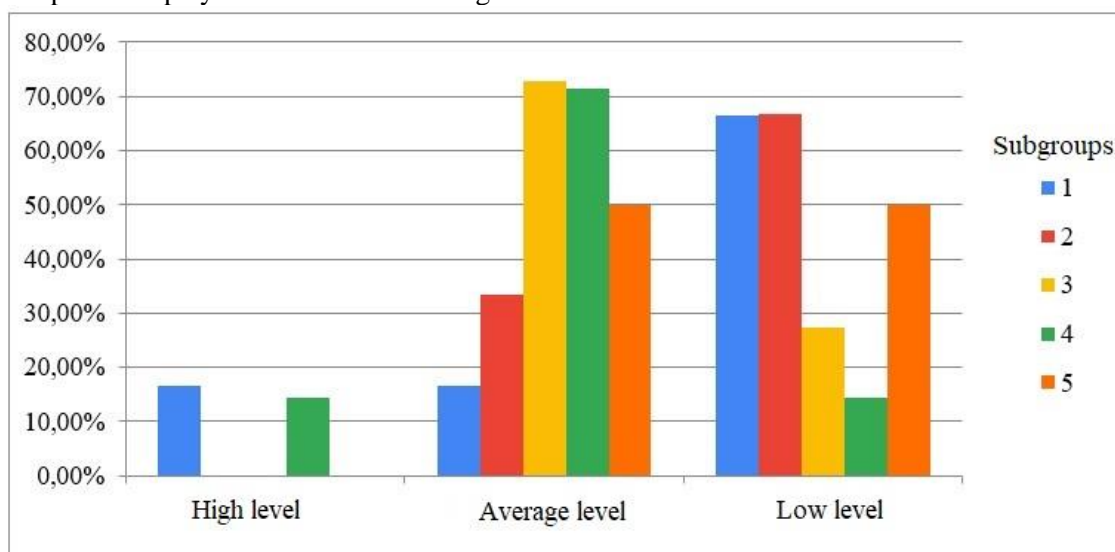


Fig. 1. Percentage of levels that have employees with different work experience

Comments and conclusions: almost 90 % of employees with short work experience (up to 3 years) assess the psychological atmosphere as satisfactory and lower. Of the most experienced group (more than 15 years of experience), no one rated the psychological atmosphere as high. This should alert the management of the SWR.

2. Employee satisfaction with the method of Rozanova was determine at the second stage of the reserch [12].

To do this, it is proposed to answer 14 questions (table 3) with answer options (for each question):

- a) 1 – extremely dissatisfied;
- b) 2 – not satisfied;

- c) 3 – not completely satisfied;
- d) 4 – satisfied;
- e) 5 – completely satisfied.

The numerical order of option is equal to the score (points).

Table 3. Research of determining employee satisfaction with the method of Rozanova

Questions	Points				
	1	2	3	4	5
1. Your satisfaction with the company (organization) where you work, in general					
2. Your satisfaction with the working environment (temperature, noise, comfort, etc.)					
3. Your job satisfaction					
4. Your satisfaction with the coherence of the staff members					
5. Your satisfaction with your chief's leadership style					
6. Your satisfaction with the professional competence of your chief					
7. Your satisfaction with the salary (in terms of its compliance with your labor contribution)					
8. Your satisfaction with the salary in comparison with how much for the same work is paid at other enterprises					
9. Your satisfaction with job promotion (professional promotion)					
10. Your satisfaction with the opportunities for promotion					
11. Your satisfaction with how you can use your experience and abilities					
12. Your satisfaction with the requirements of work to the intellect					
13. Your satisfaction with the length of the working day					
14. To what extent would job satisfaction affect your search for another job?					

(Source: [12])

According to this test, you can score from 14 to 70 points.

This test can also be used to assess the satisfaction of the whole team or group. In this case, the arithmetic mean of the indicators are used. The evaluation of the results is carried out on the following scale:

- a) 15 – 20 points – extremely dissatisfied (1);
- b) 21 – 32 points – not satisfied (2);
- c) 33 – 44 points – not completely satisfied (3);
- d) 45 – 60 points – satisfied (4);
- e) more than 60 points – completely satisfied (5).

In the table 4 presents the results of testing processing on 14 questions.

Table 4. General test results

Assessment	Subgroups				
	1 subgroup (up to 3 years)	2 subgroup (3-5 years)	3 subgroup (6-10 years)	4 subgroup (11-15 years)	5 subgroup (more than 15 years)
Arithmetic mean	41	48,7	42,5	40,1	42,7

Graphical display of results – in Fig. 2.



Fig. 2. Overall job satisfaction of employees in groups of length of work

Comments and conclusions: the second group of employees (3-5 years of work) is mostly satisfied with their work, all others are not completely satisfied. The main reasons may be low wages and uncertainty about the future.

In the table 5 provides information on satisfaction with each of the factors of Rozanova's test.

Table 5. Factors of employee satisfaction, %

Factors	Subgroups									
	1		2		3		4		5	
	(1)+(2)	(4)+(5)	(1)+(2)	(4)+(5)	(1)+(2)	(4)+(5)	(1)+(2)	(4)+(5)	(1)+(2)	(4)+(5)
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Your satisfaction with the company (organization) where you work, in general	16,7	50,0	11,1	61,1	18,2	63,6	14,3	42,9	0,0	50,0
2. Your satisfaction with the working environment (temperature, noise, comfort, etc.)	50,0	50,0	22,2	50,0	18,2	45,5	28,6	42,9	16,7	50,0
3. Your job satisfaction	16,7	33,3	0,0	77,8	0,0	81,8	28,6	14,3	0,0	50,0
4. Your satisfaction with the coherence of the staff members (team)	16,7	33,3	0,0	72,2	18,2	45,5	42,9	42,9	16,7	33,3
5. Your satisfaction with your chief's leadership style	16,7	50,0	22,2	50,0	36,4	36,4	42,9	42,9	50,0	33,3
6. Your satisfaction with the professional competence of your chief	16,7	66,7	16,7	55,6	45,5	36,4	0,0	42,9	50,0	33,3

Continuation of the table 5

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
7. Your satisfaction with the salary (in terms of its compliance with your labor contribution)	66,7	0,0	44,4	27,8	72,7	18,2	100,0	0,0	83,3	0,0
8. Your satisfaction with the salary in comparison with how much for the same work is paid at other enterprises	66,7	33,3	44,4	27,8	63,6	9,1	71,4	0,0	83,3	0,0
9. Your satisfaction with job promotion (professional promotion)	33,3	16,7	11,1	55,6	45,5	18,2	42,9	14,3	16,7	33,3
10. Your satisfaction with the opportunities for promotion	33,3	33,3	16,7	50,0	72,7	18,2	57,1	0,0	16,7	16,7
11. Your satisfaction with how you can use your experience and abilities	50,0	16,7	5,6	66,7	18,2	45,5	14,3	28,6	16,7	83,3
12. Your satisfaction with the requirements of work to the intellect	33,3	33,3	5,6	77,8	36,4	36,4	14,3	28,6	50,0	33,3
13. Your satisfaction with the length of the working day	16,7	33,3	16,7	72,2	9,1	72,7	14,3	71,4	16,7	83,3
14. To what extent would job satisfaction affect your search for another job?	50,0	33,3	5,6	55,6	27,3	27,3	28,6	14,3	0,0	0,0

Below in Figures 3 – 16 present a graphical representation of Rozanova's test factors. In this case, comments on each factor are provided below the figure, where the results are not obvious.

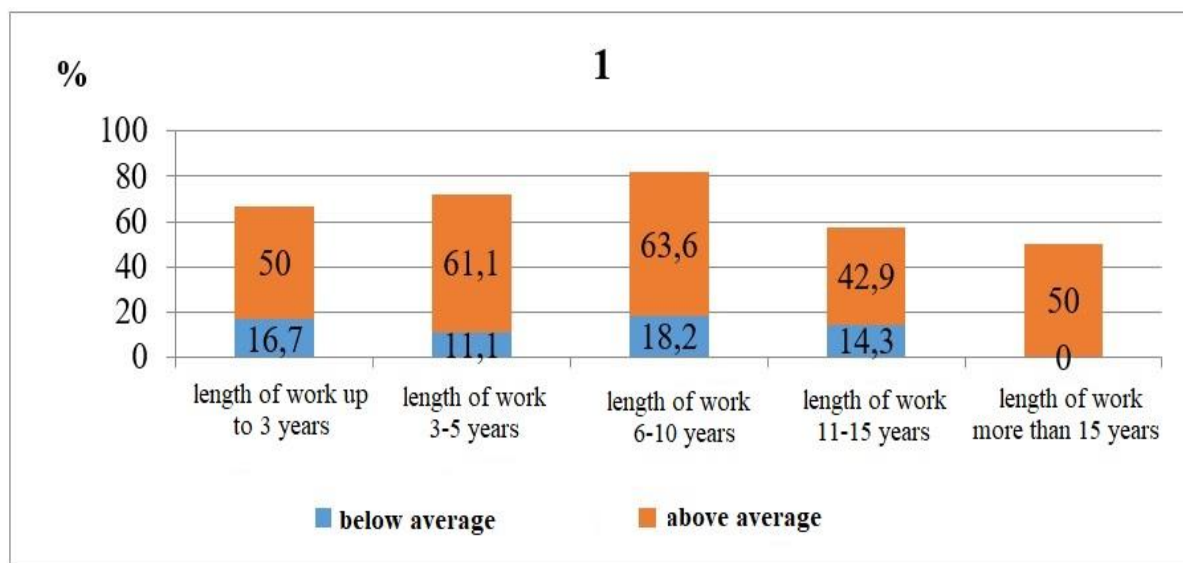


Fig. 3. Percentage of satisfaction with the organization as a whole

Analyzing the test results in Fig. 3 we can conclude that the more experience, the greater the level of satisfaction with the organization. Personnel management of JSC "UZ" should pay attention to the motivation of young people.

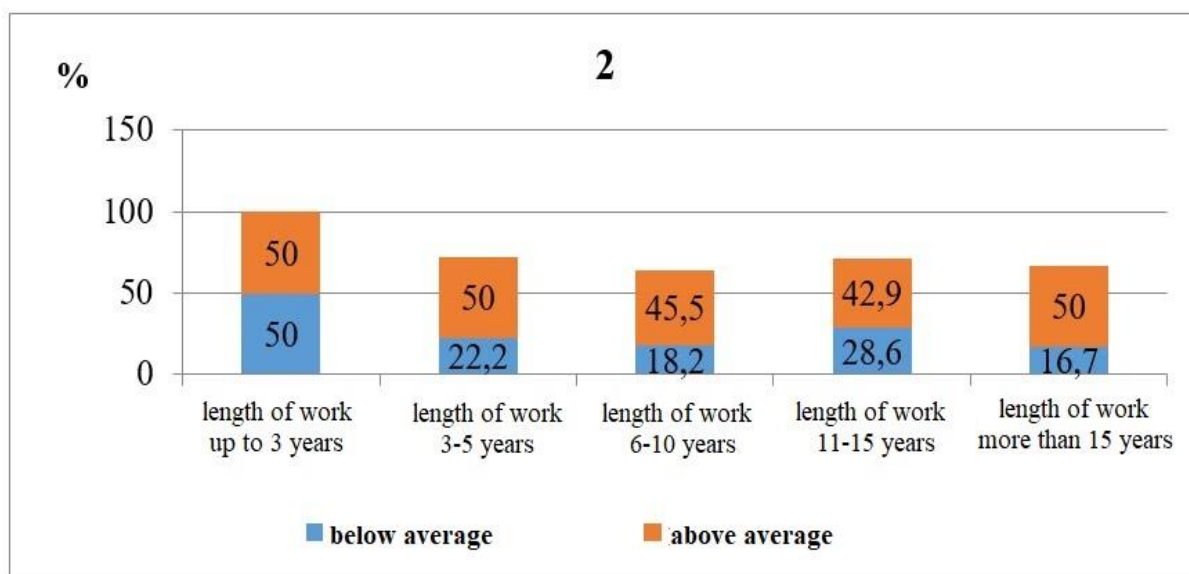


Fig. 4. Percentage of satisfaction with the working environment

The level of satisfaction with the working environment is higher than the level of satisfaction with the organization. The reason for this is that people like the work itself, which is confirmed by Fig. 5–6.

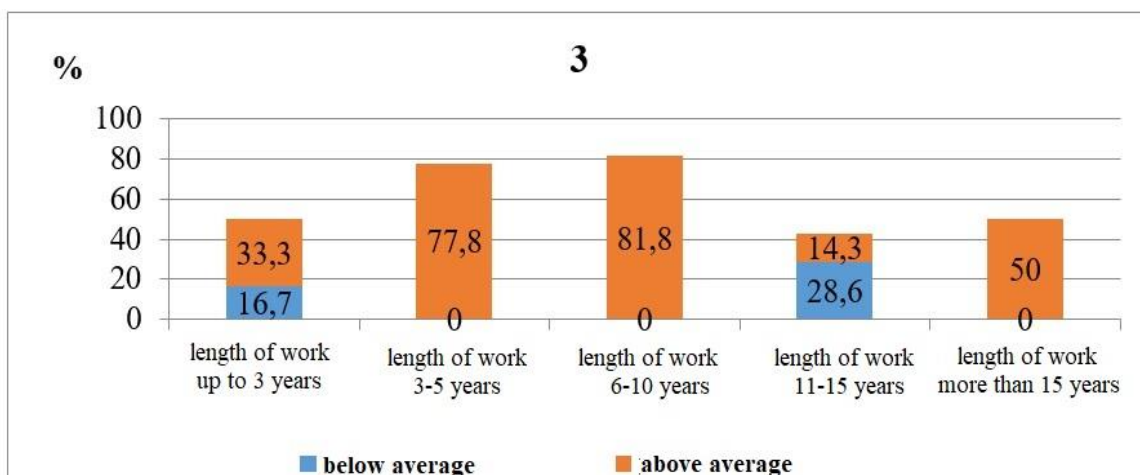


Fig. 5. Percentage of job satisfaction

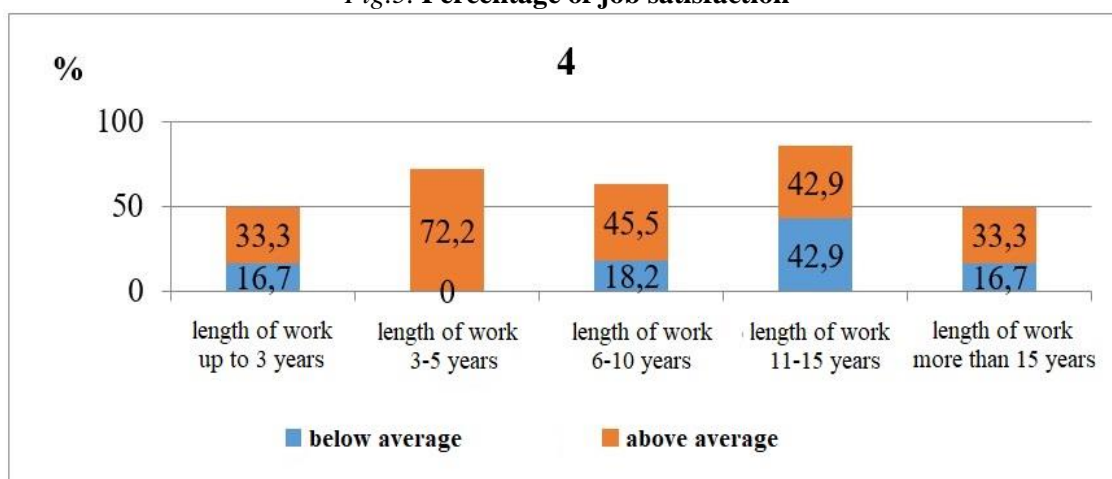


Fig. 6. Percentage of satisfaction with the coherence of the staff members (team)

The authors did not expect such a high level of satisfaction with the coherence of those production units where students and graduates of the specialty «Transport Technology» work.

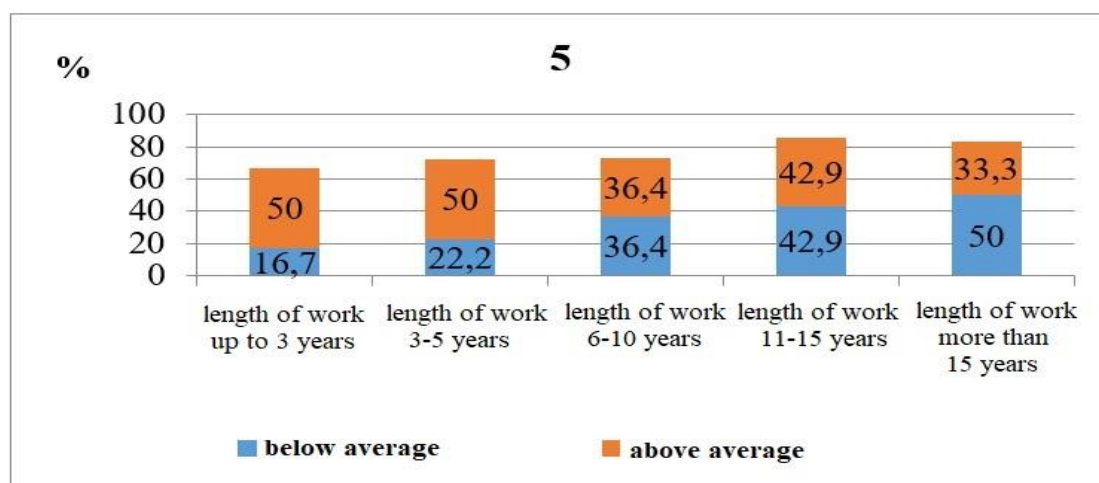


Fig. 7. Percentage of satisfaction with the chief's leadership style

As can be seen from Fig. 7 negative assessment of leadership style is directly proportional to experience, it has increased 3 times in a conditional 12 years. This is clearly a dangerous situation for lower- and middle-level SWR leaders.

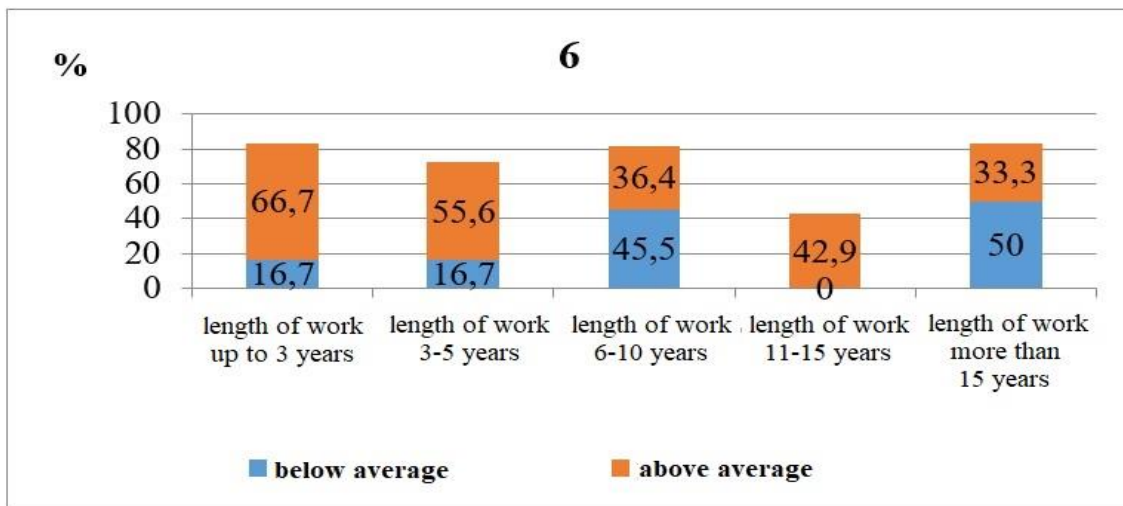


Fig. 8. Percentage of satisfaction with the professional competence of your chief

Estimation in Fig. 7 fully correlates with the assessment of the chief's competence. Quantitative coincidences may be explained by the fact that respondents did not have the opportunity to meet in person with the moderator of the questionnaire to provide comments on the difference between the style and competence of the chief.

The assessment of salary satisfaction is fully expected, it is explained by the difficult economic situation in JSC «UZ» and in Ukraine as a whole. Young professionals are happy with their earnings, because this is their first experience and most of them have not yet started a family.

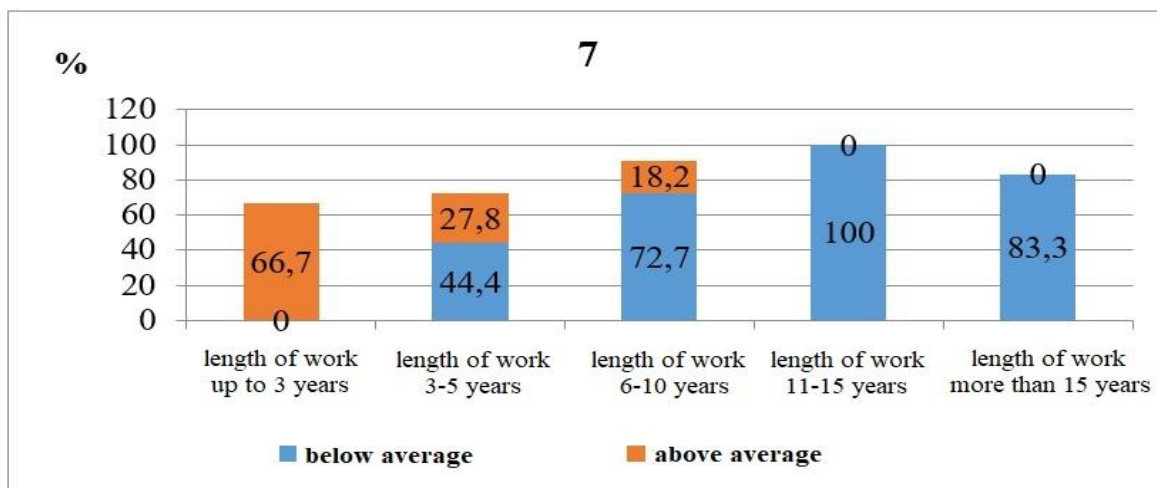


Fig. 9. Percentage of salary satisfaction

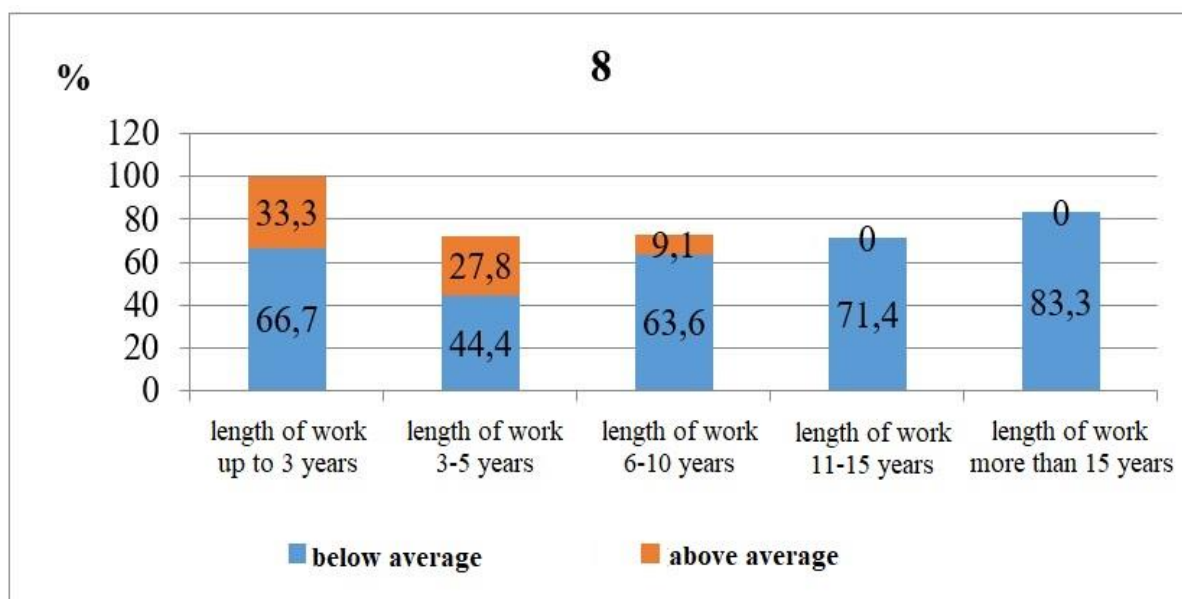


Fig. 10. Percentage of salary satisfaction in comparison with how much for the same work is paid at other enterprises

Indicators of this factor are also predictable. They are explained by the lack of wage growth for several years due to the decline traffic volume in rail transport. At the same time, there are some areas (IT, banks, trade, logistics companies), as well as new businesses with foreign investment and management, where wages are quite high.

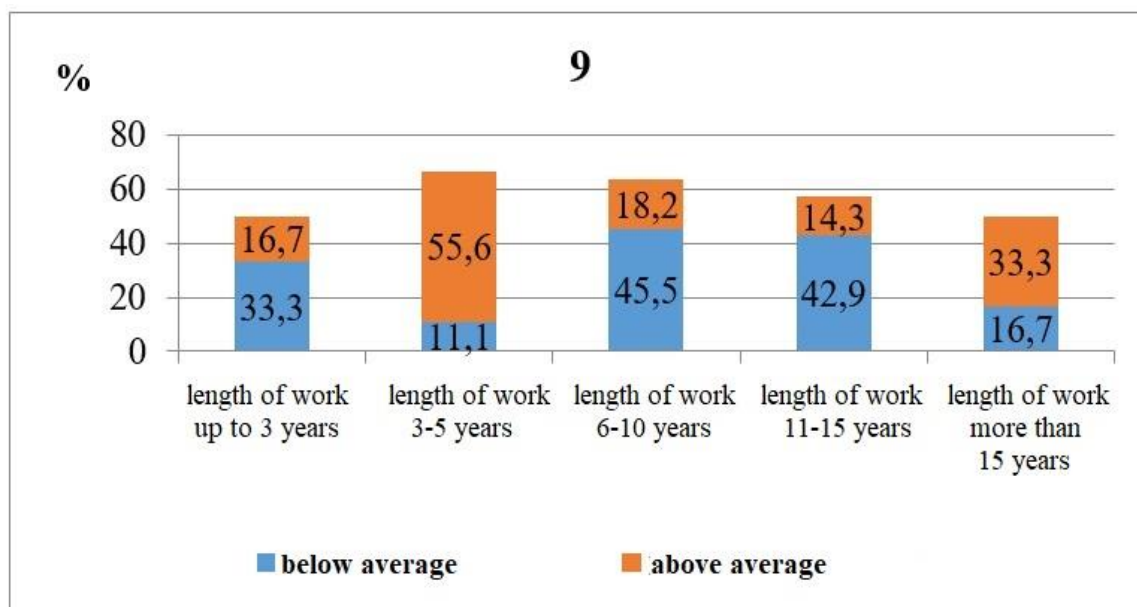


Fig. 11. Percentage of satisfaction with official (professional) promotion

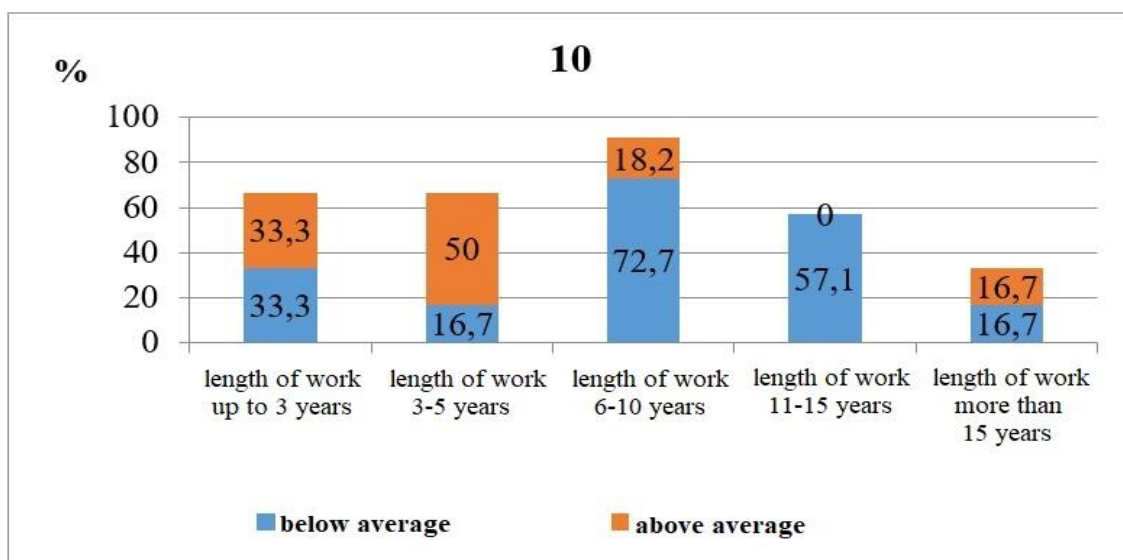


Fig. 12. Percentage of satisfaction with the opportunities for promotion

The greatest dissatisfaction with the opportunities for promotion belong to employees with experience of 6-15 years, because they are professionals with experience, intention and confidence in their abilities. This is also the expected empirical result. But the level is too high – more than 70 % in the third subgroup and almost 60 % in the fourth.

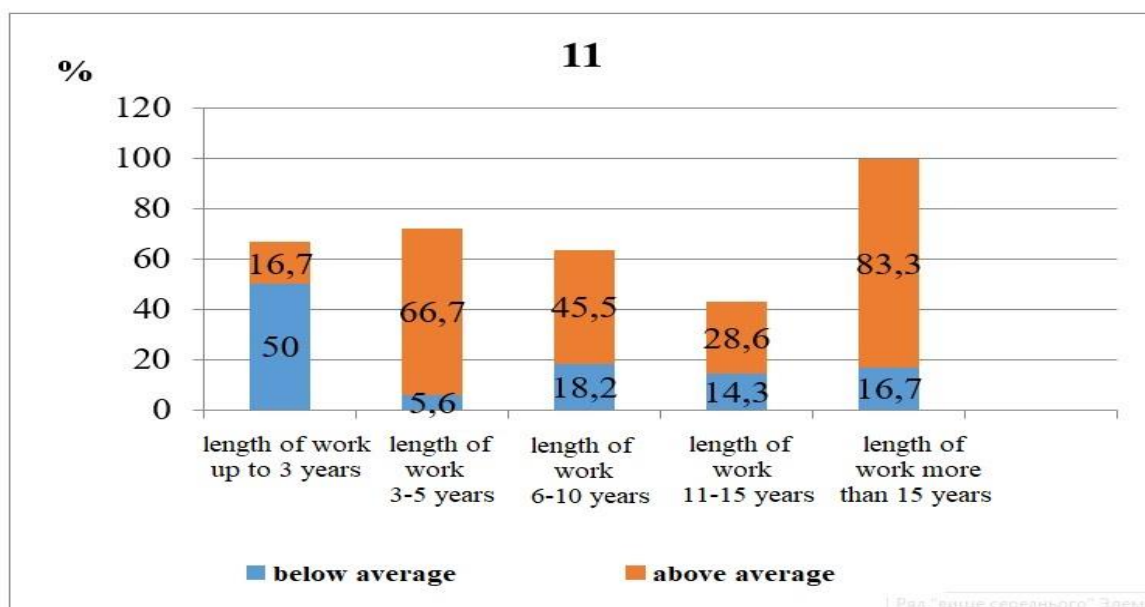


Fig. 13. Percentage of satisfaction with how you can use your experience and abilities

Data in Fig. 13. correlate with the data in Fig. 12. Positive self-esteem of people has increased almost 5 times from the first to the fifth subgroup in accord with length of work.

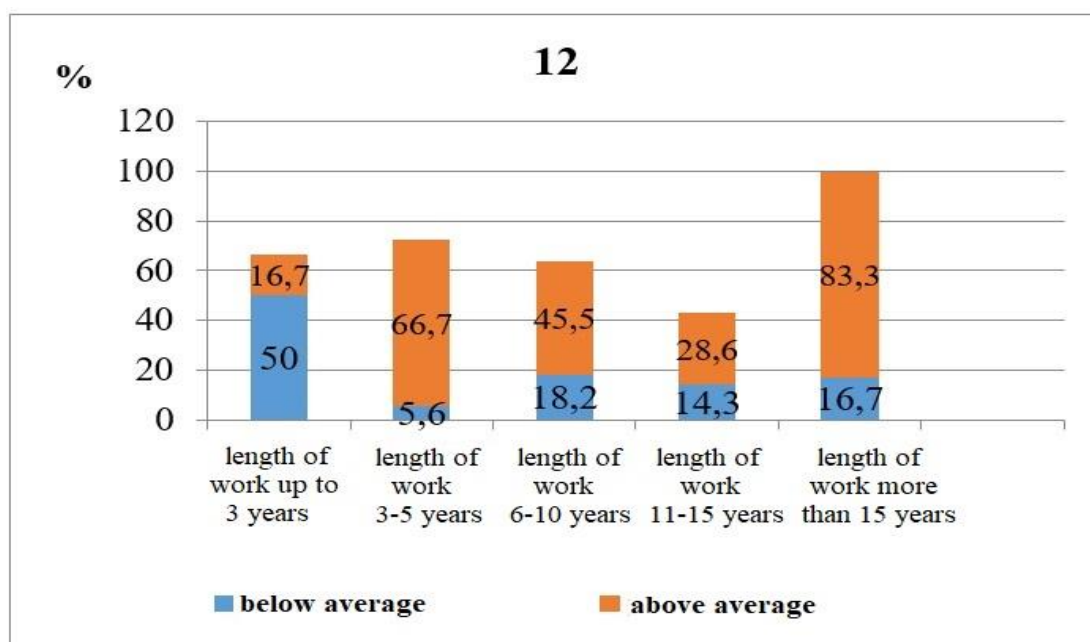


Fig. 14. Percentage of job satisfaction to intelligence

50 % of young professionals believe that their intellectual level is higher than the tasks offered to them. This can be explained by the high risk of transport technology and the desire of management to prevent accidents, as well as the level of automation, which young people know better than people with significant experience.

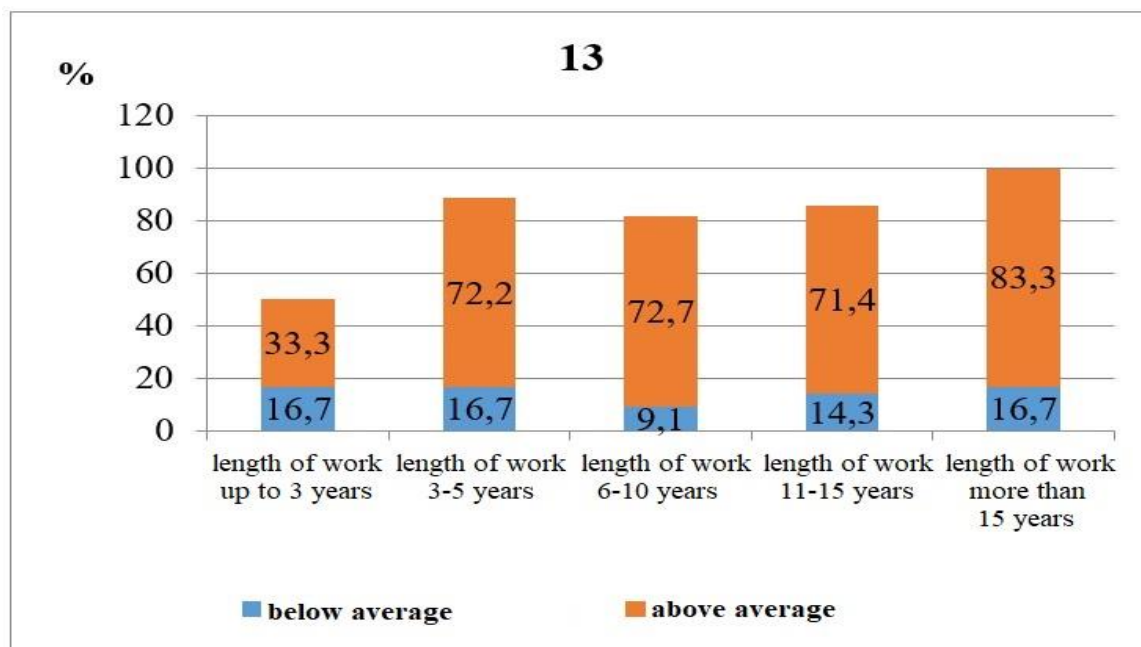


Fig. 15. Percentage of satisfaction with the length of the working day

Almost all subgroups of employees are more satisfied than dissatisfied with the length of the working day. This is due to the tradition of railway transport and the "focusing" of trade unions on this indicator.

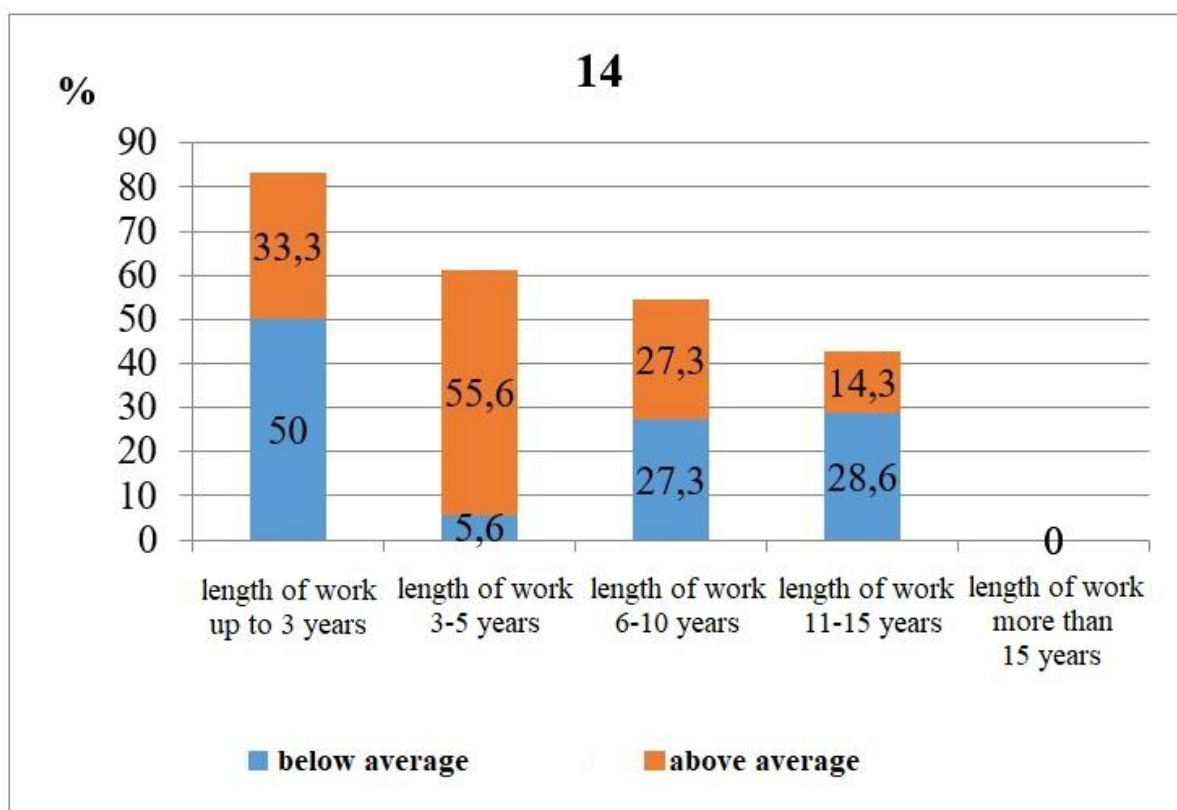


Fig. 16. Percentage of how job satisfaction would affect your search for another job

Young workers (50 %) are ready to look for another job, with experience of 11-15 years – twice as little, and 15-year-old professionals do not want it. We should also pay attention to the fact that there are many places in Ukraine where there is no other job than rail transport. The situation is quite logical, for a more definitive estimate requires comparison with another production area.

3. In the third stage of the research was determined cohesion of employees in order to define whether there is a union of people into a single whole or, conversely, there is a difference in the interrelation in the team with different work experience. To do this, a method to determine the cohesion of Sishor was used [13].

To do this, each of the test subgroups must choose one answer to each of the five questions - table 6.

The number of answer points is given in parentheses.

Scale or levels of group cohesion [13]:

more than 15.1 points – high;

11.6-15 points – above average;

7-11.5 – average;

4-6.9 – below average;

4 and below – low.

The average scores of employees with different length of work and their results are shown in the table 7 and in Fig. 17.

Table 6. List of questions to determine cohesion

<p><u>1. How would you rate your group affiliation?</u></p> <p>a) I feel like I am a member of it, part of the group (5).</p> <p>b) I participate in most activities (4).</p> <p>c) I participate in some activities and do not participate in others (3).</p> <p>d) I do not feel that I am a member of the group (2).</p> <p>e) I'm living and existing separately from it (1).</p> <p>f) I don't know, it's hard to answer (1).</p> <p><u>2. Would you move to another group if such an opportunity arose (without changing other conditions)?</u></p> <p>a) Yes, I would like to go very much (1).</p> <p>b) Most likely I would move to another group, than I stayed (2).</p> <p>c) I do not see any difference (3).</p> <p>d) Most likely to remain in this group (4).</p> <p>e) I would like to stay in this group very much (5).</p> <p>f) I don't know, it's hard to say (1).</p> <p><u>3. What are the interrelations between members of your group?</u></p> <p>a) Better, than most groups (3).</p> <p>b) Approximately the same as in most groups (2).</p> <p>c) Worse than in most groups (1).</p> <p>d) I don't know, it's hard to say (1).</p> <p><u>4. What is your interrelation with management?</u></p> <p>a) Better than most groups (3).</p> <p>b) Approximately the same as in most groups (2).</p> <p>c) Worse than in most groups (1).</p> <p>d) I don't know. (1)</p> <p><u>5. What is the attitude to the case in your group?</u></p> <p>a) Better than most groups (3).</p> <p>b) Approximately the same as in most groups (2).</p> <p>c) Worse than in most groups (1).</p> <p>d) I don't know. (1).</p>
--

(Source: [13])

Table 7. Levels of cohesion perception of people in the group of workers with different length of work according to the method of K. E Sishor (arithmetic mean)

Assessment	Subgroups				
	1	2	3	4	5
Arithmetic mean	14,67	14,78	14	12,14	11,83
Arithmetic mean ± Standard deviation	14,67 ± 3,89	14,78 ± 5,50	14 ± 4,91	12,14 ± 5,26	11,83 ± 3,47

The following formulas (1-2) were used to determine the arithmetic mean and standard deviation (table 7)

$$arith.m. = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} x_{i(j)}}{n_j}; \tag{1}$$

$$st.dev._j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (x_i - aryth.m._j)^2}{n_j - 1}, \quad (2)$$

where x_i – the number of the subgroup of the control group ($j = 1, 2, \dots, 5$);

n_j – number of persons in the j -th subgroup.

Graphical display of data is shown in Fig. 17.

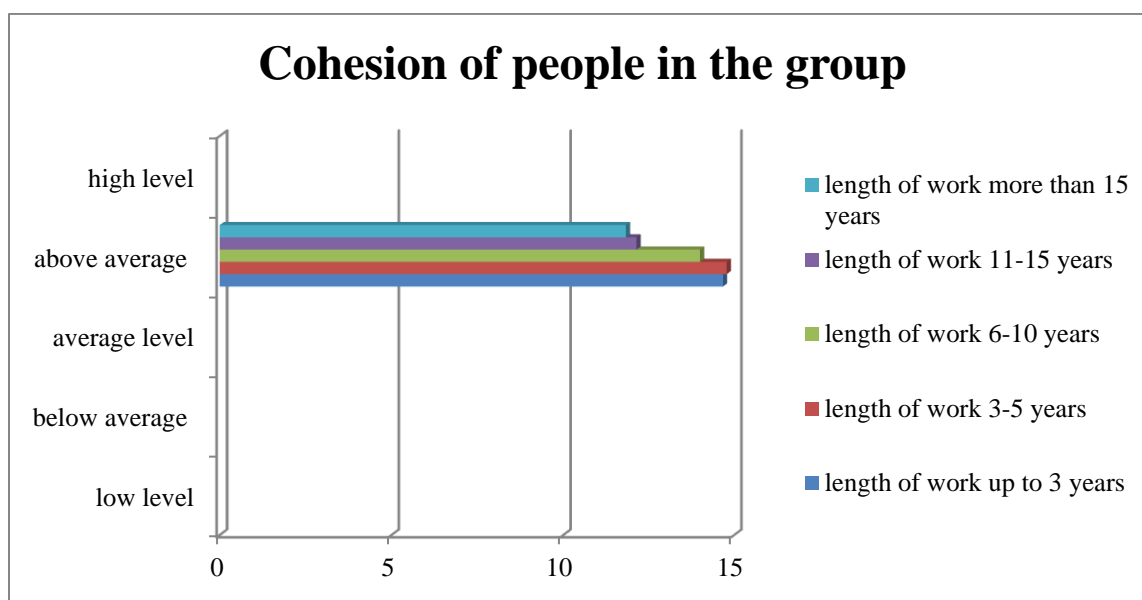


Fig. 17. The average mean of employees with different length of work and their levels

From Fig. 17 it is obvious that the cohesion of people is above average level for all groups of respondents. This is a positive point that should be used by personnel management when choosing forms of organizational work. Also it should be noted that the unanimity of assessment among young professionals is higher, due to youthful maximalism.

Conclusions

1. It should be noted a fairly high level of satisfaction with the work environment, which can be explained by the fact that people like the work itself. This is typical of «real railwaymen» who are patriots and even «fans» of railway transport.

2. The results of a high level of satisfaction with the coherence of those production units where students and graduates of the specialty «Transport Technology» work were unexpected, which can be explained by the professional level or long period of work in one unit.

3. A negative assessment of the style and competence of lower and middle managers of the SWR is directly proportional to the experience of transport management staff: the more experience, the less positive assessment.

4. The greatest dissatisfaction with the opportunities for promotion belong to employees with experience of 6-15 years, because they are professionals with experience, intention and confidence in their abilities. This is also the expected empirical result. However, it should be noted that the level of dissatisfaction with promotion is too high: more than 70 % of employees with 6-10 years of length of work and almost 60 % – for 11-15 years of experience.

5. 50 % of young professionals believe that their intellectual level is higher than the tasks offered to them.

6. Cohesion of people in linear structural units is above average for all groups of respondents, regardless of experience.

7. Given the dynamic structural and economic changes in JSC «Ukrainian Railways», this research recommended to be done regularly every 2-3 years [29]

REFERENCES

1. Samsonkin V. M., Horetskyi O. A. & Shcherbyna R. S. (2019). Vykorystannia pryntsyviv orhanizatsiinoi kultury v systemi formuvannia fakhivtsiv zaliznychnoho transportu [The use of the principles of organizational culture in the system of formation of railway transport specialists]. *Transportni systemy i tekhnologii. Zbirnyk naukovykh prats DUIT – Transport systems and technologies. Collection of scientific works of SUIT* (Vols. 33), (pp. 132-144). Kyiv: SUIT [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-2-13>
2. Samsonkin V. M., Horetskyi O. A., Shcherbyna R. S. & Mazurenko Z. P. (2019). Zabezpechennia samoorhanizatsii sotsialno-ekonomichnoi diialnosti zaliznychnoho transportu za dopomohoiu personalu: orhanizatsiina kultura [Ensuring self-organization of socio-economic activities of railway transport with the help of staff: organizational culture]. *Transportni systemy i tekhnologii. Zbirnyk naukovykh prats DUIT – Transport systems and technologies. Collection of scientific works of SUIT* (Vols. 34), (pp. 302-312). Kyiv: SUIT [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-12>
3. Samsonkin V. M., Horetskyi O. A. & Shcherbyna R. S. (2020). Analysis of the direction of impact of the organizational culture on the activities of transport enterprises. *Transportni systemy i tekhnologii. Zbirnyk naukovykh prats DUIT – Transport systems and technologies. Collection of scientific works of SUIT* (Vols. 35), (pp. 215-226). Kyiv: SUIT [in English].
4. Vanchenko L. V. (2018). Aktualni psykholohichni problemy upravlinnia personalom na zaliznychnomu transporti [Current psychological problems of personnel management in railway transport]. S. D. Maksymenko (Eds.), *Psykholohichni Chasopys. Zbirnyk naukovykh prats – Psychological Journal. Collection of scientific works* (Vols. 9 (18)), (pp. 152-168). Kyiv: NAPSU. Retrieved from <http://www.apsijournal.com/index.php/psyjournal/issue/view/19/Psychological%20Journal%209.pdf> [in Ukrainian].
5. Apostoliuk O. (2016). Korporatyvna kultura yak instrument efektyvnoho menedzhmentu pidpriemstva v pidvyshchenni yoho konkurentospromozhnosti [Corporate culture as a tool for effective management of the enterprise in increasing its competitiveness]. *Ekonomichnyi Chasopys – Economic Journal* (Vols. 2), (pp. 68-73). Volyn: EENU [in Ukrainian].
6. Androsova O. F. (2017). Istorychni aspekty vynyknennia poniattia «korporatyvna kultura»: sutnist, elementy, vlastyvoli, typy. Intehratsiia osvity, nauky i biznesu [Historical aspects of the concept of «corporate culture»: essence, elements, properties, types. Integration of education, science and business]. Zaporizhzhia: ZNU [in Ukrainian].
7. Kasych A. O. & Burba O. A. (2017). Innovatsiini pidkhody v praktysi upravlinnia personalom konkurentospromozhnoho pidpriemstva [Innovative approaches in the practice of personnel management of a competitive enterprise]. *Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo. Naukovi visnyk – International economic relations and the world economy: Scientific bulletin* (Vols. 16 (1)), (pp. 130-134). Uzhhorod: UzhNU [in Ukrainian].
8. Savytska V. O. (2009). Psykholohichni suprovod profesiinoho navchannia yak umova formuvannia psykholohichnoi hotovnosti do profesiinoi diialnosti [Psychological support of professional training as a condition for the formation of psychological readiness for professional activity]. S. D. Maksymenko (Eds.), *Problemy suchasnoi psykholohii. Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho Natsionalnoho Universytetu imeni Ivana Ohienka – Problems of modern psychology: Collection of scientific works of Kamenets-Podolsky National University named after Ivan Ogiienko*. Kamianets-Podilskiy: Aksioma [in Ukrainian].
9. Parsons T. (1993). Poniattia suspilstva: komponenty ta yikh vzaiemovidnosyny [The concept of society: components and their interrelations]. *THESIS* (Vols. 1 (2)), (pp. 94-121) [in Russian].
10. Introduction to the Denison model. Retrieved from <https://www.denisonconsulting.com/wp-content/uploads/2019/08/introduction-to-thedenison-model.pdf> [in English].
11. Test otsinky psykholohichnoho klimatu u kolektyvi [Test for assessing the psychological climate in the team]. Retrieved from <https://vseosvita.ua/library/test-ocinki-psiholohichnogo-klimatu-u-kolektivi-219794.html> [in Ukrainian].
12. Otsinka zadovolenosti robotoiu (V. A. Rozanova) [Evaluation of job satisfaction (V. A. Rozanova)]. Retrieved from http://ni.biz.ua/6/6_9/6_94516_v-a-rozanova.html [in Ukrainian].
13. Metodyka vyznachennia indeksu hrupovoi zghurtovanosti [Methodology for assigning the index of group clustering]. Retrieved from <https://www.arhivinfo.ru/1-196.html> [in Ukrainian].
14. Vasyliiev O. L., Dorokhin S. V. & Konovalenko A. M. (2019). Otsinka orhanizatsiinoi kultury strukturnoho pidrozdilu zaliznytsi [Assessment of the organizational culture of the structural unit of the railway]. *Ekonomichni nauky. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka» – Economic sciences. International Scientific Journal «Internauka»*, 9, 12-17. Retrieved from <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2019/9/5236/> [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2019-9-5236>
15. Hrebinska S. I. (2012). Model formuvannia pozytyvnoi korporatyvnoi kultury u systemi motyvatsii personalu mashynobudivnoho pidpriemstva [Model of formation of positive corporate culture in the system of motivation of personnel of machine - building enterprise]. *Ekonomichni nauky. Visnyk KHNU – Economic sciences. Bulletin of KhNU*, 3, 80-84. Retrieved from http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/2012_3_1/080-084.pdf [in Ukrainian].

16. Kalinichenko L. L. (2012). Personal yak meta ta faktor sotsialno-ekonomichnoi modernizatsii pidpriemstv zaliznychnoho transportu [Personnel as a goal and factor of socio-economic modernization of railway transport enterprises]. *Ekonomichni nauky. Visnyk KHNU – Economic sciences. Bulletin of KhNU*, 3, 84-88. Retrieved from http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/2012_3_1/084-088.pdf [in Ukrainian].
17. Vanchenko L. V. (2017). Etapy vprovadzhennia systemy psikhologichnogo zabezpechennia upravlinnia personalom na zaliznychnomu transporti [Stages of implementation of the system of psychological support of personnel management on railway transport]. *Proceedings from II All-Ukrainian Internet-conference «Professional development of specialists in the system of adult education: history, theory, technologies»*. (pp.298-300). Kyiv: CIPE [in Ukrainian].
18. Hrebenuk H. M. (2018). Tsentri rozvytku kompetentsii trudovoho potentsialu pidpriemstv zaliznychnoho transportu [Center for the development of competences of labor potential of railway transport enterprises]. *Ekonomika pidpriemstva. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti – Business economics. Bulletin of transport and industry economics* (Vols. 62), (pp. 157-167). Kharkiv: USART [in Ukrainian]. doi: 10.18664/338.47:338.45.v%vi%i.136126.
19. Korin M. V. (2016). Sotsialnyi rozvytok kolektyvu pat ukrainska zaliznytsia v umovakh reformuvannia haluzi naslidky ta elementy zabezpechennia [Social development of the staff of PJSC «Ukrainian Railways» in the context of reforming the industry: the consequences and elements]. *Bulletin of transport economics and industry* (Vols. 56), (pp. 97-104). Kharkiv: USART [in Ukrainian].
20. Tokmakova I. V. & Kuzub A. V. (2016). Stratehichne upravlinnia personalom na pidpriemstvakh zaliznychnoho transportu [Strategic personnel management at railway transport enterprises]: *Bulletin of transport economics and industry* (Vols. 53), (pp. 110-114). Kharkiv: USART [in Ukrainian].
21. Zorina O. I. (2012). Model stiikoho sotsialno-ekonomichnogo rozvytku zaliznychnoho transportu ukraïny [Model of sustainable socio-economic development of railway transport of Ukraine]: *Bulletin of transport economics and industry* (Vols. 37), (pp. 117-124). Kharkiv: USART [in Ukrainian].
22. Kampf R., Hitka M. & Ližbetinová L. (2019). Direction of the corporate culture in Slovak and German transport companies from a top managers' perspective. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* (Vols. 47 (3)), (pp. 213-219) [in English]. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.11166>
23. Kampf R., Lorincová S., Hitka M. & Stopka O. (2017). Generational differences in the perception of corporate culture in European transport enterprises. *Sustainability*, 9(9):1561 [in English]. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9091561>
24. Dimitrova Y. P. (2018). Communication for innovation in the context of corporate culture – competitiveness relationship. *Mechanical Engineering: Scientific Journal* (Vols. 36), (pp. 5-61) [in English].
25. Hitka M., Vetráková M., Balážová Ž. & Danihelová Z. (2015). Corporate culture as a tool for competitiveness improvement. *Procedia Economics and Finance*, 34, 27-34. Retrieved from <http://www.ijqr.net/journal/v10-n4/4.pdf> [in English]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01597-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01597-X).
26. Criveanu M. M. (2015). The impact of corporate culture on the effectiveness of companies. *Annals of The Constantin Brancusi University of Targu Jiu*, 5, 74-78. Retrieved from https://www.utgjiu.ro/revista/ec/pdf/2015-05/12_Criveanu.pdf [in English].
27. Turoń K. (2017). Corporate social responsibility to employees: the best labour practices in transport and logistics companies. *Journal of Corporate Responsibility and Leadership (online)*, 3 (1), 37-47 [in English]. DOI: 10.12775/JCRL.2016.003.
28. Do Huu Hai, Nguyen Minh Hai & Nguyen Van Tien (2018). The influence of corporate culture on employee commitment. *Proceedings from International Econometric Conference of Vietnam «Econometrics for Financial Application»*. (pp. 450-465). Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-73150-6_36#author-information [in English].
29. Popova H. V. Priyomy neiro-lingvistichnogo prohramuvannia u spilkuванні kerivnykiv [Techniques of neuro-linguistic programming in the communication of managers]. *Proceedings from Conference «Performances in a Competitive Economy»*. (the VII-th edition) [in Russian].

Валерій Самсонкін¹, Галина Попова², Розалія Щербина³, Олексій Горецький⁴, Олександра Соловйова⁵

¹ Професор, Кафедра технологій транспорту та управління процесами перевезень, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1521-2263>

² Професор, Кафедра педагогіки і психології управління соціальними системами, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61000, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3814-4037>

³ Доцент, Кафедра технологій транспорту та управління процесами перевезень, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4505-921X>

⁴ Доцент, Кафедра технологій транспорту та управління процесами перевезень, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2656-6120>

⁵ Аспірант, Кафедра технологій транспорту та управління процесами перевезень, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7933-3929>

* Автор, відповідальний за листування: solovyova0108@gmail.com

АНАЛІЗ ЕМПІРИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ СТУДЕНТІВ ТА ВИПУСКНИКІВ ФАКУЛЬТЕТУ «УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ» ПРО СТАН ПСИХОЛОГІЧНОГО КЛІМАТУ У ПІДРОЗДІЛАХ ЗАЛІЗНИЦІ

З метою розвитку корпоративної культури на підрозділах українських залізниць, в даній статті здійснений аналіз емпіричного дослідження про стан психологічного робочого клімату на регіональній філії «Південно-Західна залізниця» АТ «Українська залізниця». Емпіричне дослідження було проведено у формі анкетування, базу якого склали три методики: оцінка психологічної атмосфери в колективі (по А. Ф. Фідлеру), визначення індексу групової згуртованості (К. Е. Сішора), оцінка задоволеності роботою (В. А. Розанової). Результати проведеного дослідження показали рівень задоволеності роботою працівників обраного підрозділу (фахівців з транспортних технологій) за різними факторами.

Ключові слова: організаційна культура, психологічний клімат, задоволеність, емпіричне дослідження, транспортні технології.

Володимир Голіков¹, Катерина Сінюта²

¹Професор кафедри управління судном, Національний університет «Одеська морська академія», Україна, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65052. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-3016>

²Асистент кафедри теорії та будови судна, Національний університет «Одеська морська академія», Україна, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65052. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-6912>

* Автор, відповідальний за листування: icewater17@gmail.com

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДНА НА КУРСІ

Управління рухом судна на курсі – важлива морська якість, що визначає ефективність керування судном. Умови довкілля, в яких необхідно вирішувати завдання з управління курсом, мають різну природу – обмежена видимість, штормова погода, обледеніння, мілководдя, припливні явища, вузькі умови, наявність інших суден тощо. Усі ці аспекти не можна комплексно розглянути традиційними математичними методами, забезпечуючи необхідну адекватність фактичного процесу.

В даній роботі освітлені існуючі підходи до управління рухом судна на курсі такі як курсовий спосіб управління, управління за збуренням, управління рухом судна на курсі на основі принципу довгострокового прогнозування, пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) закон управління (управління за відхиленням), інтелектуальні підходи до управління судами, зокрема, синергетичний підхід, використання нейронних мереж, нечіткої логіки та еволюційних (генетичних) алгоритм-мов.

Ключові слова: керованість, збурення, відхилення, ПІД-закон.

Вступ. Точність управління судном на курсі є актуальною проблемою. Дослідження в галузі управління курсом судна важливі в області управління рухом судна, в якій точність управління курсом судна завжди була актуальною проблемою. Через невизначені зовнішні впливи при керування судном викликає труднощі.

При посадці або висадці лоцмана режим маневрування судна повинен бути стійким на певному курсі; кут швартування необхідно постійно регулювати під час швартування, і для цього модель контролю стабілізації курсу повинна бути перетворена на модель контролю відстеження курсу, що означає, що контроль витримування курсу повинен бути більш точним і мультимодальним. Крім того, з поступовим просуванням досліджень інтелектуальних безпілотних комерційних суден, стабілізація курсу також має бути розширена до області маневрування в порту.

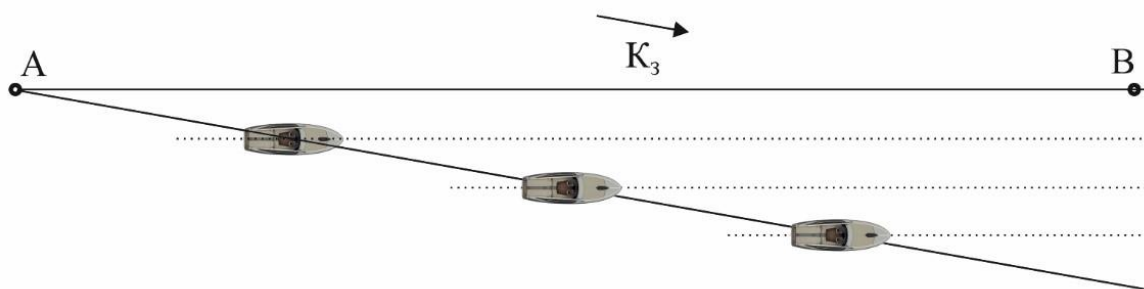
Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Велика кількість авторів присвятили свої роботи проблемі керованості судна, серед яких необхідно виділити фундаментальні роботи Г.В. Соболева, Р.Я. Першина, Ю.Л. Воробйова та Т.І. Фоссена [1-4]. Так само відомі роботи зарубіжних авторів К. Номото, Є.В. Левандовскі і І. Маккалума [5-7]. У цих роботах наведено докладний математичний опис динаміки судна і наводяться рівняння його керованості.

Мета і завдання дослідження. Мета даної статті - огляд сучасних підходів до управління судном на курсі та аналіз їх ефективності з позиції забезпечення безпеки плавання.

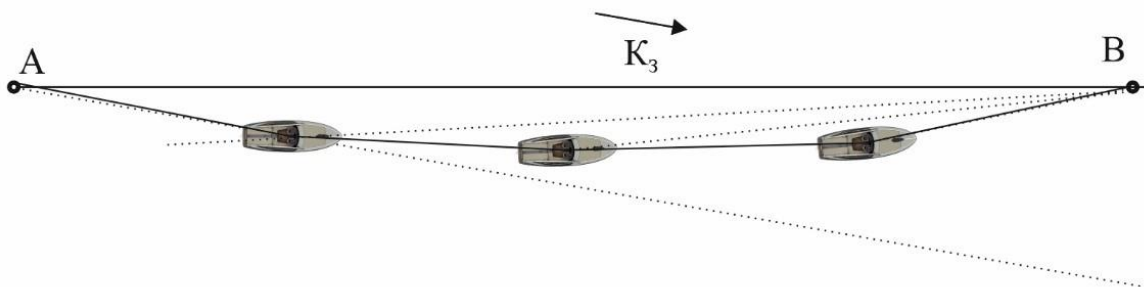
Матеріали та методи дослідження. При курсовому способі (рис 1(а)) судно управляється по компасу, без урахування зовнішніх збурень і обставин плавання, рух без судна між

путьовими точками не коригується. При такому способі відхилення від наміченого шляху відбувається за рахунок дії як зовнішніх, так і внутрішніх факторів максимально, планова траєкторія не враховується. Судно ніколи не прийде в пункт призначення, хоча він використовується на відрізках шляху між обсерваціями [8].

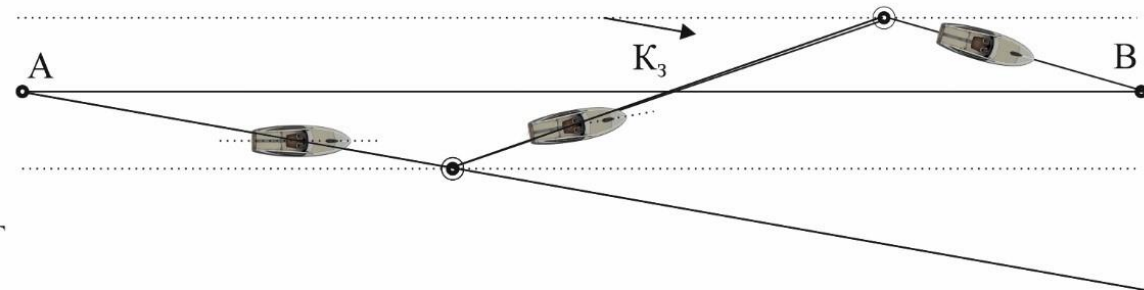
А



Б



В



Г



Рис. 1. А) Курсовий спосіб керування. Б) Від «WP до WP». В) За відхилення. Г) За збуренням

Режим автопроводки за маршрутом «від WP до WP» (Way point steering) (рис 1(б)) послідовно застосовується після кожного повороту на новий відрізок маршруту [9]. Тому розглянемо спочатку алгоритм управління до введеної однієї путьової точки В, починаючи від

моменту включення цього режиму в точці. Припустимо, судно слідувало курсом K_0 , було обрано функцію «з заданою кутвою швидкістю» $\Delta_t (0,1 \div 1,0 \text{ с})$ біля повороту на курс до точки В. З моменту включення режиму «Way point steering» система керування через малий інтервал часу $\Delta t (0,1 \div 1,0 \text{ с})$ починає розраховувати пеленг P_J на точку В, а також значення функції, що задає зміну курсу, згідно алгоритму:

$$\text{якщо } |P_J - K_J| > \delta \text{ то } K_{3J} = K_{3J-1} + \omega_3 \Delta_t, \quad (1)$$

$$\text{ще } K_{3J} = P_J - \gamma.$$

де δ - мала величина; K_J - значення поточного курсу.

Регулятор виробляє переключення керма для забезпечення рівності K_J та K_{3J} . Кінцем повороту вважається момент, коли в перший раз умова $|P_J - K_J| > \delta$ не виконується. Після цього за алгоритмом знаходяться значення K_{3J} для руху у напрямку до точки В. Значення пеленга на точку В у цьому випадку виправляються поправкою на кут зносу γ . Якщо судно зноситься вітром і течією, то при утриманні курсу на путьову точку траєкторія судна відхиляється від направлення на цю точку, яке було в момент закінчення повороту судна на курс до неї. Для зменшення такого відхилення слід врахувати кут зносу. Його значення може бути знайдено інтегруванням $\gamma = a_H \int (P - K) dt$, або отримано за даними прийомоіндикатора GPS. З урахуванням кута знесення на задану путьову точку направляється не ДП судна, а вектор швидкості його руху.

При курсовому по відхиленню способі (рис 1(в)) $KK_{\text{зад}} = IK_1 + \Delta K$ курс судна змінюється щоразу, коли проводиться визначення місця і встановлюється, що відбулося неприпустиме зміщення відносно планованої траєкторії. Перерахунок курсу IK_1 проводиться за поточним значенням координат і подальшої подорожньої точки, і чим частіше визначається місце, тим точніше судно вийде в намічену точку.

Для регулювання об'єктами керування, як правило, використовують типові регулятори, назви яких відповідають назвам типових ланок:

П-регулятор, пропорційний регулятор. Принцип дії полягає в тому, що регулятор виробляє керуючий вплив на об'єкт пропорційно величині помилки (чим більша помилка E , тим більший керуючий вплив Y).

І-регулятор, інтегруючий регулятор. Керування пропорційно до інтегралу від помилки.

Д-регулятор, диференціюючий регулятор. Створює керуючий вплив тільки при зміні регульованої величини. На практиці прості П, І, Д регулятори комбінуються в регулятори виду ПІ, ПД, ПІД.

Залежно від обраного вигляду регулятор може мати пропорційну характеристику (П), пропорційно-інтегральну характеристику (ПІ), пропорційно-диференціальну характеристику (ПД) або пропорційно-інтегральну (ізодромну) характеристику з впливом за похідною (ПІД-регулятор).

При пропорційному законі управління (П-регулятор) рівняння системи «АР-судно»:

$$\tau_1 \ddot{\Psi} \pm \dot{\Psi} = -k_s k_1 \Psi + M'_B, \quad (2)$$

де M'_B - наведений збурюючий момент.

Система стабілізації курсу з П-регулятором і нестійким на курсі судном непрацездатна. Для стійких на курсі суден П-регулятор є неефективним. Через невиконання ним здобуття судно

здійснює коливання щодо заданого курсу. Крім того, при дії на судно односторонніх факторів система має статичну похибку, яка пропорційна постійній складовій моменту зовнішніх сил. З названих причин П-регулятор вважається незадовільним для стабілізації курсу морських суден.

При пропорційно-диференційному законі управління (ПД-регулятор) рівняння вільного руху САУ_к має вигляд [10]

$$\ddot{\Psi} \pm 2\gamma\omega_0\dot{\Psi} + \omega_0^2\Psi = 0, \quad (3)$$

$$\text{де } \omega_0 = \sqrt{\frac{k_s k_1}{\tau_1}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_s k_1}{\tau_1}},$$

Порівнюючи П-регулятор і ПД-регулятор для стійких на курсі суден, можна помітити, що в останньому є більше можливостей задовольнити вимоги до якості управління. Тут коефіцієнт більше в $(k_s k_1 + 1)$ раз, ніж у П-регуляторі. Це призводить до більш швидкого загасання коливань при приході до заданого курсу. При зовнішньому впливі статична похибка при ПД-законі управління, визначається тим же виразом, що і в П-регуляторі. Авторульові з ПД-законом управління знайшли практичне застосування і випускаються промисловістю.

Керуючим органом у системі автоматичного управління курсом судна (САУКС) є авторульовий. В основі його роботи лежить пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) закон управління. Сучасні АР зазвичай включають блок програм маневрів (БПМ) і регулятор, що виробляє сигнал переключки керма залежно від помилки управління (принцип управління за відхиленням). ПІД-регулятор у сучасному розумінні був запропонований у статті Миколи Мінорського в 1922 році. Він запропонував, що можна використовувати такий керуючий вплив

$$u(t) = ke(t), \quad k > 0, \quad (4)$$

де k – деяка постійна.

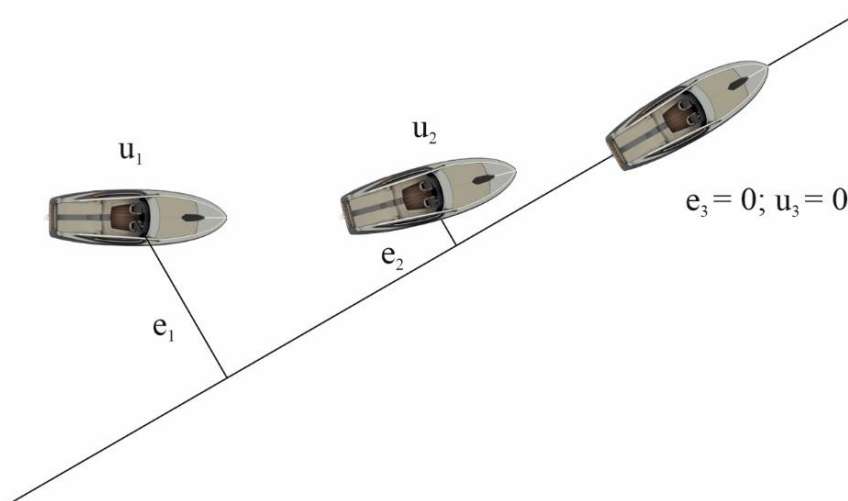


Рис. 2. Вихід судна на курс при керуванні $u(t) = ke(t)$

При ПД-алгоритмі рівняння системи стабілізації курсу приймає вигляд:

$$\tau_1 \ddot{\Psi} \pm \dot{\Psi} = -k_s \left(k_1 \Psi + k_2 \dot{\Psi} + k_3 \int \Psi dt \right) + M'_B. \quad (5)$$

Диференціюючи це рівняння, отримуємо

$$\tau_1 \ddot{\Psi} + (k_s k_2 \pm 1) \dot{\Psi} + k_s k_1 \Psi + k_s k_3 \Psi = \frac{dM'_B}{dt}. \quad (6)$$

У режимі, що встановився $\Psi_{\text{уст}} = 0$. Система з ПД-регулятором стійка, коли всі її коефіцієнти позитивні $(k_s k_2 \pm 1) k_s k_1 > \tau_1 k_s k_3$. Статична похибка при ПД-законі дорівнює нулю $\Psi_{\text{уст}} = 0$, тобто система стабілізації курсу є астатичною.

Одним із способів підвищити якість утримання судна на курсі є управління з додатковим каналом за збуренням. Найбільш очевидним способом підвищити якість утримання на курсі представляється управління з додатковим каналом за збуренням. Такий спосіб управління потребує наявності на судні додаткових датчиків, що вимірює параметри вітру та хвилювання та передають інформацію до них до авторульової через відповідні компенсаційні ланки. Авторульовий далі на цій основі здійснює перекладку керма на кут, необхідний для усунення можливого знесення з заданого курсу, викликаного цим збуренням. Основну збурюючому дія при стабілізації на курсі надає морське хвилювання.

У відкритому морі, як показують дослідження, воно нерегулярне. Крім того, в штормову погоду на власні коливання судна на курсі накладаються вимушені коливання - нищпорення. Прямий зв'язок між виміряними значенням зовнішнього обурення і величиною кута розшукування, ним викликаного, складно розрахувати. Такий зв'язок можна визначити тільки статистичними методами за допомогою кореляційних функцій. Виникає необхідність у створенні математичної моделі для компенсації збурення кутом перекладки керма. У роботах деяких сучасних авторів, зокрема [11], досліджується можливість створення таких компенсаторів. У роботі [12] розроблений ефективний алгоритм стабілізації судна на курсі при послідовному зчисленні та обсервації руху судна. Запропоновано алгоритм обліку векторів течії та вітрохвильового збурення в початковій точці шляху судна, вважаючи модуль відносної швидкості судна постійним. У роботі наведено модель визначення елементів руху судна у вигляді алгоритму, що представляє послідовність операторів присвоювання, та операторів вводу, друку та виходу, складають блок-схему його програмної реалізації. У статті наведено так само алгоритм розрахунку модулів і внутрішніх кутів векторного трикутника, утвореного в результаті обсервації. Останнім кроком було розглянуто повернення на лінію шляху судна за наступний відрізок часу, рівний одній годині. При цьому зберігається модуль швидкості судна, модуль і напрямку вектору сумарного збурення, а шляхова швидкість судна є змінною (рис. 1(г)).

Ще одним методом управління рухом є управління на основі довгострокового прогнозування [13]. Відповідно до ідеї довгострокового прогнозування, поведінка судна, через його інерційності, на деякому невеликому проміжку часу може досить точно бути спрогнозована, що за своєю суттю є більш досконалим аналогом дії диференційного каналу ПД-регулятора. Даний підхід, однак, вимагає значно більших обчислювальних витрат. У кожен конкретний момент часу робиться прогноз значень курсу судна на тривалий термін. Цей прогноз ґрунтується на математичній моделі динаміки судна як об'єкта управління (явно або в алгоритмі управління). Автори методу вважають, що з його допомогою можна буде краще врахувати мінливу динаміку судна (особливо в умовах хвилювання), забезпечивши тим самим краще його управління.

Прогноз залежить від сценарію управління в майбутньому, яке передбачається постійним на весь час прогнозування. З декількох сценаріїв управління вибирається стратегія, що забезпечує найкращу схожість вихідної координати (справжній курс) до значенням, що задається. Стратегія, вибрана як найкраща, застосовується потім як керуючий вплив, проте тільки на заданий час. У наступний момент дискретного часу вся процедура повторюється, в результаті чого забезпечується уточнена керуюча дія. Така стратегія відома під назвою стратегії управління по горизонту, що віддаляється.

Останнім часом для цілей управління складними нелінійними об'єктами, що працюють в умовах невизначеностей, в якості альтернативи традиційним підходам, все ширше починають застосовуватися методи інтелектуального управління і, зокрема, синергетичний підхід, використання нейронних мереж, нечіткої логіки та еволюційних (генетичних) алгоритм-мов. Подібні підходи до управління рухом судна поки освітлені мало, проте кількість робіт, присвячених цій темі, з кожним роком збільшується [14-15]. В основному, ідеї штучного інтелекту пропонується реалізувати при створенні систем підтримки прийняття рішень судноводія в складних ситуаціях управління судном. До таких ситуацій відносять: вибір оптимального маршруту; оцінка ризиків; управління рухом судна на траєкторії.

Висновки. За результатами аналізу, описані в літературі методи вдосконалення існуючих способів управління рухом судна можна розділити на дві групи: традиційний підхід та застосування концепції «м'яких обчислень», а саме: використання нейронних мереж, нечіткої логіки та еволюційних (генетичних) алгоритмів.

Найпоширенішим є управління судном за відхиленням, що є необхідним, але недостатнім для забезпечення безпеки судноплавства, оскільки воно враховує тільки нормальний вплив зовнішнього збурення без урахування його напрямку. Регулювання руху судна за збуренням підвищує якість утримання судна на лінії маршруту. Однак питання використання даного методу при вирішенні задач управління рухом судна в літературі поки що висвітлені мало, що дозволяє вважати цей напрям досліджень перспективним та актуальним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. Л.: Судостроение, 1976. 477 с.
2. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. Л.: Судостроение, 1983. 272 с.
3. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судов в стесненном фарватере. Л.: Судостроение, 1992. 224 с.
4. Fossen T.I. Marine Control Systems (2002). Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. 570 p.
5. Nomoto K., T. Taguchi, R. Honda On the steering qualities of ships (1957). Singapore, International ship Building Congress, p. 354-370.
6. Lewandowski E.M. The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping. N.Y.: World Scientific Publishing Company, 2003. 300 p.
7. McCallum I.R. A ship steering mathematical model for all maneuvering regimes. N.Y.: AMIVAR, 1985. 21 p.
8. Мальцев А.С., Голиков В.В., Сафин И.В. Методологические основы маневрирования судов при сближении. Одесса: ОНМА, 2013. 218 с.
9. Pettersen K.Y. and Leferber E. Way-point tracking control of ships. In proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
10. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.
11. Андреев А.И., В.Е. Львов Анализ точности принципов курсового управления движением судна. Автоматизация судовых технических средств: Сб. научн. Трудов/ ОНМА, Вып. 14. Одесса: ИздатИнформ, 2008. с. 3 – 7.
12. Сінюта К.О. Ітераційний метод стабілізації судна на курсі та маршруті [текст]. Судноводіння: Зб. наук. праць. НУ «ОМА» Вип. 31. Одеса: «ВидавІнформ», 2021. С.117-124.
13. Clarke D.W., С. Mohtadi, P. Tuffs Generalized predictive control. Part I: The basic algorithm. Automatica. Vol. 23. N.Y., 1987. p. 137 – 148.
14. Подпорин С.А. Intelligent control techniques applied to ship steering. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Безпека мореплавства та її забезпечення при проектуванні та будівництві суден (БМС) 2007» 25-26 ЖОВТНЯ 2007. Миколаїв: НУК, 2007. С. 21-23.

15. Chen W. Q., Chen J., Zhang W. (2016): Adaptive Neural Network Robust Tracking Control for Ship Course. *Ship Engineering*, 9, 15–20.

REFERENCES

1. Sobolev H.V. Upravliaemost korablia y avtomatyzatsiya sudovozhdeniya. (1976). L.: Sudostroenye, [in Russian].
2. Pershyts R.Ya. Upravliaemost y upravlenye sudnom (1983). L.: Sudostroenye, [in Russian].
3. Vorobev Yu.L. Hydrodynamyka sudov v stesennom farvatere (1992). L.: Sudostroenye, [in Russian].
4. Fossen T.I. *Marine Control Systems* (2002). Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway, 2002. 570 p.
5. Nomoto K., T. Taguchi, R. Honda On the steering qualities of ships (1957). Singapore, International ship Building Congress, p. 354-370.
6. Lewandowski E.M. *The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping* (2003). N.Y.: World Scientific Publishing Company, 300 p.
7. McCallum I.R. A ship steering mathematical model for all maneuvering regimes (1985). N.Y.: AMIVAR, 21 p.
8. Maltsev A.S., Golikov V.V., Safyn Y.V. *Metodolohycheskye osnovy manevryrovanyia sudov pry sblyzheny* (2013). Odessa: ONMA.
9. Pettersen K.Y. and Leferber E. Way-point tracking control of ships. (2001). In proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control.
10. Vahushchenko L.L., Тсьмбал N.N. *Systemy avtomatycheskoho upravleniya dvyzhenyem sudna*. (2007). 3-e yzd., pererab. y dop. Odessa: Feniks. [in Russian].
11. Andreev A.Y., V.E. Lvov *Analyz tochnosti pryntsyypov kursovoho upravleniya dvyzhenyem sudna* (2008). *Avtomatyzatsiya sudovykh tekhnicheskyykh sredstv: Sb. nauchn. trudov/ ONMA, Vyp. 14*. Odessa: YzdatYnform, s. 3 – 7. [in Russian].
12. Siniuta K.O. *Iteratsiyniy metod stabilizatsii sudna na kursi ta marshruti* (2021). *Sudnovodinnia: Zb. nauk. prats. NU «OMA»*. Vyp. 31. Odesa: «VydavInform», S.117-124. [in Ukrainian].
13. Clarke D.W., C. Mohtadi, P. Tuffs Generalized predictive control. Part I: The basic algorithm *Automatica*. (1987). Vol. 23. N.Y., p. 137 – 148.
14. Podporyn S.A. *Intelligent control techniques applied to ship steering* (2007). *Materily Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Bezpeka moreplavannia ta yii zabezpechennia pry proektuvanni ta buduvanni suden (BMS) 2007»*. Mykolaiv: P. 21-23.
15. Chen W. Q., Chen J., Zhang W. (2016): Adaptive Neural Network Robust Tracking Control for Ship Course. *Ship Engineering*, 9, 15–20.

Volodymyr Golikov¹, Kateryna Siniuta²

¹Professor of the Department of Ship Handling, Odesa Maritime Academy National University, Ukraine, st. Didrichson, 8, Odesa, Ukraine, 65052

²Assistant of the Department of Ship Theory and Structure, Odesa Maritime Academy National University, Ukraine, vul. Didrichson, 8, Odesa, Ukraine, 65052

MAIN APPROACHES TO SHIP TRAFFIC CONTROL ON COURSE

The management of the vessel's course on the course is an important maritime quality that determines the effectiveness of the vessel's management. The environmental conditions in which course management tasks need to be addressed are of a different nature - limited visibility, stormy weather, icing, shallow water, tidal phenomena, narrow conditions, the presence of other vessels, and so on. All these aspects cannot be comprehensively considered by traditional mathematical methods, ensuring the necessary adequacy of the actual process.

This paper highlights the existing approaches to the management of ship traffic on the course such as course management, disturbance management, ship traffic management on the basis of long-term forecasting, proportional-integral-differential (PID) law of control (deviation control), intellectual approaches to court management, in particular, synergetic approach, use of neural networks, fuzzy logic and evolutionary (genetic) algorithms-languages.

Keywords: controllability, perturbation, deviation, PID law.

Анатолій Пасічник¹, Ірина Лебідь^{2}, Євгеній Кущенко³*

¹ Професор, Аналітично-науковий центр, Придніпровське відділення МАКНС, пр. О. Поля, 127/48, м. Дніпро, 49061, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8561-1374>.

² Доцент, Кафедра міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0707-4179>

³ Інженер, Транспортно-технічний відділ, АТ «Одеський припортовий завод», вул. Заводська, 3, 65481, м. Южне, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9145-5390>

* Автор, відповідальний за листування: i.h.lebed@gmail.com

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ ФАКТОРНО-РЕЙТИНГОВОЇ МОДЕЛІ

У статті представлені результати аналізу ефективності застосування факторно-рейтингового методу вирішення задачі знаходження оптимальних місць розміщення елементів логістичної транспортно-митної інфраструктури України з мінімізацією транспортної роботи з перевезень вантажів. Проведено визначення достатньої і економічно обґрунтованої кількості логістичних транспортно-митних комплексів для переробки імпортного вантажопотоку заданого обсягу.

У дослідженні використані методи системного та факторного аналізу розрахункових параметрів переробки вантажопотоків з урахуванням транспортних, економічних та адміністративних факторів розвитку територій. Встановлено, що відомі методи, розроблені для визначення місць розміщення окремих транспортно-логістичних центрів, не дозволяють оптимізувати відповідну логістичну інфраструктуру орієнтовану на переробку вантажопотоку в масштабах транспортної системи країни.

Для побудови ефективного розв'язку задачі оптимального розміщення декількох логістичних транспортно-митних комплексів запропоновано метод визначення факторно-рейтингового потенціалу ефективності міст для їх розміщення на території України з урахуванням транспортних, економічних та адміністративних факторів. Проведено оцінку транспортної роботи для 165 населених пунктів України, які включають міста з населенням більше 30 000 осіб, а також, населені пункти, в яких створено митні пости, або вантажні пункти пропуску через митний кордон України. Для кожного міста враховано відносне споживання імпортного вантажопотоку продовольчих товарів.

За наведеним алгоритмом проведено розрахунки для варіантів, що передбачають функціонування від одного до десяти логістичних транспортно-митних комплексів на всій території України. Аналіз результатів проведених розрахунків свідчить, що обсяг транспортної роботи ефективно зменшується у випадку створення від 1 до 5 транспортно-митних логістичних комплексів. Подальше збільшення кількості логістичних транспортно-митних комплексів, а відповідно і капітальних вкладень, не призводить до суттєвого зменшення сукупної транспортної роботи. Відповідно факторно-рейтинговий потенціал для міст, в зоні яких створення логістичних транспортно-митних комплексів є найбільш раціональним і має такі значення: Дніпро – 0,46; Київ – 0,46; Львів – 0,54; Одеса – 0,69; Харків – 0,62.

Наведені результати з оцінки ефективності оптимального розміщення логістичних транспортно-митних комплексів можуть мати впровадження в українській транспортній системі при побудові логістичної інфраструктури з переробки вантажопотоків достатньо великих обсягів.

Ключові слова: транспортно-логістична інфраструктура, транспортно-митні комплекси, факторно-рейтинговий метод, логістика.

Вступ. Транспортно-логістична інфраструктура є одним із визначальних факторів ефективності перевезення, зберігання та доставки товарів зовнішньоторговельного обігу. Тому удосконалення та побудова достатньо розвиненої транспортно-логістичної інфраструктури визначені як пріоритетні завдання Національної транспортної стратегії України на період до 2030 р. [1].

Основу транспортно-логістичної інфраструктури складають транспортні шляхи та відповідна мережа логістичних транспортно-митних комплексів (ЛТМК) [2]. Організація роботи ЛТМК здійснюється на основі планування і раціональної доставки (перевезення) вантажів від місць перетину кордону і до місць споживання шляхом розрахунку та реалізації оптимальних логістичних ланцюгів. Однією із основних проблем створення мережі логістичних транспортно-митних комплексів є питаннями визначення оптимальної кількості таких комплексів в регіоні та їх взаємного розташування по регіонах країни. У зв'язку з цим розробка та удосконалення методології визначення оптимальної кількості та місць розміщення елементів логістичних транспортно-митних комплексів є актуальною як науковою, так і прикладною задачею [3, 4, 5].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Важливість подальшого удосконалення методологічних підходів формування і оптимізації транспортно-логістичної інфраструктури обґрунтована в цілому ряді наукових праць. Результати дослідження питань пов'язаних з модернізацією об'єктів транспортно-логістичної інфраструктури та удосконаленням різних методів визначення їх оптимального місцезнаходження, а також перспектив розвитку ЛТМК і транспортно-сервісних центрів в Україні наведені в монографії [2]. Основні закономірності формування світової транспортно-логістичної інфраструктури систематизовані в статті [3]. В наукових роботах [4–7] проведено аналіз та узагальнення передового досвіду країн Європи та світу і визначені можливі напрямки його застосування до розбудови транспортно-логістичної інфраструктури України. Можливі варіанти удосконалення структури логістичних транспортно-митних комплексів розглянуті в роботі [8]. Раціональні рішення країн ЄС з облаштування інфраструктури митного кордону для сприяння транспорту і торгівлі наведені у звіті ОБСЄ [9]. Визначені основні напрями удосконалення технологій виконання митних формальностей при переміщенні вантажів і транспортних засобів через митний кордон.

Результати аналізу проектних рішень з побудови архітектури транспортно-логістичних систем найбільш розвинутих країн світу та реалізації відповідних інформаційних систем логістичного управління наведені в роботі [10]. Проблеми ефективності логістичної транспортно-митної інфраструктури та оцінки транзитного потенціалу України розглянуті в роботі [11]. Напрями та перспективи розбудови транспортно-логістичної інфраструктури в Україні на основі сучасних технологічних рішень запропоновані в статті [12].

Організаційні та інфраструктурні фактори, а також умови доцільності створення міжнародного логістичного центру сформульовані в роботі [13]. Визначені можливі джерела фінансування будівництва регіонального логістичного центру з використанням як бюджетних, так і небюджетних (інвестиційних, запозичених) коштів. Сучасні тенденції розвитку регіональних транспортно-логістичних центрів та можливості їх запровадження в Україні проаналізовані в публікації [14]. Важливість застосування міжнародного досвіду розбудови транспортно-логістичних центрів для ефективного розвитку транспортно-логістичної інфраструктури обґрунтована в роботі [15]. Проблеми удосконалення структури та

функціонування митних терміналів у складі логістичних транспортно-митних комплексів систематизовані в роботі [16]. В публікації [17] наведені результати систематизації основних факторів і методів формування та удосконалення транспортно-логістичної інфраструктури. Комплексний метод факторно-рейтингової оптимізації побудови логістичної мережі транспортно-митних комплексів запропонований в роботі [18]. В роботах [19, 20] запропоновано та розроблено методику комплексної оцінки ефективності об'єктів митної інфраструктури. Методику моделювання та дослідження параметрів функціонування транспортно-логістичного центру наведено в публікації [21]. В публікації [22] розроблено імітаційну модель функціонування вантажного митного комплексу, як об'єкта митної інфраструктури.

Разом з тим питання удосконалення методології визначення оптимальної кількості логістичних транспортно-митних комплексів та їх перероблювальної спроможності товаропотоку при формуванні загальнодержавної логістичної інфраструктури потребує подальшого розвитку.

Мета і завдання дослідження. Метою даної статті є визначення раціональної кількості логістичних транспортно-митних комплексів та їх перероблювальної спроможності товаропотоку при формуванні загальнодержавної логістичної інфраструктури на основі критерію оптимізації витрат на їх будівництво.

Відповідно до даної мети роботи були поставлені такі завдання:

провести системний аналіз та встановити залежність витрат на будівництво і перероблювальної спроможності для відомих транспортно-логістичних комплексів в Україні;

визначити оптимальну кількість логістичних транспортно-митних комплексів та їх перероблювальну спроможність на основі мінімізації витрат на їх будівництво;

провести порівняльний аналіз результатів визначення оптимальної кількості ЛТМК за критеріями: факторно-рейтингового аналізу, мінімізації транспортної роботи та витрат на їх будівництво.

Матеріали, методи та результати дослідження. Успішність створення української мережі логістичних транспортно-митних комплексів в Україні напряму залежить від достовірності оцінки необхідних обсягів, а також визначення можливих джерел фінансування реалізації відповідних інфраструктурних проєктів. Для чого необхідно застосувати відповідні технологічні рішення країн, які досягли значних успіхів в розвитку власної транспортно-логістичної інфраструктури. Одним із найбільш ефективних та сучасних підходів інвестування в розбудову транспортно-логістичних мереж є досвід США, Канади, Європи та Китаю.

За даними Ради з логістичного менеджменту понад 70% найбільших корпорацій США користуються послугами спеціалізованих логістичних фірм. Компанії обирають єдиного логістичного оператора, якому можна було б довірити всю сукупність операцій з доставки певних видів вантажів. В аутсорсинговому логістичному бізнесі США, так само як і в інших країнах світу, діють дві основні групи транспортно-логістичних фірм: з власним парком транспортних засобів, підйомно-транспортного й іншого устаткування, а також складськими потужностями (asset – based) і посередницькі фірми (nonasset – based). Найбільшими спеціалізованими фірмами в галузі логістики є «UPS Supply Chain Solutions», «С. Н. Robinson Worldwide», «Menlo Worldwide», «Expeditors International of Washington Inc» і «Penske Logistics» [23].

Компанії, що належать до першої групи, основною діяльністю яких, як правило, є вантажні перевезення, часто надають логістичні послуги з високою доданою вартістю. Зокрема, підрозділ «Penske Corp.», що займається лізингом вантажівок, пропонує такі види сервісу, як менеджмент і складування, використовуючи власний парк з 200 тис. автомобілів. Ще одна причина, чому промислові і торговельні компанії США все частіше звертаються до послуг спеціалізованих логістичних фірм – зростаюча складність логістичних рішень в умовах застосування електронної техніки та Інтернету. Тому в США активно розвивається такий

ступінь розвитку логістичних послуг – це фірми-консультанти з питань логістики (або 4PL-оператори).

Таким чином в США інвестиції в національну мережу логістичних комплексів носять приватний характер. В США комплекси, спочатку, як правило створюються приватними компаніями, в першу чергу для власних потреб, проте державна політика щодо розвитку підприємництва та захисту великих національних платників податків на міждержавному рівні призводить до того, що логістична інфраструктура таких компаній стрімко розвивається і в подальшому здатна надавати універсальні логістичні послуги, в тому числі за державними потребами, як на території США, так і за їх межами [10, 23].

В транспортно-логістичній інфраструктурі Канади надання логістичних послуг здійснюється як традиційними транспортними, складськими й експедиторськими фірмами, так і аутсорсинговими компаніями. Витрати на логістику становлять близько 12% ВВП країни. Більшість логістичних операцій виконуються безпосередньо фірмами без участі логістичних посередників. Компанії користуються послугами спеціалізованих логістичних фірм в основному для виконання наступних логістичних операцій: внутрішні та міжнародні перевезення, експедирування та митна очистка вантажів. Виконання логістичних послуг в Канаді поділяється на такі три основних види [21]:

- 1) Asset-Based Transportation Services (ABTS) – лише перевезення вантажів;
- 2) Asset-Based Non-Transportation Services (ABNTS) – логістичні послуги, що пов'язані з матеріальними потоками;
- 3) Non-Asset Based Logistics Services (NABLS) – послуги посередників.

У складському господарстві Канади виділяються три основних види складів: приватні, загального користування (публічні) й контрактні. Компанії, що надають послуги публічних і контрактних складів, здійснюють також широкий діапазон суміжних операцій, включаючи страхування, оцінку збитків, підготовку товарно-транспортних документів, комплектацію вантажних партій, місцеві автоперевезення, розрахунки за товари.

Основними споживачами логістичних послуг у Канаді є компанії обробної промисловості, оптової й роздрібною торгівлі. Логістична інфраструктура Канади також є переважно приватною, при цьому вона тісно пов'язана з логістичними компаніями із США у зв'язку з чим її структура та функції добре кореспондуються із логістичною інфраструктурою США.

В Німеччині транспортно-логістичні комплекси формувалися переважно на основі наявних транспортних вузлів і залізничних ліній. Тому переважна більшість цих комплексів забезпечує умови ефективної взаємодії автомобільного і залізничного видів транспорту, є також трьох-модульні логістичні комплекси, які забезпечують взаємодію морського, автомобільного та залізничного видів транспорту [10].

Німецька модель будівництва логістичних комплексів характеризується такими особливостями: сильна державна підтримка на всіх рівнях; участь державного сектору ґрунтується на федеральних законах і законах федеральних земель; федеральний бюджет бере участь у фінансуванні інвестицій через «Deutsche Bahn AG» (Німецькі залізниці); широко практикується виділення дотацій бюджетам федеральних земель, цільових дотацій та кредитування по конкретним інвестиціям; фінансова підтримка інвестицій здійснюється як федеральними землями, так і місцевим самоврядуванням. У цій моделі чітко визначені джерела інвестиційних коштів: інвестори, які бажають зробити доступною інфраструктуру логістичних операторів; транспортні компанії; суб'єкти, що утворюють об'єднання з приватним капіталом; бюджетні кошти і цільові фонди федеральних земель; програми і федеральні фонди, спрямовані на розвиток інфраструктури; дотації міст та регіонів; дотації та програми ЄС. Інвестиційний капітал доповнюється банківським кредитом. Створені логістичні комплекси управляються через наглядові органи, які створюються різними компаніями – учасниками проекту: інвесторами та/або інвестиційними консорціумами; компаніями з розвитку; муніципалітетами міст та районів; асоціаціями та спілками. Державний сектор бере участь у розвитку логістичної

інфраструктури як на стадії планування, так і при реалізації інвестиційних проєктів побудови логістичних комплексів [10].

У КНР надання логістичних і фінансових послуг у зонах вільної торгівлі (Free Trade Zones) регулюється принциповими положеннями, що регламентують перелік діяльності, форму власності, відповідність певним умовам, наявність досвіду діяльності у сфері міжнародної торгівлі, міжнародних вантажних перевезень, обмежений термін дії та інше [10]. Такими положеннями визначено, що логістичні підприємства з іноземними інвестиціями можуть здійснювати послуги з перевезення вантажів, складського зберігання, навантажувально-розвантажувальних робіт, пакування, консолідації, комплектації, інформаційному супроводженню, а також послуги по оформленню зовнішньоторговельних договорів стосовно експорту зазначених вантажів. При цьому хоча б один з учасників – інвесторів спільного підприємства повинен мати позитивний досвід роботи в галузі міжнародної торгівлі, міжнародних вантажних перевезень, або практику як агента з таких перевезень. Діяльність по створенню спільних транспортно-логістичних комплексів з іноземними інвестиціями та запровадження логістичного сервісу (перевезення вантажів, створення інформаційно-обчислювальних мережевих систем управління перевезеннями) жорстко контролюється державою шляхом видачі дозволів. При цьому розширення сфери діяльності таких підприємств (розширення асортименту логістичних послуг) відбувається тільки відповідно до законодавчо затверджених програм.

Стосовно розбудови транспортно-логістичної інфраструктури України необхідно зазначити, що формування національної мережі ЛТМК є достатньо складною і багатоплановою проблемою, оскільки жодна транспортна компанія України, як самостійний господарський суб'єкт не в змозі забезпечити такий рівень будівництва. Тому для забезпечення належного рівня фінансування таких масштабних проєктів необхідно залучати як інвесторів та партнерів приватні транспортні компанії разом з використанням міжнародної допомоги та державних ресурсів, що позитивно вплине на процес створення та функціонування логістичної інфраструктури української транспортної системи.

Економічну доцільність створення української мережі ЛТМК оцінимо шляхом визначення їх оптимальної кількості при мінімальних загальних експлуатаційних витратах на всю мережу із визначеним обсягом переробки. Тоді оптимальна кількість ЛТМК буде визначатись умовою:

$$E^r_{zag} = E^r_b + E^r_{tr} \rightarrow \min E^r_{zag} = E^r_b + E^r_{tr} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де E^r_{zag} – загальні експлуатаційні витрати для розрахункової кількості ЛТМК;

E^r_b – сукупні витрати на будівництво визначеної кількості ЛТМК заданої потужності;

E^r_{tr} – сукупні витрати на перевезення заданих обсягів товарів для визначеної мережі ЛТМК;

r – розрахункова кількість ЛТМК (в даному випадку приймаються значення від 1 до 10).

Сукупні витрати на будівництво необхідної кількості ЛТМК на кожному етапі обчислюваного експерименту визначено як сукупність витрат на будівництво кожного ЛТМК:

$$E^r_b = E^r_{b1} + E^r_{b2} + \dots + E^r_{br} \quad E^r_b = E^r_{b1} + E^r_{b2} + \dots + E^r_{br}. \quad (2)$$

Сукупні витрати на забезпечення перевезення продукції на кожному рівні розрахунку визначаються так:

$$E^r_{tr} = T^r_{i_{загальна}} \times G \quad E^r_{tr} = T^r_{i_{zag}} \times G, \quad (3)$$

де $T^r_{i_{загальна}}$ $T^r_{i_{zag}}$ – загальна транспортна робота що виконується кожному рівні розрахунку;

G – середній тариф на перевезення 1 т вантажу на відстань 1 км (для перевезення продовольчих вантажів автотранспортом складає 0,1 дол. США за 1 т·км) [24].

З метою визначення витрат на будівництво кожного ЛТМК на основі емпіричних даних проведено аналіз середніх витрат на будівництво складських комплексів для обробки імпортованих продовольчих товарів в Україні залежно від обсягу такого комплексу. Результати аналізу наведено в табл. 1. При цьому відносна середня вартість будівництва ЛТМК для переробки 1 тис. тонн вантажу визначена за формулою:

$$P_{ser} = \frac{E_b^{em} \times 1000}{Q} P_{sr} = E_b^{em} / Q \times 1000, \quad (4)$$

де $P_{ser} P_{sr}$ – відносна середня вартість будівництва ЛТМК для переробки 1 тис. т вантажу;
 $E_b^{em} E_b^{em}$ – вартість будівництва ЛТМК встановленого об'єму за даними таблиці 1;
 Q – обсяг переробки вантажів у відповідному ЛТМК.

Таблиця 1. Вартість будівництва відомих транспортно-логістичних центрів для переробки продовольчих вантажів в Україні

Назва логістичного центру	Обсяги переробки вантажів (т)	Вартість будівництва (млн.\$)	Відносна середня вартість будівництва на 1 тис. т. (млн. \$)
Конті	12000	21	1,750
Nestle	13000	22	1,692
Скандинавія	20000	24	1,200
Скандинавія	22000	25	1,140
Ice-Terminal	25500	27	1,059
Roshen	45000	38	0,850
Nestle	48000	39	0,813

Наведені дані табл. 1 дозволяють встановити залежність відносної середньої вартості будівництва ЛТМК для переробки 1 тис. т вантажу від перероблювальної спроможності такого комплексу, яка з достатньою для практичних розрахунків точністю апроксимується степеневою функцією, рис. 1.

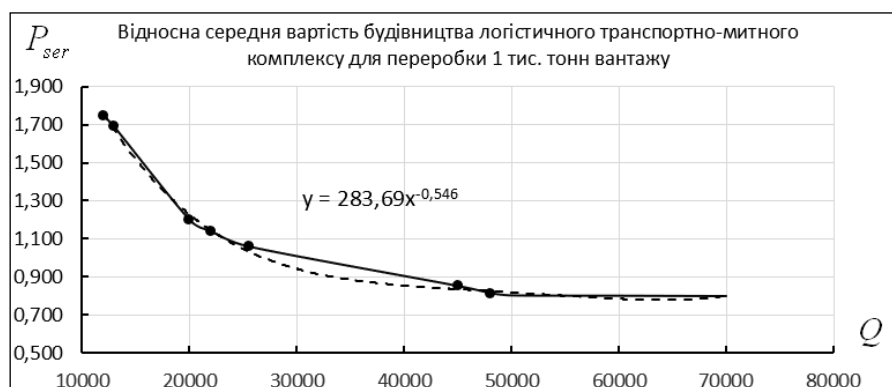


Рис. 1. Залежність середньої вартості будівництва від перероблювальної спроможності ЛТМК

Аналіз наведеної залежності вказує, що відносна середня вартість будівництва ЛТМК для переробки 1 тис. т зменшується зі збільшенням перероблювальної спроможності ЛТМК. Такий

результат є цілком закономірним, оскільки при будівництві ЛТМК існують постійні витрати які практично не залежать від перероблювальної спроможності, а саме: витрати на розробку проєктної документації, оформлення дозвільних документів, як перед початком будівництва, так і після його завершення, а також на облаштування засобами контролю, пожежної, охоронної сигналізації тощо. Крім того, при будівництві ЛТМК більшої потужності відносна середня вартість одиниці будівельних матеріалів та робіт є завжди меншою у зв'язку з великими обсягами замовлення.

За результатами проведених досліджень визначені оптимальні потужності ЛТМК для кожного рівня розрахунку їх чисельності та місць розташування [18]. Шляхом апроксимації визначається функція залежності середньої вартості будівництва ЛТМК для переробки 1 тис. т вантажу від потужності комплексу, рис. 1. Враховуючи визначені потужності логістичних транспортно-митних комплексів і використовуючи отриману залежність, розраховано витрати на будівництво кожного ЛТМК на відповідному рівні, а також сукупні витрати на будівництво необхідної кількості ЛТМК за формулою 2. Результати розрахунків сукупних витрат на будівництво E^r_b , сукупних витрат на забезпечення перевезення продукції E^r_{tr} та загальних експлуатаційних витрат E^r_{zag} в \$ млн. для кожного варіанта проведеного обчислюваного експерименту наведено на рис. 2.

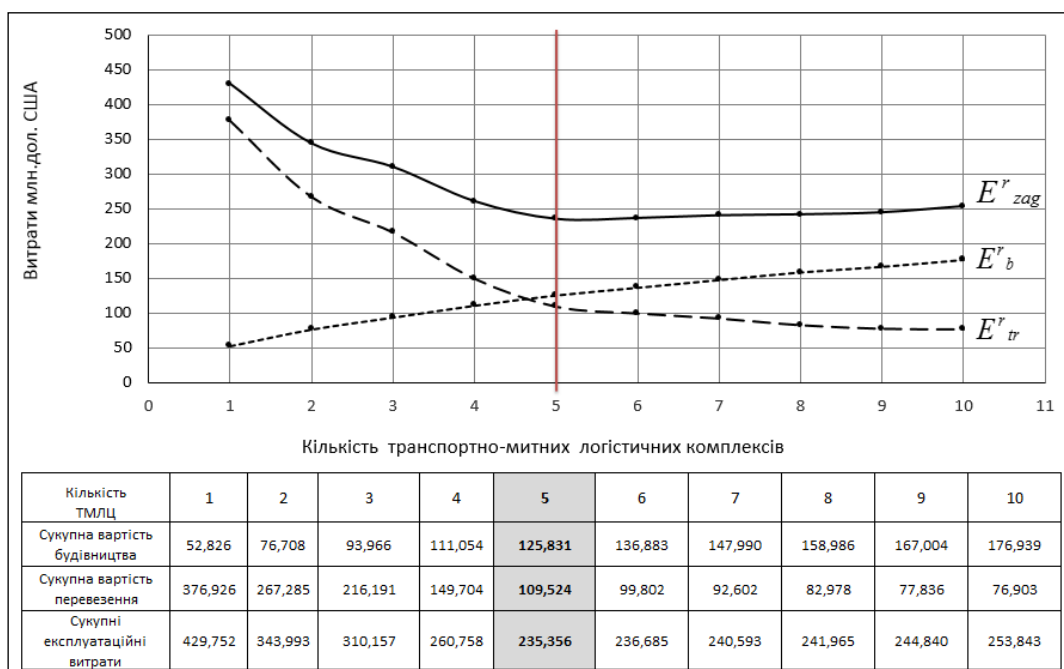


Рис. 2. Схема визначення оптимальної кількості ЛТМК на основі розрахунку сукупних експлуатаційних витрат

Аналіз отриманих результатів (рис. 2) свідчить що найменше значення загальних експлуатаційних витрат відповідає мережі з 5-ти ЛТМК логістичних транспортно-митних комплексів. Даний результат добре кореспондується зі значенням оптимальної кількості ЛТМК визначеної на основі факторно-рейтингової моделі з мінімізацією транспортних витрат на перевезення вантажів [18]:

$$E^r_{zag} = E^r_b + E^r_{tr} \rightarrow \min K_j = (k_{j1} q_{j1} + k_{j2} q_{j2} + \dots + k_{jp} q_{jp} + \dots + k_{jm} q_{jm}) / m, \quad (5)$$

$$E^r_{zag} = E^r_b + E^r_{tr} \rightarrow \min A_{i,zag} = \sum (A_{i,1} + A_{i,2} + \dots + A_{i,n}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де K_j – значення комплексного коефіцієнта факторно-рейтингової оптимізації для j -го населеного пункту;

q_{ip} – значення фактора для j -го населеного пункту;

p – кількість факторів, що розглядаються. $p = 1, 2, \dots, m$;

$q_{jp} = 1$ за наявності відповідного фактора;

$q_{jp} = 0$ за відсутності фактора;

k_{jp} – ваговий коефіцієнт, що дозволяє більш точно врахувати експертну оцінку впливу фактора p на значення комплексного коефіцієнта для i -го населеного пункту; $0 < k_{ip} \leq 1$;

$A_{i,j}$ – транспортна робота перевезення вантажів для j -го населеного пункту від i -го ЛТМК, яка розраховується за формулою:

$$E^r_{zag} = E^r_b + E^r_{tr} \rightarrow \min A_{i,j} = T_{ij} \cdot K_j = W_j \cdot L_{ij} \cdot K_j. \quad (7)$$

де T_{ij} – транспортна робота яка виконується під час доставки W_j тон вантажу з i -того ЛТМК в j -й населений пункт;

W_j – потреба обсягу імпортного вантажопотоку j -го населеного пункту;

L_{ij} – відстань між j -м населеним пунктом та i -м ЛТМК.

При проведенні розрахунків факторно-рейтингової оцінки обраних міст для розміщення ЛТМК за формулою (5) враховувано три групи факторів:

транспортні фактори;

економічні фактори;

адміністративні фактори.

Результати розрахунків за наведеним алгоритмом для варіантів мережі ЛТМК, що передбачає функціонування від 1 до 10 комплексів на всій території України наведено на рис. 3 [18].

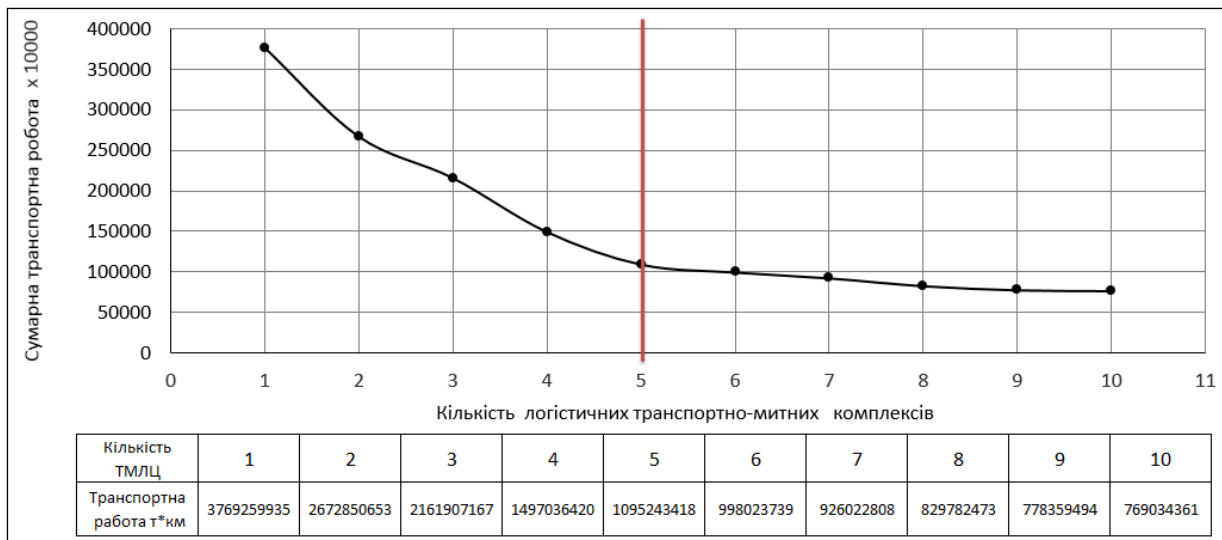


Рис. 3. Залежність обсягу сумарної транспортної роботи від кількості ЛТМК

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Наведені дані рис. 3 показують, що обсяг транспортної роботи ефективно зменшується у випадку створення від 1 до 5 ЛТМК. Подальше збільшення кількості ЛТМК не призводить до суттєвого зменшення сукупної транспортної роботи. Тобто, у випадку розглянутого вантажопотоку оптимальним є створення загальнодержавної транспортно-логістичної мережі у складі п'яти ЛТМК в містах Київ, Дніпро, Львів, Харків, Одеса (табл. 2). Крім того, аналіз співвідношення обслуговування вантажопотоку по комплексах свідчить, що для варіанта з 5 ЛТМК розподіл вантажопотоку є достатньо збалансованим (табл. 3), що також підтверджує висновок про оптимальність структури з 5-ти комплексів для розглянутого випадку.

Таблиця 2. Факторно-рейтингова оцінка для п'яти оптимальних населених пунктів

Населений пункт	Транспортні фактори					Економічні фактори					Адміністративні фактори			K_i
	ТФ ₁	ТФ ₂	ТФ ₃	ТФ ₄	ТФ ₅	ЕФ ₁	ЕФ ₂	ЕФ ₃	ЕФ ₄	ЕФ ₅	АФ ₁	АФ ₂	АФ ₂	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Дніпро	1	1	-	1	-	-	1	-	-	1	-	-	1	0,46
Київ	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	0,46
Львів	-	-	-	-	-	1	-	1	1	1	1	1	1	0,54
Одеса	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	0,69
Харків	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	0,62

Таблиця 3. Розподіл переробки вантажопотоку для п'яти ЛТМК

Місто	Перероблювальна спроможність ЛТМК, т.	Транспортна робота перевезень з ЛТМК, т·км	Частка обслуговування вантажопотоку, %
Дніпро	24269,22	3060025,5	27,94
Львів	18403,06	2692450,8	24,58
Київ	28758,34	2426756,5	22,16
Харків	16332,34	1627440,2	14,86
Одеса	12246,03	1145761,0	10,46
Всього	100008,99	10952434,0	100,00

Висновки. Аналіз результатів проведених розрахунків визначення оптимальних місць розміщення ЛТМК та необхідної їх кількості на основі факторно-рейтингового методу доводить, що застосування запропонованого підходу дозволяє:

1. Визначити оптимальну кількість та перероблювальну спроможність ЛТМК на основі критерію оптимізації витрат на їх будівництво із урахуванням заданого обсягу вантажопотоку.
2. Врахувати при вирішенні задач рівною мірою транспортні, економічні та адміністративні фактори, які впливають на розміщення елементів логістичної транспортно-митної інфраструктури, та допускає узагальнення для врахування більшої кількості факторів.
3. Застосування методу дозволяє сформувати бази даних визначених об'єктів логістичної транспортно-митної інфраструктури (місткість комплексів, зони обслуговування) та про обсяги переробки вантажів для прийняття управлінських рішень з модернізації та пріоритетних напрямів розвитку транспортної інфраструктури країни.
4. В подальшому доцільно провести дослідження факторно-рейтингової оптимізації структури та методів формування регіональних мереж транспортно-логістичної інфраструктури.

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують ефективність застосування факторно-рейтингового методу для вирішення задач оптимізації розміщення об'єктів ЛТМК та

можливість використання отриманих результатів для встановлення достатньої кількості таких об'єктів в процесі розбудови української мережі ЛТМК, а також вирішення більш широкого спектру задач пов'язаних з розвитком логістичної та транспортної інфраструктури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стратегія 2030: Drive Ukraine 2030. Створення нової реальності. URL: <https://mtu.gov.ua/files/projects/str.html#>.
2. Методологія формування логістичної транспортно-митної інфраструктури в Україні: монографія / А. М. Пасічник та ін. Дніпропетровськ, УМСФ. 2016. 168 с.
3. Кузьменко А. В. Досвід та закономірності формування світової транспортно-логістичної інфраструктури. // Науковий огляд, 2015. № 7 (17). С. 5 – 18.
4. Лукьянова Е. Н., Кривцун Д. Ю. Мировой опыт и перспективы развития транспортно-логистической системы Украины. // Економіка і суспільство. Мук. держ. ун-т, 2018. Вип. 8. С.166–172.
5. Пасічник А. М., Кутирев В. В. Світовий досвід створення транспортно-логістичної інфраструктури стан та перспективи застосування в Україні. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науковий зб. ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ. Горлівка, 2011. № 2(13). С. 121–128.
6. Кондратюк М. В. Використання досвіду Європейського Союзу у створенні транспортно-логістичних центрів в Україні // Вісник економіки, транспорту і промисловості. Проблеми транспортного комплексу України, 2014. № 47. С. 31–33.
7. Полякова О. М., Шраменко О. В. Сучасні тенденції розвитку транспортно-логістичної інфраструктури в Україні і світі. // Вісник економіки транспорту і промисловості, 2017. № 58. С. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v 0i58.110015>.
8. Dudorova T. Structure of logistic transportation customs complex. // MANAGEMENT, 2019, Issue 1 (29). P. 89–96. DOI: 10.30857/2415-3206.2019.1.7
9. Handbook of Best Practices at Border Crossings – A Trade and Transport Facilitation Perspective / Organization for Security and Cooperation in Europe (OSCE). 2012. 265 p.
10. Пасічник, А. М., Кутирев В. В., Мірошніченко С. В. Аналіз сучасних технологій реалізації систем управління транспортною інфраструктурою. // Вісник СХУ ім. В. Даля. С.: СХУ, 2018. №3(244). С. 89-98.
11. Pasichnyk A., Pasichnyk V. Analysis of the condition of transport-customs infrastructure and efficiency of the transit potential of Ukraine. // Promoting the European integration processes in the Eastern Partnership countries: national and regional policy instruments: monograph / NAS of Ukraine. SI “Institute of Regional Rsearch”; ed. by Kh. Prytula and I. Horga. Lviv, 2022. P.191–214.
12. Пасічник А. М., Лебідь І. Г. Кутирев В. В. Транспортно-логістична інфраструктура України: проблеми та перспективи розвитку. // Управління проектами, системний аналіз і логістика: Науковий журнал. К.: НТУ, 2012. В. 10. С. 192–198.
13. Тарнавська Н. П., Сивак Р. Б. Організаційні та інфраструктурні передумови створення міжнародного логістичного центру. // Бізнес-Інформ, 2013. № 13. С. 29–35.
14. Ткач О. В., Волощук І. А. Передумови та тенденції розвитку регіональних транспортно-логістичних центрів. // Вісник прикарпатського університету. Економіка, 2015. В. XI С. 19–25.
15. Ярошенко Л. Л. Міжнародний досвід розбудови транспортно-логістичних центрів, як спосіб розвитку транспортно-логістичної інфраструктури // Світове господарство і міжнародні економічні відносини, 2016. № 8. С. 201–204.
16. Pasichnyk A., Kytirev V. Customs restricted facilities within the logistics transport and Customs complex //Customs Scientific Journal, University of Customs and Finance of the World Customs Organization. D., Uk: 2017. Vol.7, N2. P. 31–53.
17. Pasichnyk A., Kytirev V., Vitryh I. Factors that influence the formation of the transport-logistics networks. // Systems and means of motor transport. Selected problems 2013. №4. P. 517–525.
18. Факторно-рейтинговый метод построения сети логистических транспортно-таможенных комплексов в Украине / А. Н. Пасечник и др. // Вестник Бел.-Рос. ун-та, 2020. № 1(66). С. 64–75.
19. Luzhanska, N. (2019) «Multicriteria Assessment of the Efficiency of Transport and Customs Infrastructure Facilities», Proceedings of the National Aviation University, 1(78), 70-76. Retrieved from <https://doi.org/10.18372/2306-1472.1.13658>
20. Luzhanska Nataliia, Kravchenya Iryna, & Lebid Iryna. (2021). METHODOLOGY FOR THE MULTI-CRITERIA EFFICIENCY ASSESSMENT OF CARGO CUSTOMS COMPLEXES. World Science, (1(62). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7405
21. Бауліна Г.С. Формування моделі функціонування транспортно-логістичного центру. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. 2013. В. 137. С. 95–99.
22. Mazurenko, A., Kudriashov, A., Lebid, I., Luzhanska, N., Kravchenya, I., & Pitsyk, M. (2021). Development of a simulation model of a cargo customs complex operation as a link of a logistic supply chain. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(3 (113), 19–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242915>

23. Paul S. Integral Logistics Management. Operations and Supply Chain management Within and Across Companies. Fourth ed. Auerbach Publications, 2011. 100 p.

24. Серая О. В., Бачкир Л. В. Комплексная методика расчета статистических характеристик стоимости транспортировок. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного ун-ту ім. М. Остроградського. 2009. Ч. 1. № 5(58). С. 40-43.

REFERENCES

1. Stratehiya 2030: Drive Ukraine 2030. Stvorenniya novoyi real'nosti [Creating a new reality]. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/files/projects/str.html#>. [in Ukrainian].

2. Pasichnyk A. M. et al. (2016). Metodolohiya formuvannya lohistychnoyi transportno-mytnoyi infrastruktury v Ukraini [Methodology of formation of logistics transport and customs infrastructure in Ukraine]: monohrafiya. Dnipropetrovs'k, UMSF [in Ukrainian].

3. Kuz'menko A. V. (2015). Dosvid ta zakonirnosti formuvannya svitovoyi transportno-lohistychnoyi infrastruktury [Experience and patterns of formation of the world transport and logistics infrastructure]. Naukovyy ohlyad – Scientific Review, № 7 (17), 5 – 18 [in Ukrainian].

4. Luk'yanova E. N., Kryvtsun D. YU. (2018). Myrovoyi opyt y perspektyvy razvytyya transportno-lohistycheskoyi systemy Ukrainy [World experience and prospects for the development of transport and logistics system of Ukraine]. Ekonomika i suspil'stvo – Economy and Society. Muk. state University, 8, 166–172 [in Russian].

5. Pasichnyk A. M., Kutyryev V. V. (2011). Svitovyy dosvid stvorenniya transportno-lohistychnoyi infrastruktury stan ta perspektyvy zastosuvannya v Ukraini [World experience of creating transport and logistics infrastructure status and prospects of application in Ukraine]. Visti Avtomobil'no-dorozhn'oho instytutu – News of the Automobile and Road Institute: naukovyy zb. DVNZ «DonNTU» ADI. Horlivka, 2(13), 121–128 [in Ukrainian].

6. Kondratyuk M. V. (2014). Vykorystannya dosvidu Yevropeys'koho Soyuzu u stvorenni transportno-lohistychnykh tsestriv v Ukraini [Using the experience of the European Union in the creation of transport and logistics centers in Ukraine]. Visnyk ekonomiky, transportu i promyslovosti. Problemy transportnoho kompleksu Ukrainy – Bulletin of Economics, Transport and Industry. Problems of the transport complex of Ukraine, 47, 31–33 [in Ukrainian].

7. Polyakova O. M., Shramenko O. V. (2017). Suchasni tendentsiyi rozvytku transportno-lohistychnoyi infrastruktury v Ukraini i sviti [Modern trends in the development of transport and logistics infrastructure in Ukraine and the world]. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti – Bulletin of Transport Economics and Industry, 58, 126–134. DOI: <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i58.110015>. [in Ukrainian].

8. Dudorova T. (2019). Structure of logistic transportation customs complex [Structure of logistic transportation customs complex] MANAGEMENT – MANAGEMENT, Issue 1 (29), 89–96. DOI: 10.30857/2415-3206.2019.1.7.

9. Handbook of Best Practices at Border Crossings – A Trade and Transport Facilitation Perspective / Organization for Security and Cooperation in Europe (OSCE). 2012.

10. Pasichnyk, A. M., Kutyryev V. V., Miroshnichenko S. V. (2018). Analiz suchasnykh tekhnolohiy realizatsiyi system upravlinnya transportnoyu infrastrukturoyu [Analysis of modern technologies for the implementation of transport infrastructure management systems]. Visnyk SNU im. V. Dahlia – Bulletin of the SNU. V. Dahl, 3(244), 89-98 [in Ukrainian].

11. Pasichnyk A., Pasichnyk V. (2022). Analysis of the condition of transport-customs infrastructure and efficiency of the transit potential of Ukraine // Promoting the European integration processes in the Eastern Partnership countries: national and regional policy instruments: monograph / NAS of Ukraine. SI “Institute of Regional Research”; ed. by Kh. Prytula and I. Horga. Lviv, 191–214.

12. Pasichnyk A. M., Lebid I. H., Kutyryev V. V. (2012). Transportno-lohistychna infrastruktura Ukrainy: problemy ta perspektyvy rozvytku [Transport and logistics infrastructure of Ukraine: problems and prospects of development]. Upravlinnya proektamy, systemnyy analiz i lohistyka – Project management, systems analysis and logistics, NTU, 10, 92–198 [in Ukrainian].

13. Tarnavs'ka N. P., Syvak R. B. (2013). Orhanizatsiyni ta infrastrukturni peredumovy stvorenniya mizhnarodnoho lohistychnoho tsentru [Organizational and infrastructural prerequisites for the creation of an international logistics center]. Biznes–Inform - Business-Inform, 13, 29–35 [in Ukrainian].

14. Tkach O. V., Voloshchuk I. A. (2015). Peredumovy ta tendentsiyi rozvytku rehional'nykh transportno-lohistychnykh tsestriv [Prerequisites and trends in the development of regional transport and logistics centers]. Visnyk prykarpat's'koho universytetu. Ekonomika – Visnyk of Prykarpattia University. Economics, XI, 19–25 [in Ukrainian].

15. Yaroshenko L. L. (2016). Mizhnarodnyy dosvid rozbudovy transportno-lohistychnykh tsestriv, yak sposib rozvytku transportno-lohistychnoyi infrastruktury [International experience in the development of transport and logistics centers as a way to develop transport and logistics infrastructure]. Svitove hospodarstvo i mizhnarodni ekonomichni vidnosyny – World Economy and International Economic Relations, 201–204 [in Ukrainian].

16. Pasichnyk A., Kytirev V. (2017). Customs restricted facilities within the logistics transport and Customs complex. Customs Scientific Journal, University of Customs and Finance of the World Customs Organization, 7(2), 31–53.

17. Pasichnyk A., Kytirev V., Vitryh I. (2013). Factors that influence the formation of the transport-logistics networks. Systems and means of motor transport. Selected problems, 4, 517–525.

18. Pasechnyk A.N. et al. (2020). Faktorno-reytnyovyy metod postroyeniya sety lohistycheskykh transportno-tamozhennykh kompleksov v Ukrainyе [Factor-rating method of building a network of logistics transport and customs complexes in Ukraine]. Vestnyk Bel.-Ros. un-ta – Vestnik Bel.-Rus. University, 1(66), 64–75 [in Russian].

19. Luzhanska, N. (2019) «Multicriteria Assessment of the Efficiency of Transport and Customs Infrastructure Facilities», Proceedings of the National Aviation University, 1(78), 70-76. Retrieved from <https://doi.org/10.18372/2306-1472.1.13658>

20. Luzhanska Nataliia, Kravchenya Iryna, & Lebid Iryna. (2021). METHODOLOGY FOR THE MULTI-CRITERIA EFFICIENCY ASSESSMENT OF CARGO CUSTOMS COMPLEXES. World Science, (1(62). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7405

21. Baulina H.S. (2013). Formuvannya modeli funktsionuvannya transportno-lohistychnoho tsentru [Formation of the model of functioning of the transport and logistics center]. Zbirnyk naukovykh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT, 137, 95–99 [in Ukrainian].

22. Mazurenko, A., Kudriashov, A., Lebid, I., Luzhanska, N., Kravchenya, I., & Pitsyk, M. (2021). Development of a simulation model of a cargo customs complex operation as a link of a logistic supply chain. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(3 (113), 19–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242915>

23. Paul S. (2011). Integral Logistics Management. Operations and Supply Chain management Within and Across Companies. Fourth ed. Auerbach Publications.

24. Seraya O. V., Bachkyr L. V. (2009). Kompleksnaya metodyka rascheta statystycheskykh kharakterystyk stoymosty transportyrovok [Complex method of calculating statistical characteristics of the cost of transportation]. Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnogo politekhnichnogo un-tu im. M. Ostrohrads'koho – Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University. M. Ostrogradsky, 1, 5(58), 40-43 [in Russian].

Anatoliy Pasichnyk¹, Irina Lebid², Yevgenii Kushchenko³

¹ Professor, Head of Analytical and Research Center Dnipro Branch of the International Academy of Computer Science and Systems, Dnipro, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8561-1374>.

² Associate Professor, Department of International Transportation and Customs Control, National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, 01010, Kyiv, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0707-4179>

³ Engineer, Transport and Technical Department, JSC "Odessa Port Plant", st. Zavodska, 3, 65481, Yuzhne, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9145-5390>

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF BUILDING A NETWORK OF TRANSPORT AND LOGISTICS COMPLEXES BASED ON THE FACTOR-RATING MODEL

The article presents the results of the analysis of the effectiveness of the factor-rating method of solving the problem of finding the optimal location of elements of the logistics transport and customs infrastructure of Ukraine with the minimization of transport work on cargo transportation. A sufficient and economically justified number of logistics transport and customs complexes for processing the imported cargo flow of a given volume has been determined.

The study uses methods of systematic and factor analysis of the calculated parameters of cargo processing, taking into account transport, economic and administrative factors of territorial development. It is established that the known methods developed to determine the location of individual transport and logistics centers do not allow to optimize the relevant logistics infrastructure focused on the processing of freight traffic in the transport system of the country.

To build an effective solution to the problem of optimal location of several logistics transport and customs complexes, a method for determining the factor-rating potential of urban efficiency for their location in Ukraine, taking into account transport, economic and administrative factors. An assessment of transport work was conducted for 165 settlements of Ukraine, which include cities with a population of more than 30,000 people, as well as settlements with established customs posts or cargo checkpoints across the customs border of Ukraine. For each city, the relative consumption of imported foodstuffs is taken into account.

According to the above algorithm, calculations were performed for options that provide for the operation of one to ten logistics transport and customs complexes throughout Ukraine. The analysis of

the results of the calculations shows that the volume of transport work is effectively reduced in the case of the creation of 1 to 5 transport and customs logistics complexes. Further increase in the number of logistics transport and customs complexes, and consequently capital investments, does not lead to a significant reduction in total transport work. Accordingly, the factor-rating potential for cities in the zone where the creation of logistics transport and customs complexes is the most rational and has the following values: Dnipro – 0.46; Kyiv – 0.46; Lviv – 0.54; Odesa – 0.69; Kharkiv – 0.62.

The results of the evaluation of the effectiveness of the optimal location of logistics transport and customs complexes can be implemented in the Ukrainian transport system in the construction of logistics infrastructure for the processing of cargo flows of sufficiently large volumes.

Keywords: *transport and logistics infrastructure, transport and customs complexes, factor-rating method, logistics.*

УДК 656.614.3

Олексій Болгов^{1*}

¹Аспірант, Кафедра Судноводіння, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0339-5533>.

* Автор, відповідальний за листування: bolgov_a@ukr.net

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОРЕХІДНОГО СТАНУ НАВАЛЮВАЛЬНОГО СУДНА НА ЕТАПІ ПРОВЕДЕННЯ ВАНТАЖНИХ ОПЕРАЦІЙ

Проведення вантажних операцій навалювальних суден (балкерів) є відповідальним етапом у процесі їх експлуатації, оскільки визначає рівень їх безпеки на майбутньому переході. Для балкерів висувуються підвищені вимоги щодо розміщення вантажу та баласту з безперервним контролем їхньої остійності та міцності. Побудова вантажного плану судна покладається на вантажного помічника капітана, який користується судновою документацією та спеціалізованими комп'ютерними засобами наданими суднобудівником. Зазвичай ці інструменти розраховані на обмежену кількість стандартних варіантів завантаження судна, та не враховують багато факторів, які можуть виникати у дійсності. Робота по складанню вантажного плану судна стає процесом, який займає багато часу та не завжди гарантує ефективність і безпеку судна на кожному з його етапів. Тому пошук інструментів для проведення вантажних операцій балкерів з постійним забезпеченням усіх морехідних якостей судна на безпечному рівні залишається актуальним.

У статті запропоновано загальний підхід до формування множини допустимих завантажень навалювальних суден з урахуванням обмежень які накладаються вимогами міжнародних конвенцій до безперервного збереження їх морехідного стану.

Ключові слова: морехідні якості судна, навалювальне судно, вантажні операції, посадка судна, остійність судна, міцність судна, оптимізація, вантажний план судна.

Вступ. Морехідний стан судна включає відповідність параметрів його остійності, посадки і міцності допустимим межах, що забезпечуються в процесі експлуатації коректним завантаженням судна. Вимоги щодо остійності, посадки та міцності судна є універсальними для всіх типів суден і закріплені кодексами Міжнародної Морської Організації (ММО) та документами судноплавних Регістрів окремих країн. Проведення вантажних операцій навалювальних суден (балкерів) є відповідальним етапом у процесі їх експлуатації, оскільки визначає рівень безпеки судна на майбутньому переході. Для балкерів висувуються підвищені вимоги щодо таких операцій з безперервним контролем їхньої остійності, поздовжньої та місцевої міцності. Існуючі на таких суднах інструменти для планування вантажних операцій не охоплюють усі можливі сценарії їх проведення. В умовах обмеженого часу проведення портових операцій, це може призводити до неефективного планування вантажно-розвантажувальних робіт судна з наступною тимчасовою або частковою втратою його морехідних якостей.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питанням експлуатації сучасних балкерів присвячено роботи [1, 2, 3].

Проблемам побудови вантажного плану та проведення портових операцій навалювальних суден присвячені роботи [4, 5, 6].

Міжнародною морською організацією було прийнято низку конвенцій, у яких закріплені вимоги до проведення вантажних операцій морських суден [7, 8, 9, 10, 11].

Загальні принципи оптимізації вантажних операцій навалювальних суден розглянуті у статтях [12, 13].

Математичні моделі вантажних операцій навалювальних і універсальних суден, а також використання методів лінійного програмування для вирішення задач оптимізації були розглянуті у роботах [14, 15].

Постановка задачі формалізації завантаження навалювального судна розглянута у статті [16].

Міжнародна морська конвенція СОЛАС вимагає від персоналу суден планувати та проводити вантажні операції таким чином, щоб судно відповідало усім морехідним критеріям у будь-який момент цих операцій і було готово до виходу в море на будь-якому їх етапі.

На навалювальних суднах існують інструкції щодо коректних варіантів їх завантажень (Loading manual), або спеціальні вантажні програми, які дозволяють оцінити параметри морехідного стану судна за вибраним варіантом його завантаження. Завдання вантажного помічника капітана полягає у визначенні варіанта завантаження, що відповідає допустимим параметрам остійності, посадки та міцності судна. Це завдання частково реалізовано в документації щодо типових завантажень судна, які охоплюють далеко не всі можливі ситуації завантажень, можливу номенклатуру вантажів та особливості майбутнього рейсу судна. Таким чином, пошук оптимального вантажного плану може вимагати значних зусиль відповідального персоналу.

Використання сучасної обчислювальної техніки дозволяє розрахувати допустимі завантаження судна з урахуванням обмежень за критеріями морехідності, за умови, що процес завантаження судна формалізовано та розроблено алгоритми та програми його завантаження.

Пошук методів оптимізації проведення вантажних операцій балкерів залишається актуальним. Основними етапами такого пошуку будуть коректне формулювання системи обмежень, що накладаються забезпеченням необхідних морехідних якостей судна та іншими факторами, постановка оптимізаційної задачі та вибір математичних методів для її вирішення.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є формулювання системи обмежень, які накладаються забезпеченням морехідних якостей судна та аналіз можливостей визначення допустимих варіантів завантажень судна, що задовольняють цим обмеженням.

Матеріали та методи дослідження. При загальних вимогах забезпечення морехідних якостей різні типи морських суден мають додаткові вимоги, пов'язані з особливостями їхньої конструкції або технології перевезення вантажів.

Так, для універсальних суден при завантаженні генеральних вантажів висувається ряд специфічних вимог, до яких належать, перш за все, необхідність урахування сумісності вантажів, що знаходяться в одному вантажному приміщенні, велика кількість партій вантажу, що приймаються до перевезення, послідовність портів вивантаження партій вантажу, необхідність обмеження кількості ярусів вантажу залежно від міцності тари вантажного місця.

У свою чергу, до навалювальних суден через їх значну довжину виставляються підвищені вимоги щодо забезпечення допустимих навантажень, значення яких лімітуються загальною поздовжньою та місцевою міцністю корпусу судна, що визначає ряд особливостей вантажних операцій цих суден. Насамперед, вантажні та баластні операції балкерів здійснюються одночасно. Причому, залежно від кількості трюмів судна, що одночасно обробляються, та питомого вантажного обсягу вантажу, вантажні та баластні операції проводяться в кілька етапів (до двадцяти).

На навалювальних суднах зазвичай існує інструкція щодо їх стандартних завантажень, яка надається будівником судна, структура якої залежить від питомого вантажного обсягу вантажу і кількості трюмів, що одночасно обробляються. Примітно, що до завантаження в таких

інструкціях пропонується лише один тип вантажу. Для кожного стандартного варіанта проведення вантажних операцій в інструкції наводиться послідовність етапів завантаження судна, кожен з яких характеризується набором трюмів, що завантажуються, і приростами вантажу в них, а також комбінацією танків, задіяних в баластних операціях. По завершенні кожного з етапів судно повинно перебувати у допустимому мореходному стані.

У ситуації нестандартних завантажень навалювальних суден, не охоплених інструкцією суднобудівника, виникають складнощі з плануванням та проведенням вантажних операцій із забезпеченням належного морехідного стану судна, ефективним використанням його вантажомісткості та вантажопідйомності. У цьому випадку виникає проблема у проведенні вантажних операцій, яку судноводій змушений вирішувати самостійно, розробляючи перелік послідовних етапів, на кожному з яких вирішується завдання щодо розміщення максимально можливої кількості вантажу у трюмах з урахуванням одночасної обробки необхідної групи баластних танків. При цьому має виконуватися низка обмежень щодо забезпечення морехідних якостей судна.

Отже, обмеження, що накладаються на різні варіанти завантаження судна, і що визначають множину допустимих завантажень, можна поділити на кілька груп.

До першої групи можна віднести загальні для всіх типів суден обмеження щодо посадки судна, а до другої групи – обмеження з його остійності.

Розглянемо першу групу обмежень, що забезпечує морехідний стан судна. До них належать, передусім, обмеження щодо посадки судна, тобто, середня допустима осадка судна T_{cp} і допустимі межі його диференту d . Зазвичай до цієї групи відносять ще і крен судна k . На практиці судовий персонал намагається не допускати значний крен судна протягом вантажних операцій, тому ми можемо не вводити окремих обмежень по крену судна.

Середня допустима осадка судна T_{cp} обмежується вимогами міжнародної конвенції про вантажну марку [10], документацією суднобудівника, рейсових навігаційних обмежень осадки судна, а також критерієм мінімальних осадок носом та кормою для недопущення слемінгу чи оголення гвинта.

Таким чином виникає обмеження по T_{cp} :

$$T_{min} \leq T_{cp} \leq T_{max} \quad (1)$$

де T_{min} та T_{max} – відповідно нижня та верхня межі середньої осадки судна T_{cp} .

Мінімальне граничне значення диферента d_{min} можна прийняти рівним нулю, оскільки зазвичай не допускається диферент на ніс судна, що пов'язане з труднощами проведення баластних операцій та розрахунком кількості вантажу на судні. Максимальне значення диференту d_{max} регулюється наявними на судні таблицями заміру баласта та інших рідин, обмеженнями в роботі судового обладнання, критерієм хідкості судна. Обмеження щодо диференту d :

$$d \in [0, d_{max}] \quad (2)$$

Обмеження, що забезпечують необхідну остійність судна віднесемо до другої групи. Вони виражені, насамперед, обмеженням, накладеним на початкову метацентричну висоту h :

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (3)$$

де h_{min} та h_{max} – відповідно нижня та верхня межі початкової метацентричної висоти h .

Мінімальне значення метацентричної висоти h_{min} лімітується вимогами ММО до початкової остійності суден, а саме міжнародним кодексом остійності непошкодженого судна, а також кодексом безпечного перевезення зерна насипом, для навалювальних суден, що перевозять зернові вантажі і становлять відповідно 0,15 та 0,30 м.

Верхня межа початкової метацентричної висоти h_{max} не лімітується вимогами ММО, але може встановлюватися судноплавними компаніями для власних суден.

Такі параметри остійності судна, як перекидаючий момент $M_{пер}$, максимальне плече діаграми статичної остійності l_{max} , кут крену судна на який припадає максимальне плече θ_{max} , та кут заходу діаграми $\theta_{зах}$ знаходяться за допомогою діаграми статичної остійності, а їх величини лімітуються нормативними вимогами кодексів ММО та Регістрами судноплавства окремих країн до початкової остійності суден.

Так, згідно з цими вимогами, максимальне плече діаграми статичної остійності l_{max} має бути не менше 0,20 м для суден завдовжки 105 м при куті крену більшому ніж 30° .

Кут крену θ_{max} при якому плече діаграми статичної остійності досягає максимуму, повинен бути не менше 30° .

Кут заходу діаграми статичної остійності $\theta_{зах}$ повинен бути не менше 60° .

Відношення перекидального моменту $M_{пер}$ до накреньального моменту $M_{кр}$ (критерій погоди) повинен бути більше або дорівнювати 1 [17].

Третя група параметрів характеризує загальну поздовжню міцність судна і виражається гранично допустимим значенням згинальних моментів BM_i і перерізуючих сил SF_i для i -го контрольного перерізу судна. Максимально допустимі значення згинального моменту і перерізуючої сили для кожного контрольованого перерізу є постійними і наводяться у судовій документації з вантажних операцій.

До цієї ж групи можна віднести і місцеву міцність P_i , яка характеризується відношенням ваги прийнятого вантажу до площі вантажного приміщення, в якому вантаж знаходиться. У судовій документації вказані допустимі навантаження на квадратний метр площі вантажних приміщень та верхньої палуби.

Всі параметри, що лімітуються і характеризують морехідний стан судна $T_{сп}$, d , h , $M_{пер}$, l_{max} , θ_{max} , $\theta_{зах}$, BM_i , SF_i та P_i , є функціями водотоннажності судна D та його повздовжнього M_x та вертикального M_z статичних моментів. Причому з моментом M_x пов'язані диферент d , згинальні моменти BM_i та перерізуючі сили SF_i , а з моментом M_z – початкова метацентрична висота h та характеристики діаграми статичної остійності $M_{пер}$, l_{max} , u_{max} , $u_{зах}$. Отже, виходячи з граничних значень d_{max} , h_{min} , h_{max} , $M_{пер}$, l_{max} , θ_{max} , $\theta_{зах}$, BM_i , SF_i та P_i які висувають вимогу до забезпечення морехідного стану судна, можна знайти граничні значення водотоннажності судна D_{max} , граничні значення M_x^{min} та M_x^{max} його повздовжнього моменту, а також верхню M_z^{max} та нижню M_z^{min} границі вертикального моменту.

Якщо позначити через D' , M'_x , M'_z відповідно водотоннажність та статичні моменти, що виникають при деякому обраному варіанті завантаження судна, то очевидно всі ті завантаження, для яких справедливі такі обмеження:

$$D' \leq D_{max},$$

$$M'_x \in [M_x^{min}, M_x^{max}], \quad (4)$$

$$M'_z \in [M_z^{min}, M_z^{max}]$$

належать до множини K допустимих завантажень за вимогами забезпечення необхідних морехідних якостей судна. Для конкретного типу судна потрібно враховувати додаткові специфічні обмеження, які можуть унеможливити частину завантажень серед допустимої множини варіантів K . Так, наприклад, для балкерів, які перевозять зернові вантажі, додатковою групою обмежень будуть вимоги Міжнародного кодексу з безпечного перевезення зерна насипом, одним з яких є кут крену від зміщення зерна [11].

З позиції забезпечення морехідних якостей судна, протягом завантаження судна необхідно орієнтуватися не на кінцевий морехідний стан судна $D'(t_k)$, а на кожен поточний його стан $D'(t)$, з початку навантаження і до його завершення, тобто має виконуватися система обмежень:

$$\begin{aligned} D'(t) &\leq D_{max}, \\ M'_x(t) &\in [M_x^{min}, M_x^{max}], \\ M'_z(t) &\in [M_z^{min}, M_z^{max}], \\ t &\in [0, t_k], \end{aligned} \quad (5)$$

де t_k – момент закінчення вантажних операцій судна.

Додатковими «виробничими» обмеженнями для навалювальних суден можуть бути:

- кількість встановлених етапів вантажних операцій у порту;
- кількість наявних вантажних засобів в порту та їх потужність;
- забезпечення нерозривності коносаментних партій;
- розміщення вантажу у трюмах з урахуванням ротації портів завантаження-розвантаження;
- кількість вантажу до розміщення в кожному з трюмів судна;
- кількість баласту для кожного з танків, та швидкість виконання баластних операцій;

Перераховані обмеження мають відношення до формування оптимізаційної задачі разом з обмеженнями, що забезпечують морехідний стан судна.

Оптимізаційна задача може бути сформульована таким чином. Обмеженнями виступають вимоги до посадки, остійності, часу проведення вантажних операцій, ряд виробничих параметрів які залежать від специфіки самого судна та порту, а в якості критерію оптимальності вибираються параметри загальної поздовжньої міцності, які слід мінімізувати у процесі вантажних операцій.

Висновки. У статті автором висвітлено проблему недосконалості існуючих інструментів з планування вантажних операцій навалювальних суден та акцентовано необхідність створення нових універсальних методів створення вантажного плану судна. Запропонований загальний підхід до формування безлічі допустимих завантажень навалювального судна створює передумови для постановки задачі щодо вибору оптимальної стратегії проведення вантажних операцій за критерієм безперервного дотримання необхідних значень морехідних якостей судна. Сформульована система обмежень, які накладаються параметрами морехідного стану судна, та наведена низка виробничих параметрів, які характеризують взаємодію судна з портом. Вантажні операції навалювальних суден повинні на всьому їх протязі забезпечувати допустимі значення посадки судна, його остійності, загальної поздовжньої та місцевої міцності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Топалов В. П., Торський В.Г., Березовський П. Е. Обеспечение безопасной эксплуатации балкеров. Одесса: Астропринт, 2001. 185 с.

2. Capt. Jack Isbester. Bulk carrier practice. Second edition. Nautical Institute. 202 Lambert Road, London, 2010. P. 28 – 44.
3. David J Eyres, G. J. Bruce. Ship Construction. 7th Edition. Butterworth-Heinemann. Oxford. 2012. P. 102 - 111.
4. Павленко Л. В., Козырь Л. А. Особенности эксплуатации балкеров. Одесса: Ластар, 2012. С. 12-18.
5. Снопков В. И. Технология перевозки грузов морем. Санкт-Петербург: АНО НПО. 2011. С. 21 - 32.
6. Перси Х.Дж. Остойчивость морского судна (Метрическая система). Санкт-Петербург: ООО «МОРСАР», 2007. С. 97 - 102.
7. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) – Consolidated Edition, 2014. IMO. London. 2014. P. 243.
8. BLU Code: Code of practice for the safe loading and unloading of bulk carriers. IMO. London. 2002. P. 115.
9. The International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC), 2018 Edition. IMO. London. 2018. P. 74.
10. Load Lines – 2005 Consolidated Edition, 3-rd Edition. IMO. Publisher: Polestar Wheatons Ltd, 2016. P. 103.
11. The International Code for the Safe Carriage of Grain in Bulk, 2-nd Edition. IMO. London. 2004. P. 88.
12. Цымбал Н.Н., Васков Ю.Ю. Формирование оптимизационной задачи проведения грузовых операций навалочных судов. Судовождение: Сборник научных трудов ОНМА, Вып. 7. Одесса: 2004. С. 3-10.
13. Егоров Г.В. Метод оптимизации загрузки и балластировки судов. Судовождение: Сборник научных трудов ОНМА, Вып.6. Одесса: 2003. С. 48-59.
14. М. Ю.Соколов. Методы оптимизации загрузки судов. Судовождение: Сборник научных трудов ОНМА, Вып.19. Одесса: 2011. С. 221-225.
15. М. Ю.Соколов. Общий вид зависимостей параметров посадки, остойчивости и прочности судна от исходных данных. Судовождение: Сборник научных трудов ОНМА, Вып.16. Одесса: 2009. С. 199-204.
16. Болгов О.С., Тихонов И.В. Метод аналитического опису вантажних операцій наваловального судна з метою оптимізації їх проведення за критерієм морехідної безпеки судна. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 35. Київ. 2020. С. 194-202.
17. Правила реєстру судноплавства України. Правила класифікації та побудови суден. Київ. 2020. С. 24-25.

REFERENCES

1. Topalov V. P., Torskiy V. G., Berezovskiy P. E. (2001). Obespechenie bezopasnoi expluatatsiyi balkerov [Ensuring the safe operation of bulk carriers]. Odessa, Astroprint, (in Russian).
2. Capt. Jack Isbester. (2010). Bulk carrier practice. Second edition. Nautical Institute, London. (in English).
3. David J Eyres, G. J. Bruce. (2012). Ship Construction. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford. (in English).
4. Pavlenko L. V., Kozyr L. A. (2012). Osobennosti ekspluatatsii balkerov. [Features of the operation of bulk carriers]. Odessa. Laster. (in Russian).
5. Snopkov V.I. (2011). Tehnologii perevozki gruzov morem. balkerov [Technology of cargo transportation by sea.]. St-Petersburg. ANO NPO. (in Russian).
6. H. J. Pursey. (2007). Ostoychivost morskogo sudna (Metriceskaya sistema) [Merchant ship stability (Metric edition)]. S-Petersburg, MORSAR. (in Russian).
7. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Consolidated Edition. 2014, IMO, London, 2014. (in English).
8. BLU Code: Code of practice for the safe loading and unloading of bulk carriers. IMO. London, 1998. (in English).
9. The International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC). 2018 Edition. IMO, London, 2018. (in English).
10. Load Lines. 2005 Consolidated Edition, 3-rd Edition. IMO. London, 2016. (in English).
11. The International Code for the Safe Carriage of Grain in Bulk, 2-nd Edition. IMO. London. 2004. (in English).
12. Tsybmal N. N., & Vaskov Y. Y. (2004). Formirovanie optimizatsionnoy zadachi provedeniya gruzovih operatsiy navalochnyh sudov [Formation of the optimization task of carrying out the loading operations of bulk carriers]. Sbornik nauchnih trudov “Sudovozdenie” [Research journal “Shipping and Navigation”] 7, Odessa, ONMA, 3-10. (in Russian).
13. Egorov G. V. (2003). Metody optimizatsii zagruzki i ballastirovki sudov. Sbornik nauchnih trudov “Sudovozdenie” [Research journal “Shipping and Navigation”], 6, Odessa, ONMA, 48-59. (in Russian).
14. Sokolov M. U. (2011). Metody optimizatsii zagruzki sudov. [Ship loading and ballast optimization method]. Sbornik nauchnih trudov. “Sudovozdenie” [Research journal “Shipping and Navigation”], 19, Odessa, ONMA, 221-225. (in Russian).
15. Sokolov M. U. (2009). Obshiy vid zavisimostey parametrov posadki, ostoychivosti i prochnosti sudna ot ishodnih dannih [General view of the dependences of landing parameters, stability and strength of the vessel on the initial data]. Sbornik nauchnih trudov “Sudovozdenie” [Research journal “Shipping and Navigation”], 16, Odessa, ONMA, 199-204. (in Russian).
16. Bolgov O. S., & Tyhonov I. V. (2020). Metod analitichnogo opisu vantagnih operatsiy navalovalnogo sudna z metoyu optimizatsii yh provedennya za kriteriem morehidnoi bezpki sudna. [The method of analytical description of the cargo operations of a bulk carrier with the method of optimization of them carried out according to the criterion of seaworthy safety of the vessel]. Zbirnyk naukovih pratz DUIT “Transportni sistemi i tehnologii, 35, Kiyv, DUIT, 194-202. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-19>.
17. Pravila registru sudnolavstva Ukrainy. Pravila klasifikatsii ta sporudnennya suden. Kiev. 2007. (in Ukrainian).

*Oleksiy Bolgov*¹

¹ Graduate student, Navigational Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0339-5533>

ENSURING THE SEAWORTHINESS OF A BULK VESSEL AT THE STAGE OF CARGO OPERATIONS

The seaworthiness includes the conformity of the parameters of the vessel's stability and strength to the permissible limits, which is provided during the port loading and discharging operations. Requirements concerning the ship's stability and strength are universal for all types of vessels and are postulated in the International Maritime Organization (IMO) codes and documents of the shipping registers of different countries. The cargo operations of bulk carriers are responsible moment, as it determines the level of their seaworthiness and maritime safety at the sea voyage. For bulkers raised strict requirements in regard of cargo distribution and ballast operations with continuous control of their stability and strength. The search of methods for optimal performing cargo operations of the bulk vessels with assurance of all seaworthy parameters at the safe level remains actual.

The bulk carriers usually have instructions for their standard loading options provided by the ship's builder, the character of which depends on the specific cargo volume and the number of holds processed at the same time. For each standard variant of cargo operations, the instructions provide a sequence of stages of loading the vessel. At the end of each stage, the vessel must be in acceptable seaworthy condition. In the situation of non-standard loading of bulk carriers, which are not covered by the shipbuilder's instructions, there are difficulties with planning and conducting cargo operations to ensure proper seaworthiness of the vessel, efficient use of its carrying capacity. Ship personnel must independently deal with the distribution of cargo, sorting through various loading options, which is not always efficient and time consuming. At the same time, a number of restrictions on the seaworthiness of the vessel must be met.

The purpose of this article is to analyze the possibilities of determining acceptable variants of loading of the bulk vessel, which satisfy the limitations imposed by parameters of the seaworthiness and marine safety. The limitations imposed by the requirements of continuous vessel's seaworthiness were considered and divided into groups with a view to creating an optimization task. The general approach to formation of a number of permissible loading of the bulk vessel, proposed in the article, creates preconditions for setting the task of choosing the optimal strategy of carrying out cargo operations on the criteria of continuous observance of seaworthy characteristics of the vessel.

Keywords: *Seaworthiness, bulk carrier, cargo operations, the vessel seating, the vessel stability, the vessel strength, optimization, vessel's loading plan.*

Oleksandr Ohar¹, Hanna Shelekhana^{2*}, Oksana Pestremenko-Skripka³, Pylyp Zveriev⁴

¹Department of Railway Stations and Units, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feyerbakh sq., Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1967-5828>

²Department of Railway Stations and Units, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feyerbakh sq., Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6640-6084>

³Department of Railway Stations and Units, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feyerbakh sq., Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5335-5399>

⁴Faculty of "Transportation Process Management, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feyerbakh sq., Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7137-0215>

*Corresponding author: shelekhana@kart.edu.ua

WAYS TO RESTORE NATIONAL TRANSPORT AND LOGISTICS ACTIVITIES IN THE POSTWAR PERIOD

The article is devoted to the issue of finding effective ways to restore the sector of transport and logistics activities of the country in the postwar period, which is currently relevant for Ukraine. The state of international transportation during the war is analyzed. It is established that the process of restoration of the transport and logistics sector in the country is already underway and consists of a number of measures in the field of customs, logistics and transports. The experience of restoring the transport sector in European countries as part of the national critical infrastructure is considered. It is determined that one of the main conditions for effective economic recovery is international support. The key programs, diplomatic and legal documents that formed the basis for the creation of international support for Ukraine in economic recovery in general and the transport sector in particular are considered. The basic directions in which the action of the specified support for transport and logistics activity is directed are established.

Keywords: *transport and logistics activities, postwar period, international support, critical infrastructure*

Introduction. In the 22 years of the 21st century, there have been more than 60 wars, military conflicts, uprisings and coups (more than 10 in Europe) that have caused varying degrees of damage to infrastructure, economic, energy and industrial failures. In the post-war reconstruction of these industries, one of the most important conditions is the quality of the transport component. It is the well-adjusted transport and logistics activities of the country that determine not only the direct restoration of the national economy, but also the preservation and further development of international relations, which are of key importance for modern economies of developed countries.

Therefore, the issue of rebuilding the domestic transport infrastructure, adapting the transportation process to military and post-war conditions of operation, restoration and increase of transportation is currently an urgent problem, the solution of which is based on returning to the prewar level of national economy and its further development.

Analysis of recent research and problem statement. The issue of restoring the transport component of the economy in the postwar period, including logistics and warehousing, is the subject of research by many Ukrainian and foreign scientists. Among them should be noted works of general

methodological nature, as well as works of economic, political nature, combining theoretical and applied aspects and highlighting foreign experience.

Political publication [1] about Russia's invasion of Ukraine was based on false premises, faulty assumptions, and a weak strategy. With the development of the conflict, heavy losses have led to an increase in the workload of the attacker. Existential warfare using scattered light infantry tactics with a high level of motivation shows military and political leaders how the political context continues to impose restrictions on the people and the economic condition of the state.

The article [2] predicts changes in global and regional incidences of armed conflict for the 2010–2050 period. Predictions are based on a statistical model estimated on data on socioeconomic and demographic characteristics as well as information on previous conflicts and conflicts in neighboring countries. Predictions are obtained through simulating the behavior of the conflict variable implied by the estimates from this model.

The developing of models for predicting national conflicts is essential for international resource allocation strategies that affect both regional and global security and stability. The publication [3] proves this. It is devoted to modeling complex regional environments which is achieved through economical and interpretable models. Using an unique set of open-source data, a set of regional models is being developed that predict transition states out of violent conflict. In addition, the controlled variables of the previous study are considered for inclusion in the developed models. Conditional logistic regression models detail the complex political, cultural, and ethnic characteristics of the six geographic regions, as well as capturing the obvious and subtle differences between regional neighbors currently experiencing violent conflict and those who are not.

The author of the article [4] used systematic analysis to highlight the main directions of the country's recovery from an economic point of view. Special attention is paid to the study of the stages of post-war reconstruction, key measures of the government and international organizations.

Analyzed in [5] the world experience on the possibilities of restoring economic ties and relations between enterprises in the post-conflict period includes different models depending on the characteristics of the conflict. A methodical approach to the choice of a model for restoring broken economic ties of enterprises that are on different sides of the line of demarcation and determination the conditions of its use is proposed.

Some of studies [6-9] show that transport costs have a serious negative impact on the transport process, even in peacetime, and in many cases transport costs can support trade even more than customs.

The purpose and tasks of the study. However, the issues of restoring both direct national production and the organization of the process in the field of transport infrastructure and logistics activities in post-conflict areas, which determines the relevance of the article, determines its purpose and objectives, remain insufficiently studied.

Materials and methods of research. Many states, including Azerbaijan, the Balkans, Syria, Georgia and others, have faced the need to rebuild areas whose economies and infrastructure have been destroyed by hostilities. The use of international experience in the field of restoration and development of destroyed territories is a prerequisite for post-war planning, including in Ukraine. At the same time, the normalization of life in the regenerating territories of Ukraine has its difficulties, differs from many similar problems in the above countries, as it goes far beyond solving only logistical and financial problems and is associated with a number of problems. [10-12].

In the restoration of the territories affected by the war, special attention is paid to the transport infrastructure. The importance of this industry is due to the fact that stable transport and logistics connections of the regions contribute to the rapid recovery of management. In addition, during military operations, roads and transport points are usually the most damaged and destroyed as strategically important objects for the movement and storage of military equipment and, consequently, as battlefields.

As of May 2022, as a result of hostilities on the territory of Ukraine, about 23% of railway tracks were damaged, including 6,3 thousand km of main tracks. In the first quarter of 2022 exports amounted to 102,9% compared to the first quarter of 2021, imports – 94,4% compared to the same period last year (Fig. 1). At the same time, foreign trade operations were conducted with partners from 214 countries.

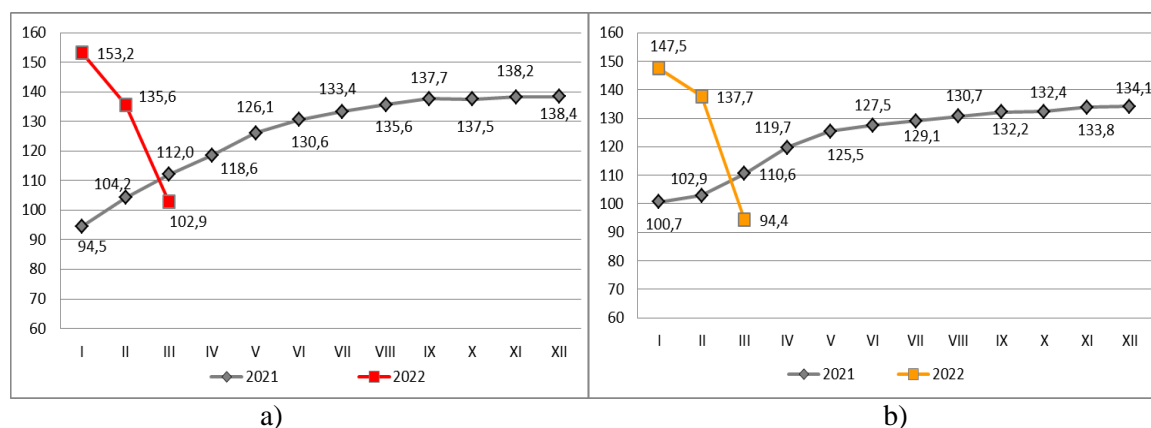


Fig. 1. Monthly dynamics of changes in exports (a) and imports (b) of goods, % to the corresponding period of the previous year, cumulative total

If in the first two months of the quarter external transportation was carried out mainly in peacetime, in March the nomenclature of goods and their volumes of transportation changed in relation to similar indicators of the same period of previous years (Table 1). Thus, the least changes in exports of wood and wood products, electric machinery, increased 1,75 times exports of oil and some petroleum products. Imports of oils, ferrous metals, wood and polymers, as well as non-strategic goods – clothing and footwear, precious and semiprecious stones – decreased the most.

Table 1. Structure of external cargo transportation in 2022

Cargo category	Share in total in 2022, %	Share compared to March 2021, %	Cargo category	Share in total in 2022, %	Share compared to March 2021, %
exports			imports		
mineral fuels, oil, petroleum products	20,1	71,7	mineral fuels, oil, petroleum products	28,2	90,3
chemical products	2,1	32,2	chemical products	14,5	30,1
products of plant origin	18,8	52,1	products of plant origin	4,0	33,7
machines, electrical equipment	13,4	73,4	machines, electrical equipment	17,0	16,9
base metals	16,6	33,4	base metals	3,2	17,8
food products	3,4	27,2	food products	3,5	19,6
wood, wood products	5,8	93,3	means of land transport	7,7	6,6
fats and oils	7,5	41,9	polymeric materials	5,4	15,5
Others	12,3		others	16,5	

(Source: [13])

Restoration of any industry, including transport, is impossible without a combination of approaches to the renewal of the old and the construction of new ones. Preparation for the post-war recovery of both the transport component and the country's economy as a whole should be a detailed analysis and comprehensive study of international experience on this issue. In particular, for those states that have similar territorial, political, economic and other general aspects of functioning.

Based on past experience in the restoration of transport and logistics infrastructure, it is impossible not to turn to the heritage of their ancestors. Thus, the consequences of the Second World War in the European part of the former USSR in the field of railway transport were damage to 65 thousand km of tracks, destruction of 13 thousand bridges, more than 4 thousand railway stations and about 500 thousand units of rolling stock. The implementation of measures to restore the railways was then divided into three main stages:

1. laying of main tracks, restoration of bridges and the minimum required number of tracks at stations, arrangement of temporary communication, water supply and other structures;
2. restoration of locomotive, wagon and energy facilities and bringing all restored structures to a condition that ensures normal train movement;
3. complete restoration of the railways to the pre-war level of capacity.

Immediately after the liberation of the districts from occupation, the issues of launching transport routes, primarily railways, to meet the needs of supplying the front and advancing troops were resolved. Subsequently, these established lines and routes were used to improve the organization of transportation in order to recover the economy as soon as possible.

The priority issues on the railway were the provision of resources: reduction of car downtime at stations, improvement of freight operations, maximum satisfaction of the needs of industrial transport in rolling stock. In air transport, the greatest attention was paid to the condition of runways, in automobile – the number of trucks, fuel economy. In water transport, important measures were the clearing of waterways using self-propelled and non-self-propelled fleets, the use of small rivers for navigation, and the strengthening of port mechanization. The transport measures were based on the approved socio-economic development plans.

After the military conflict in the Donbas in 2014 the Eastern Ukraine Recovery and Peacebuilding Assessment was carried out jointly by the European Union, the United Nations, and the World Bank Group, and with the leadership and participation of the Government of Ukraine [14]. According to the results of the report on the assessment of aggregate needs for the reconstruction of the infrastructure and social services sector of Ukraine, the transport component is allocated the largest part of the funds to improved standards (the «building back better and smarter» principle) – 44%. This is due to the fact that the transport infrastructure has multiple linkages with the social cohesion and economic recovery components of the regions. The rehabilitation and reconstruction of damaged infrastructure will provide opportunities to introduce labor-intensive construction technologies.

The authors of the document emphasize that rehabilitate and reconstruct critical transportation infrastructure and associated maintenance should be carried out in several stages:

- rehabilitate the state road and bridges network,
- rehabilitate municipal infrastructure (roads and bridges),
- rehabilitate railway and air transport infrastructure,
- provide for maintenance of state and municipal transport networks.

Particular attention needs to be paid to forecasting and attracting foreign investment, their distribution by sectors of the economy and qualitative and quantitative indicators of results.

According to [15] transport and energy are the main sectors of critical infrastructure in the system of national security and interests of the European Union. Critical infrastructure restoration and protection means measures aimed at ensuring the functionality, continuity and integrity of critical infrastructure in order to prevent threats and risks, as well as to neutralize their consequences and quickly upgrade the infrastructure in case of failures, attacks and other violating cases. Critical

Infrastructure Directives have already been implemented and put into practice in countries such as the Slovak Republic, Bulgaria, Hungary, Poland, Norway, Switzerland and others.

According to the concept of critical infrastructure, it is necessary to focus on systems, networks and individual objects, the destruction or disruption of which will have the most serious negative consequences for the national security. Elements within critical infrastructure, in turn, can also be ranked in order of national importance. Therefore, the critical infrastructure sectors are divided into a number of groups by purpose, including the following:

- energy supply to the industry;
- information technologies and communications;
- ways of communication by types of transport;
- drinking water supply chains;
- risk management systems;
- support of important social functions, safety and health of the population.

Thus, Ukraine is geographically part of the pan-European energy and transport space, and therefore linked to European critical infrastructure, which opens up opportunities for joint solutions to critical infrastructure reconstruction and security issues between the authorities of Ukraine and Europe.

The experience of the restoration of the country during the last war period shows that, despite the peculiarities of each state, the timing and sequence of the implementation of restoration measures are of key importance. While the dynamic growth of the economy should be a long-term goal, the main short-term goal should be to ensure that the population can restore the main means of production, transportation and communication and improve security.

In the context of the early resumption of transport and logistics activities in Ukraine, a number of measures have already been taken to adapt and develop enterprises in the transport sector and the economy as a whole. The authors propose to divide these measures into three groups – customs, logistics and transport (Table 2).

Table 2. Measures for the priority resumption of transport and logistics activities under martial law

Group	List of activities
<i>1</i>	<i>2</i>
Customs	<ol style="list-style-type: none">1. the import duty, excise duty and value added tax, which were to be paid by individuals during the importation of motor vehicles into the customs territory of Ukraine in accordance with the specified list, were abolished. Features of preferential customs clearance for legal entities are established;2. confiscated motor vehicles for the needs of the armed forces were brought to the customs territory of Ukraine;3. a zero rate of excise tax on motor gasoline, heavy distillates and liquefied gas has been set. VAT taxation of operations on supply of these resources, as well as crude oil products to the customs territory of Ukraine has been reduced.

Logistics	<ol style="list-style-type: none">1. a number of logistics hubs have been set up in the western regions of the country to facilitate the importation of humanitarian aid and its prompt distribution;2. European Humanitarian Hub compatible with Slovak Republic has been established. Its structure includes: a direct railway line to Ukraine, an international airport, an extensive network of roads of international importance and a developed transport and logistics infrastructure;3. relocation of Ukrainian enterprises from the zone of active hostilities is carried out with the involvement of the railway and the national postal operator.
Transports	<ol style="list-style-type: none">1. organized free evacuation of more than 3,5 million people by rail across the country and in neighboring countries;2. the procedure of nationalization of about 15 thousand railway cars of the occupying country continues.

(Source: by authors)

Obviously, the restoration of transport, social and energy infrastructure in Ukraine is crucial in the postwar development of the country. The main source of funding is international grants and loans.

The main legal basis for the European Union's support for the comprehensive reconstruction of the country through a combination of grants and loans is the program "Reconstruction of Ukraine". The Strategic Plan for the "Reconstruction of Ukraine", approved by the European Commission, contains the key reforms and investments needed to create the right conditions for Ukraine's reconstruction and sustainable development.

The directions of complex reconstruction of the country according to the program are:

1. reconstruction of transport infrastructure with ensuring high mobility of movements;
2. reconstruction of social infrastructure, in particular housing, medical institutions, educational institutions, etc.;
3. recovery and development of the energy and digital industries in accordance with European standards.

The signed memorandum of cooperation in the field of transport between Poland and Ukraine on April 24, 2022 contains provisions on increasing freight traffic across the western border of Ukraine, establishing a joint logistics company, joint technical and organizational solutions to minimize differences in customs clearance, problems of different railway widths. The document also mentions the search for new railway routes and rolling stock to cover the planned volume of traffic for the export of goods that previously went to Europe through seaports.

This issue needs to be considered separately, as a result of the blockade of ports, international transportation of export cargo has been suspended indefinitely. Given that the three strategically important types of cargo for export are grain, ferrous ores and metals, export flows were directed by rail and road, but their capacity is almost 10 times lower than that of seaports.

During the Summit of the International Transport Forum on May 19, 2022, a Memorandum on Transport Cooperation between the United States and Ukraine was signed [16], which provides for the implementation of projects for the restoration and development of key transport and logistics activities of the country. The main areas are as follows:

in railway transport – renewal of the fleet of locomotives and wagons by 2030; creation of a system of high-speed railway connections between large cities; increasing the transport infrastructure of large cities;

in road transport – modernization of existing roads, installation of automatic weighing stations on them; introduction of the latest technologies to reduce greenhouse gas emissions; further electrification of transport;

in aviation – development and implementation of environmentally friendly aviation fuels and other clean technologies in accordance with international standards; addressing airspace security and civil aviation.

One of the planned options for rebuilding the destroyed infrastructure of the country should be the use of assistance and experience of industrial and transport modernization of the Republic of Korea as one of the world's leading manufacturers of machinery and equipment on alternative energy sources.

Conclusions. Thus, the resumption of transport and logistics activities in the post-conflict period is a complex and multifaceted process. Based on the experience of reconstruction of world powers, we can say that its success is influenced by a number of important factors, including a clear and consistent recovery plan based on existing experience and competence of developers, willingness of relevant sectors to adapt, comprehensive approach to solving problems, availability of international financial and technical support, etc.

REFERENCES

1. Johnson, R. (2022). Dysfunctional Warfare: The Russian Invasion of Ukraine. *The US Army War College Quarterly: Parameters*, 52(2), 5-20. DOI: <https://doi.org/10.55540/0031-1723.3149>
2. Hegre, H., Karlsen, J., Nygård, H. M., Strand, H., & Urdal, H. (2013). Predicting Armed Conflict, 2010–2050. *International Studies Quarterly*, 57(2), 250–270. Retrieved from: <http://www.jstor.org/stable/24016137> DOI: <https://doi.org/10.1111/isqu.12007>
3. Shallcross, N. J., & Ahner, D. K. (2020). Predictive models of world conflict: accounting for regional and conflict-state differences. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 17(3), 243–267. DOI: <https://doi.org/10.1177/1548512919847532>
4. Polchanov, A.Yu. (2017). Postconflict recovery as a system, *Ekonomika ta derzhava*, 5, 33–39. [in Ukrainian]
5. Bogachov, S. (2020). Aspects of recovering the economic ties between the enterprises in the post-conflict period, *Efektivna ekonomika*, [Online], vol. 3, available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7729> (Accessed 25 May 2022). DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.3.10>
6. Feldman, N., Eiran, E., & Rubin, A. (2021). Naval Power and Effects of Third-Party Trade on Conflict. *Journal of Conflict Resolution*, 65(2–3), 342–371. DOI: <https://doi.org/10.1177/0022002720958180>
7. Baluieva, O.V. and Kelembet, O.S. (2016), The methodical principles of the reconstruction of the deoccupied territories, *Prychornomorski ekonomichni studii*, vol. 8, pp. 41–44. [in Ukrainian]
8. del Castillo, G. (2015), *Economic Reconstruction and Reforms in Post-Conflict Countries*, CRPD Working Paper No. 25. [in English]
9. Brown, Graham & Langer, Armim. (2016). *Timing And Sequencing Of Peacebuilding Reforms And Policies: Timing and Sequencing of Post-Conflict Reconstruction and Peacebuilding*. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198757276.003.0024>
10. Schirch, L., (2022), *Decolonising Peacebuilding: A Way Forward out of Crisis*. Berghof Handbook for Conflict Transformation, Online Edition. Berlin: Berghof Foundation, in collaboration with Toda Peace Institute.
11. Kaspersen, A., Barth Eide, E., & Shetler-Jones, Ph. (2018), 10 Trends For The Future of Warfare, *World Economic Forum*, November 3, 2016, accessed February 10, 2018. Retrieved from: <https://www.weforum.org/agenda/2016/11/the-4thindustrial-revolution-and-international-security> [in English]
12. Shallcross, N. J., & Ahner, D. K. (2020). Predictive models of world conflict: accounting for regional and conflict-state differences. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 17(3), 243–267. DOI: <https://doi.org/10.1177/1548512919847532>
13. Sait Derghavnoyi slughbi statistiki Ukrayini [ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua). Retrieved from: <http://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian]
14. World Bank (2015), *Recovery and peace buiding assessment: analysis of crisis impacts and needs in Eastern Ukraine. Part 1. Synthesis report*. Retrieved from: <http://hdl.handle.net/10986/22089> [in English]
15. Council Directive 2008/114/EC On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. Retrieved from: <http://eur-lex.europa.eu/> [in English]
16. Sait Uryadovoho portalu Ukrayini [kmu.gov.ua](http://www.kmu.gov.ua). Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukrayina-ta-ssha-pidpisali-memorandum-pro-transportne-spivrobitnictvo> [in Ukrainian].

*Олександр Озар¹, Ганна Шелехань¹, Оксана Пестременко-Скрипка¹,
Пилип Зверев²*

¹ Кафедра залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна

² Факультет управління процесами перевезень, Український державний університет залізничного транспорту, м. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна

ШЛЯХИ ВІДНОВЛЕННЯ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ У ПІСЛЯВОЄННИЙ ПЕРІОД

Стаття присвячена питанню пошуку ефективних шляхів відновлення сектору транспортно-логістичної діяльності країни у повоєнний період, який наразі є актуальним для України. Проаналізовано стан міжнародних перевезень у період воєнних дій. Встановлено, що процес відновлення транспортно-логістичного сектору у країні вже триває і складається з ряду заходів митного, логістичного та транспортного напрямків. Розглянуто досвід відновлення транспортного сектору у європейських країнах як частини національної критичної інфраструктури. Визначено, що однією з основних умов ефективного відновлення економіки є міжнародна підтримка. Розглянуто ключові програми, дипломатичні та юридичні документи, що полягли в основу створення міжнародної підтримки України у відновленні економіки у цілому та транспортної галузі зокрема. Встановлено базові напрямки, у яких спрямована дія зазначеної підтримки для транспортно-логістичної діяльності.

Ключові слова: транспортно-логістична діяльність, післявоєнний період, міжнародна підтримка, критична інфраструктура

**Леонід Тимченко¹, Наталія Кокряцька², Олександр Герцій³, Дмитро Жук^{4*},
Валентина Каплун⁵, Надія Дубова⁶**

¹ Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем штучного інтелекту та телекомунікаційних технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5056-5913>

² Кандидат технічних наук, доцент кафедри систем штучного інтелекту та телекомунікаційних технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9813-1399>

³ Кандидат технічних наук, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8634-5880>

⁴ Аспірант кафедри систем штучного інтелекту та телекомунікаційних технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8951-5542>

⁵ Старший викладач кафедри захисту інформації, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4353-3694>

⁶ Старший викладач кафедри вищої математики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3039-6902>

*Автор, відповідальний за листування: zhuk_do@ukr.net

МЕТОД ЗНАХОДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЦЕНТРІВ ФРАГМЕНТІВ ЗОБРАЖЕНЬ ЛАЗЕРНИХ ТРАС

Розглянуто метод знаходження енергетичних фрагментів зображень лазерних трас в реальному часу та його застосування для задач розпізнавання образів. Приведені теоретичні відомості, експериментальні дослідження і програмна реалізація системи розпізнавання образів подібного до природних структур.

Проведено аналіз останніх робіт з нейробіології та робіт пов'язаних з моделюванням нейронних механізмів. Виявлено основні проблеми у існуючих роботах, пов'язаних з моделюванням систем сприйняття інформації природним способом.

Метою дослідження є програмне застосування методу знаходження енергетичних центрів образів в реальному масштабі часу для оптимізації цих енергетичних центрів.

Завданням дослідження є аналіз застосування методу знаходження енергетичних центрів фрагментів зображень лазерних трас.

Проведено опис методу аналізу зображень лазерних трас на основі визначення центру ваги на основі моментних ознак.

Наведено приклад роботи та описано основний функціонал програми обробки зображень лазерних трас.

Подано зразки еталонних образів та окремих фрагментів протяжних лазерних трас, що використовувалися у ході експериментів, а також криві знаходження їх енергетичних центрів.

Проведено комп'ютерне моделювання обробки зображень лазерних трас, в результаті якого показано адекватність обчислених результатів.

Ключові слова: лазерні траси, паралельно-ієрархічні перетворення, обробка зображень, лазерні плями.

Вступ. Метою даної статті є програмне застосування методу знаходження енергетичних центрів образів в реальному масштабі часу для оптимізації цих енергетичних центрів.

Розвиток комп'ютерних технологій проявляється в еволюційному переході від традиційних структур фон Неймана до експертних систем та інтелектуальної нейротехніки, що імітує діяльність мозку людини, інтелектуальні та обчислювальні засоби шостого покоління. Можна впевнено сказати, що найкращим пристроєм для паралельного перетворення оптичної інформації є око – найбільш унікальна сенсорна система людини. Людський мозок – це природний процес, в якому обробляється сенсорна інформація. Питання полягає в тому, чи можна зробити модель процесу сприйняття сенсорної інформації оком за допомогою реалізації нейроподібної системи обробки даних. Проаналізувавши останні роботи в сфері нейробіології та напрацювання пов'язані з моделюванням механізмів нейроподібної сенсорної обробки даних, можна виділити, що є незрозумілими такі питання: як формується взаємодія нейроасамблей в корі головного мозку людини, їх спільна робота на етапі локальних нейронних мереж; як під час скоординованого впливу одночасно багатьох подразників відбувається об'єднання просторово відокремлених активованих нейроасамблей Д. Хебба у вертикальних та горизонтальних трасах? Саме тому в статті проведено дослідження гіпотетичної моделі просторового об'єднання та структурування даних в корі головного мозку людини, які належать до сфери обробки та розпізнавання образів. Обговорювані в статті моделі все ще більше відносно схожі на природні комп'ютери, але вони показують новий, більш досконалий підхід до реалізації машинних обчислень, який можна використовувати для створення нових систем мікропроцесорів та комп'ютерів з новітньою архітектурою. Також вони дозволяють винайти новий підхід до біологічних систем. Зразком даного підходу є засади колективних розрахунків у системах колективного прийняття рішень, яким необхідна колективна робота багатьох простих рішень, в результаті яких ухвалюється більш складне вирішення за допомогою об'єднання інформації на протязі короткого проміжку часу. Спираючись на обробку нейробіологічних даних з теорії структурування сенсорної інформації в мозку людини та певні особливості того як влаштовані розрахунки у корі було виявлено декілька неспівпадінь у природних системах розпізнавання об'єктів і ситуацій, які дуже ускладнюють технічні вимоги та співпадають з основними вимогами, необхідними для інтелектуальних систем обчислення даних.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми. Під час проведення аналізу останніх досліджень в області нейромереж, пов'язаних з моделюванням системи сприйняття образів природними сенсорами, було визначено, що невідомо, як саме, в корі головного мозку людини, проводиться сумісна робота утворених нейроасамблей та їх робота на етапі локальних нейромереж. Також незрозуміло, як саме, під час дії багатьох зовнішніх подразників, відбувається інтегрування нейроасамблей Д. Хебба у вертикальних та горизонтальних трасах.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є програмне застосування методу знаходження енергетичних центрів образів в реальному масштабі часу для оптимізації цих енергетичних центрів.

Завданням дослідження є аналіз застосування методу знаходження енергетичних центрів фрагментів зображень лазерних трас.

Матеріали та методи дослідження. У статті проведено опис методу аналізу зображень лазерних трас на основі визначення центру вагомості на основі моментних ознак [4 – 6].

1. Для всього фрагмента траси знаходиться точка з максимальною яскравістю T_{max} .
2. Від максимальної яскравості беруться N значень яскравості T_{max-w} , $w=1, 2, N$. У програмі є можливість вибирати необхідну кількість N значень яскравості. Крайні точки з яскравістю T_{MAX-C} утворюють крайову лінію. Таким чином визначалися N крайових ліній [7].
3. Для кожного крайового контуру визначалися попередні центри окремо для кожної координати.

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \cdot x, \quad y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \cdot y, \quad M = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \quad (1)$$

де $w=1, 2.N$, $f(x,y)$ – яскравість.

4. Знаходяться усереднені координати для всього фрагмента траси (даними для усереднювання є координати центру кожного крайового контуру).

5. Пошук еталонного зображення. Для навчальної вибірки знаходяться для кожного фрагмента траси усереднені значення центрів крайових контурів, з яких складається фрагмент траси. Для формування еталонного образу використовувалася різна кількість фрагментів [8].

6. Етап тунелювання проводиться по усереднених значеннях центрів крайових контурів та заданій точності у пікселях (наявна можливість задати необхідну точність) [9].

7. Етап обробки поточних фрагментів траси. На цьому етапі у разі попадання усереднених значень центрів крайових контурів фрагменту траси у тунель еталонного образу фрагмент траси вважається «хорошим», інакше – «поганим» [10 - 11].

8. Для «хорошого» фрагменту траси виконується оптимізація ваг за формулою (2):

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \cdot (x + \delta_x), \quad y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x,y)) \cdot (y + \delta_y). \quad (2)$$

Ці центри утворюють кінцевий результат.

На рис. 1 зображено вікно програми, розділене на дві частини: в першій – розміщено інформацію про еталонний образ (панель «ЕТАЛОННИЙ ОБРАЗ»), у другій – фрагмент траси, який порівнюється (панель «ОБРАЗ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ»).

Окремо виділено область «ПАНЕЛЬ МЕРЕЖ».

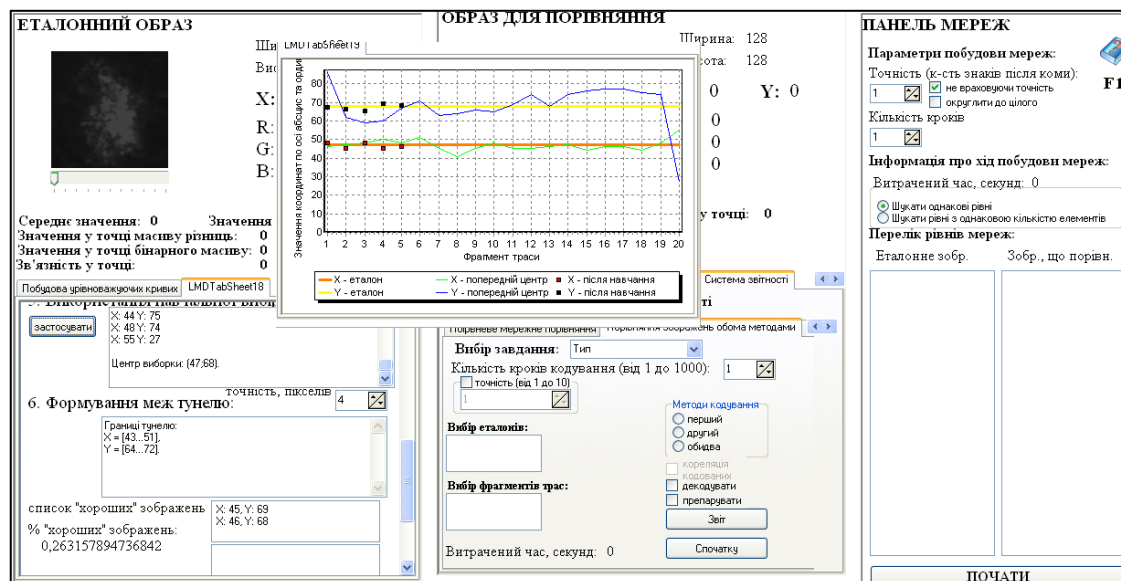


Рис. 1. Видяг головного вікна роботи програми

Програма містить в собі наступний функціонал:
 функціонал вибору частини лазерних трас для створення еталонного образу або для фрагменту траси, яка порівнюється;
 можливість зберегти еталонний образ та його автоматизований вибір при обчисленнях;

ІНФОРМАЦІЙНІ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

можливість створити еталонний образ структури нейромережі, а також порівняльний образ за допомогою вказання кількості кроків кодування та точність;

можливість автоматизованого обчислення розміру матриці на різних ієрархічних етапах та відображення елементів цих матриць;

створення та друк графового дерева паралельно-ієрархічної мережі;

можливість кодувати та декодувати еталонний і порівняльний образи за допомогою вказання кількості кроків кодування та точності;

можливість кодування та декодування матриць на різних ієрархічних етапах;

визначення часту, необхідного для проведення обчислень;

відображення образів в результаті декодування;

створення методу препарування з використанням популяційного кодування, що містить в собі автоматизований пошук оптимального порогу, підрахунок нульових, негативних та позитивних препаратів;

створення за допомогою популяційного кодування урівноважуючих кривих, що містить в собі можливість коефіцієнтної кореляції препаратів на різних ієрархічних етапах [12];

можливість налаштування звіту;

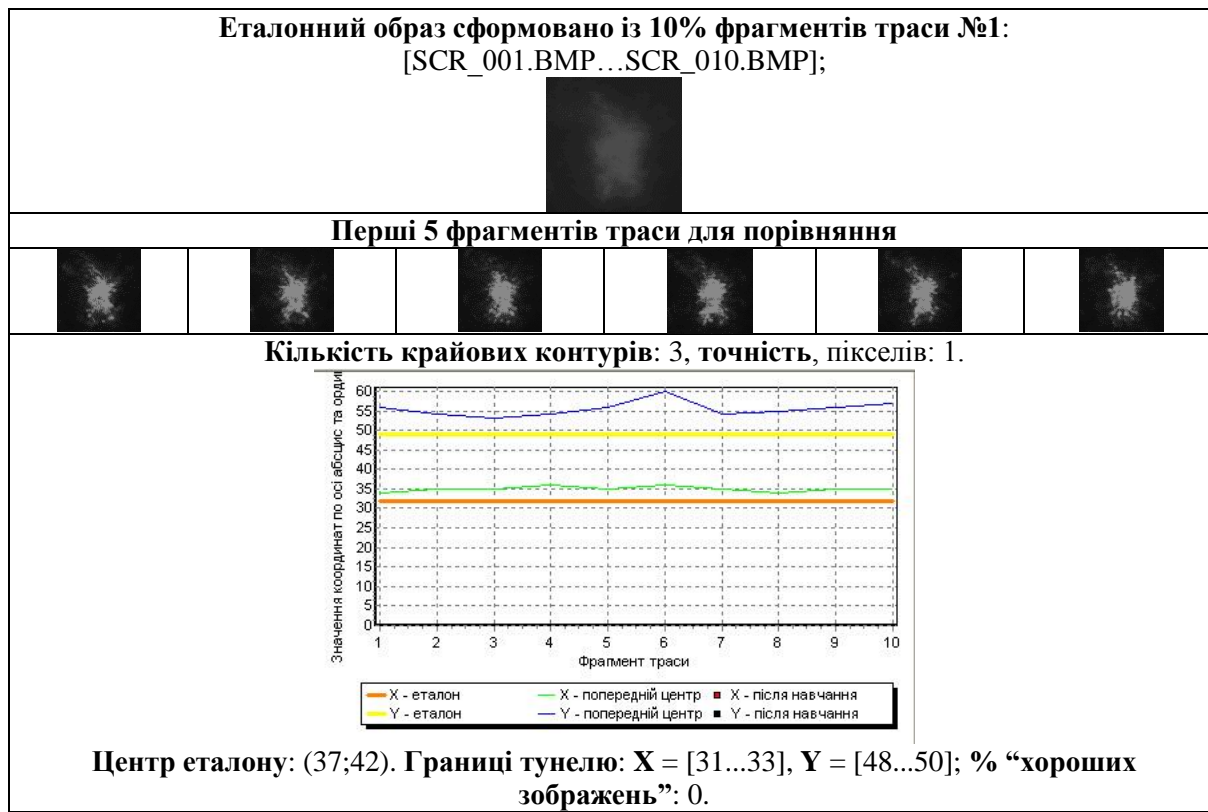
мережне порівняння на різних ієрархічних етапах, що автоматизує встановлення коефіцієнтів кореляції при різних вхідних даних, що в результаті дає можливість отримати розгорнутий або стислий звіт [13];

збереження всіх проведених дослідів для можливості перегляді історії;

розгорнута довідка для користувачів.

У табл. 1 подані зразки еталонних образів та окремих фрагментів протяжних лазерних трас, що використовувалися у ході експериментів, а також криві знаходження їх енергетичних центрів [14 – 15].

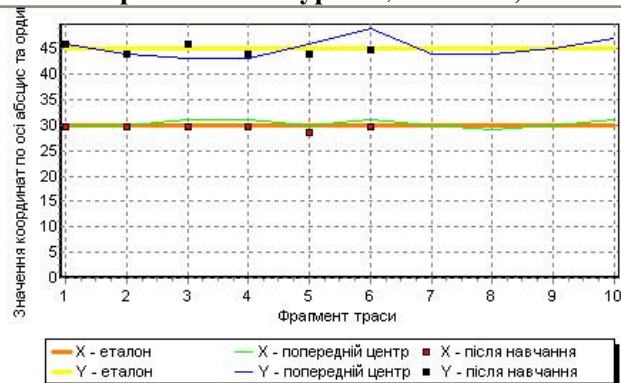
Таблиця 1. Зразки образів та фрагменти трас



Кількість крайових контурів: 1, точність, пікселів: 1.

Центр еталону: (24;33). Границі тунелю: $X = [23...25]$, $Y = [32...34]$. % “хороших зображень”: 0.

Кількість крайових контурів: 3, точність, пікселів: 2.

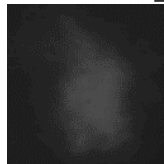


Центр еталону: (30;45). Границі тунелю: $X = [28...32]$, $Y = [43...47]$. % “хороших зображень”: 67.

Кількість крайових контурів: 1, точність, пікселів: 2.

Центр еталону: (47;65). Границі тунелю: $X = [45...49]$, $Y = [63...67]$. % “хороших зображень”: 11.

Еталонний образ сформовано із 20% фрагментів траси №1:
[SCR_001.BMP...SCR_020.BMP];



Кількість крайових контурів: 3, точність, пікселів: 1.

Центр еталону: (30;48). Границі тунелю: $X = [29...31]$, $Y = [47...49]$. % “хороших зображень”: 5,3.

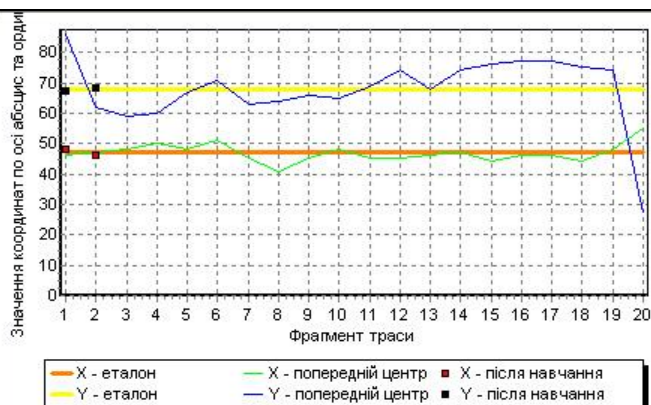
Кількість крайових контурів: 1, точність, пікселів: 1.

Центр еталону: (47;68). Границі тунелю: $X = [46...48]$, $Y = [67...69]$. % “хороших зображень”: 0.

Кількість крайових контурів: 3, точність, пікселів: 2.

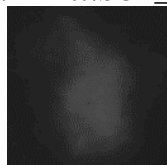
Центр еталону: (30;52). Границі тунелю: $X = [28...32]$, $Y = [50...54]$. % “хороших зображень”: 36,8.

Кількість крайових контурів: 1, точність, пікселів: 2.



Центр еталону: (47;68). Границі тунелю: X = [45...49], Y = [66...70]. % “хороших зображень”: 11.

**Еталонний образ сформовано із 30% фрагментів траси №1:
[SCR_001.BMP...SCR_030.BMP];**



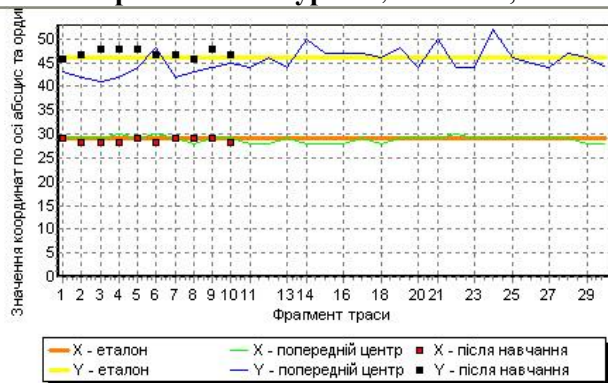
Кількість крайових контурів: 3, точність, пікселів: 1.

Центр еталону: (31;47). Границі тунелю: X = [30...32], Y = [46...48]. % “хороших зображень”: 6,9.

Кількість крайових контурів: 1, точність, пікселів: 1.

Центр еталону: (47;70). Границі тунелю: X = [46...48], Y = [71...72]. % “хороших зображень”: 0.

Кількість крайових контурів: 3, точність, пікселів: 2.



Центр еталону: (29;46). Границі тунелю: X = [27...31], Y = [44...48]. % “хороших зображень”: 35.

Кількість крайових контурів: 1, точність, пікселів: 2.

Центр еталону: (47;70). Границі тунелю: X = [45...49], Y = [68...72]. % “хороших зображень”: 3,4.

У ході експерименту проводилося знаходження енергетичних центрів еталонних образів. Як еталонні бралися образи, що були раніше сформовані із певної (зазначеної у табл. 1) сукупності фрагментів трас та збережені програмою «Обробка зображень лазерних трас» і подальше порівняння з іншими фрагментами трас проводилося саме для них.

Висновки. У роботі описано метод знаходження енергетичних центрів фрагментів зображень лазерних трас за допомогою використання принципів популяційного кодування в нейромережі з максимальним приближення обчислень до таких, які відбуваються в природних нейронних мережах головного мозку людини.

У порівнянні з існуючими структурами нейромереж, де для обчислень беруть абсолютні критерії подоби, в запропонованому методі застосовуються нормовані критерії.

Проведено комп'ютерне моделювання обробки зображень лазерних трас, в результаті якого показано адекватність обчислених результатів.

У ході проведення експерименту нами встановлено, що при зменшенні кількості крайових контурів енергетичний центр еталону зміщується у сторону більшої активності лазерної траси. Вищий відсоток хороших зображень підвищується завдяки збільшенню точності, а, отже, і збільшенню границь еталонного тунелю.

Після оптимізації ваг енергетичних центрів «хороших» зображень ми бачимо, що ці енергетичні центри максимально наближаються до енергетичного центру еталонного образу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tymchenko L., Kokriatskaia N., Gertsy A., Stepaniuk D., Chernyaschuk N., Kotyra A., Amirgaliev Y. Elaboration of pyramidal methods applying computation technique "rough-fine" image identification // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Poland. 2019. DOI: 10.1117/12.2537179.
2. Наконечна С. В. Оброблення зображень плям лазерних пучків із застосуванням паралельно-ієрархічних мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : 05.13.23 : захист 26.12.2014 / наук. кер. Л. І. Тимченко. Львів, 2014. 27 с.
3. Tymchenko L., Tverdomed V., Petrovsky N., Kokriatskaia N., Maistrenko Y. Development of a method of processing images of laser beam bands with the use of parallel hierarchic networks // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2019. №6/9(102). P. 21-27. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.188568
4. Romanyuk O., Pavlov S., Melnyk O., Romanyuk S. Method of anti-aliasing with the use of the new pixel // Proceedings SPIE 9816. 2015.
5. Yarovy A., Tymchenko L., Kokriatskaia N., Nakonechna S., Mateichuk M. Organization of HighPerformance Parallel-Hierarchical Computing Processes for Classification of Laser Beam Images // Proceedings of the 12th International Conference on DAS-2014, Universitatea Stefan cel Mare Suceava, 192-197. 2014.
6. Romanyuk, S. O., Pavlov, S. V., Melnyk, O. V. New method to control color intensity for antialiasing," International "Siberian Conference Control and Communications // SIBCON. 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147194 (2015).
7. Yang Y., Li J., Zhou T., Schille J., Loeschner U., Perrie W., Gearder G., Edwardson S. Dynamic beam shaping with polarization control at the image plane for material processing // Liverpool. 2018. P. 581 – 584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.083>
8. Яровий А. А., Кокряцька Н. І., Наконечна С. В., Матейчук М. С., Польгуль Т. Д. Аналіз обчислювальної складності GPU-орієнтованих паралельно-ієрархічних обчислювальних систем та оцінювання продуктивності їх апаратного забезпечення // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2014. №1 С. 18-25.
9. Тимченко Л. І., Кокряцька Н. І., Мельник В. В., Наконечна С. В. Новий метод прогнозування із застосуванням паралельно-ієрархічної мережі // Штучний інтелект. 2012. № 3. С. 56-62.
10. Tymchenko L. Parallel-hierarchical networks for processing biomedical images and images of stains of laser beams. Experimental research // ASMI, Poltava. 2017.
11. Sawicki, D. Using the GPU to determine the area the flame in the vision diagnostic system // Informatyka Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Srodowiska. 2015. С. 80-85.
12. Lawicki T., Zhirmova O. Application of curvelet transform for denoising of CT images // Proceedings SPIE 9662. 2015.
13. Orlov D., Neverova E. Determination of the position of the center of a laser beam when the dynamic range of the matrix receiver is exceeded. // Measurement Techniques. 2011. Vol. 53, № 10. P. 1140-1146.
14. Aharon O., Laser Beam Profiling and Measurement. URL: http://www.novuslight.com/laser-beam-profiling-and-measurement_N678.html.
15. Roundy C. Current Technology of Laser Beam Profile Measurements // Ophir-Spiricon Inc. 2016.

REFERENCES

1. Tymchenko L., Kokriatskaia, N., Gertsy, A., Kotyra, A., Amirgaliyev, Y. (2019). Elaboration of pyramidal methods applying computation technique "rough-fine" image identification. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. DOI: 10.1117/12.2537179.
2. Nakonechna S. (2014). Obroblennya zobrazhen' plyam lazernih puchkiv iz zastosuvannyam paralel'no-ierarhichnih merezh [Image processing of laser beam spots using parallel-hierarchical networks] *Extended abstract of candidate's thesis*. Lviv [in Ukrainian].
3. Tymchenko L., Tverdomed V., Petrovsky N., Kokryatska N., Maistrenko Y. (2019). Development of a method of processing images of laser beam bands with the use of parallel hierarchic networks. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.188568
4. Romanyuk O. (2015). Method of anti-aliasing with the use of the new pixel model. Proceedings SPIE 9816.
5. Tymchenko L. (2014). Organization of HighPerformance Parallel-Hierarchical Computing Processes for Classification of Laser Beam Images. Proceedings of the 12th International Conference on DAS-2014, Universitatea Stefan cel Mare Suceava, 192-197.
6. Romanyuk S., Pavlov S., Melnyk O. (2015). New method to control color intensity for antialiasing." International "Siberian Conference Control and Communications. SIBCON. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147194.
7. Tang Y. Li J. Zhou T. Schille J. (2018). Dynamic beam shaping with polarization control at the image plane for material processing. Liverpool. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.083>
8. Yarovyj, A. A., Kokriats'ka, N. I., Nakonechna, S. V., Matejchuk, M. S., Pol'hul', T. D. (2014). Analiz obchysliuval'noi skladnosti GPU-orientovanykh paralel'no-ierarkhichnykh obchysliuval'nykh system ta otsiniuvannia produktyvnosti ikh aparatnoho zabezpechennia [Analysis of computational complexity GPU-oriented hierarchical parallel computing and performance evaluation of hardware]. *Optyko-elektronni informatsijno-enerhetychni tekhnologii – Optoelectron Information technology the energy*, 1 (27), 18–25 [in Ukrainian].
9. Tymchenko, L. I., Kokriats'ka, N. I., Mel'nikov, V. V., Nakonechna, S. V. (2012). Novyj metod prohnouzuvannia iz zastosuvanniam paralel'no-ierarkhichnoi merezhi [A new forecasting method using the parallel-hierarchical network], *materialy mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Shtuchnyj intelekt. Intelektual'ni systemy – Artificial Intelligence. Intelligent Systems*, 59–62 [in Ukrainian].
10. Tymchenko L. (2017). Parallel-hierarchical networks for processing biomedical images and images of stains of laser beams. *Experimental research*. ASMI, Poltava.
11. Sawicki D. (2015). Using the GPU to determine the area the flame in the vision diagnostic system. *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*.
12. Lawicki T., Zhirnova O. (2015). Application of curvelet transform for denoising of CT images. Proceedings SPIE 9662.
13. Orlov D. (2011). Determination of the position of the center of a laser beam when the dynamic range of the matrix receiver is exceeded. *Measurement Techniques*.
14. Aharon O. Laser Beam Profiling and Measurement. Retrieved from: http://www.novuslight.com/laser-beam-profiling-and-measurement_N678.html.
15. Roundy C. (2016). *Current Technology of Laser Beam Profile Measurements*. Ophir-Spiricon Inc.

Leonid Tymchenko¹, Kokriatska Natalia², Alexander Gertsy³, Dmytro Zhuk⁴, Valentyna Kaplun⁵, Nadiia Dubova⁶

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Artificial intelligence systems and telecommunication technologies, State University of Infrastructure and Technology, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5056-5913>

² Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Artificial intelligence systems and telecommunication technologies, State University of Infrastructure and Technology, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9813-1399>

³ Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automation and computer integrated transport technologies, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8634-5880>

⁴ Graduate student of the Department of Artificial intelligence systems and telecommunication technologies, State University of Infrastructure and Technology, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8951-5542>

⁵ Senior Lecturer of the Department of Information Protection, Vinnytsia National Technical University, 96, Khmelnytsky highway, Vinnytsya, 21021, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4353-3694>

⁶ Senior Lecturer of the Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, 96, Khmelnytsky highway, Vinnytsya, 21021, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3039-6902>

METHOD OF FINDING ENERGY CENTERS OF LASER PATHS IMAGES FRAGMENTS

Considered method of finding energy fragments of images of laser tracks in real time and its application for image recognition problems are considered. Given theoretical information, experimental research and software implementation of the image recognition system similar to natural structures.

Presented an analysis of recent work on neurobiology and work related to the modeling of neural mechanisms. The main problems in the existing work related to the modeling of information perception systems in a natural way have been identified.

The aim of the study is the software application of the method of finding the energy centers of images in real time to optimize these energy centers.

The task of the research is to analyze the application of the method of finding the energy centers of fragments of images of laser paths.

Carried out the description of the method of analysis of images of laser tracks on the basis of determination of the center of gravity on the basis of moment signs is carried out.

Described an example of work is given and the main functionality of the laser image processing program.

Presented samples of reference images and individual fragments of long laser paths used in the experiments, as well as the curves of their energy centers.

Shown computer simulation of laser path image processing was performed, as a result of which the adequacy of the calculated results.

Keywords: *laser paths, parallel-hierarchical transformations, image processing, laser spots*

Kostiantyn Tkachenko¹, Olha Tkachenko^{2}*

¹Information Technologies and Design Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0549-3396>

²¹Information Technologies and Design Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1800-618X>

*Corresponding author: oitkachen@gmail.com

MODELING OF MANAGEMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS IN TRANSPORT

The article considers topical problems of modeling control processes in intelligent systems in transport. Management of such systems also involves control and monitoring of the processes of their design and maintenance. The article proposes an ontological model of process control of intelligent systems in transport. The proposed ontological model is necessary for the formation of a common understanding of the essence of the subject area, which is the transport sphere (transport systems, transport enterprises, vehicles and transport infrastructure). The proposed ontological model contributes to the presentation of knowledge in a form that is convenient for their processing in the intelligent system of transport; ensuring the possibility of obtaining and accumulating new knowledge.

The proposed ontological approach provides multiple use of knowledge and previously developed ontologies. The proposed approach allows the use of modern multi-agent technology, when each agent has its own ontological model. The considered ontological approach to modeling of management of intelligent systems allows to pass to automatic control of processes in these systems (in the presence of the corresponding restrictions).

The developed ontological model of the subject area is planned to be expanded and supplemented with new components, imposing appropriate restrictions. The OWL software code obtained from the simulation results in Protégé can be further used within the knowledge base of the intelligent system, processing this information in various software applications, including Java applications.

Keywords: *management, design, intelligent system, multi-agent technology, information resources, knowledge base, modeling, ontological model.*

Introduction. The use of modern information and intelligent technologies, various models of processes that occur in different subject areas (SA), contributes to the solution of existing problems of intellectualization of solving problems in different SA (in particular, in transport).

To avoid situation where the costs of designing and maintaining intelligent system (IS) exceed the benefits of its use, it must be manageable and viable. To do this, the processes of designing and maintaining IS (including IS in transport (IST)) should be replaced by the IST process management process. This means solving problems, in particular, designing and maintaining IST using special high-level control mechanisms [1].

The development of IS management systems should be based on the principle that all design decisions that affect the characteristics of IST should be improved in the process of accumulating experience in its use.

In our time, the problems of development, use and maintenance of IS in various SA (including transport) remain relevant and not fully resolved.

The paper proposes the use of ontological approach for formalized description of the IST processes, including the processes of its design and maintenance.

Analysis of recent research and problem statement. Conceptual information resources (InRes) of IS, including knowledge bases, have declarative and structural representation. These InRes can be represented in the form of appropriate models (for example, semantic network, production or hierarchical model, frame or graph model) [2 – 5].

The structure of the model is defined by some meta-information, and each term in it belongs to some class defined by this meta-information.

Meta-information of conceptual InRes can be considered as: its ontology; the grammar that generates this resource; scripts for dialogue with the user when editing this resource; the basis of the query language for this resource from the IST side. Conceptual InRes IRk is pair:

$IRk = \langle MIn, Cont \rangle$, where MIn is meta-information and $Cont$ is the actual content of this resource.

Nowadays, technologies in which the IS problem solver is built from agents are becoming increasingly popular. These are the so-called multi-agent technologies [6, 7].

In [8], agents are represented as declarative-procedural InRes. In [9], the solver consists of set of blocks, and each block consists of message ontology and set of productions. Moreover, each solver consists of the following InRes:

- network of agents that determines which agents are included in the solver;
- control graph that allows agents to find recipients of messages they send;
- distribution scheme that sets restrictions on the parallelization of agents when executing the solver in multiprocessor environment.

In [10], it is shown that the user interface model can also be represented as declarative InRes, consisting of: task models; SA models; user models; presentation models; dialogue scenario models.

In [11], the behavior of interface is completely defined by declaratively presented model of the interpretation process.

The conceptual system of InRes is included in its meta-information and allows presenting InRes in form that is understandable to those who manage it (the manager) through the process of visualization (in the form of semantic network or text).

To include experts from different SA into the management process, each InRes is associated with its own formally presented conceptual system.

In [12], the means of managing (creating, editing, modifying) declarative InRes (ontologies, knowledge bases, etc.) is the semantic network class editor, which:

- interprets meta-information (meta-information is created by knowledge engineer);
- generates interface for managing this InRes.

The purpose and tasks of the research. The purpose of the article is to discuss the problems associated with IST management processes (in particular, their design and maintenance), as well as possible methods for their solution using multi-agent technology and ontological modeling of the corresponding SA.

Materials and methods of research. All IST components and connections between them can be represented as appropriate models (semantic networks, ontological models, etc.). In particular, IST can be represented as:

$InS = \langle KB, TS, CI \rangle$,

where KB is the knowledge base (and other InRes - databases, ontologies, meta-ontologies, etc.), TS is the problem solver that implements the functionality of the system, CI is the user interface.

The goals of managing these components of IST are distinct and, to certain extent, independent. This causes the presence in the architecture of the control system of IS the presence of the following subsystems: InRes control; problem solver control; user interface control.

Based on this, in IST control (management) system, there should be components that support the following types of control:

- manual control (iterative change by person of IS properties);

automatic control (changing the properties of IS without human intervention);
automated control (mixed type of control) [13].

Manual management of IS components brings their content in line with the content perceptions of users who manage these components. These users (SA experts, knowledge engineers, IS developers, designers, ergonomists, cognitive psychologists, etc.) will be called managers.

In table 1 presents the problems of manual control of IS and ways to solve them.

Automatic management of IS. The problems associated with the automatic control of IS are presented in table 2. The first of them has already been considered in table 1.

Table 1. Problems related to manual control and methods for solving them

№	Problem	Solving
1	Heterogeneous classes of control objects: InRes, problem solvers, user interfaces	Declarative representation of relationships between different control objects (using process and process control models, interface models, etc.)
2	Achieving consistency in IS management (IS components are interconnected and their independent management can disrupt these ties)	Representation of InRes to each user-manager in terms of its formally represented conceptual system
3	Heterogeneous composition of the group of user-controllers for each class of control objects	Reduction of the problem of manual management of IS to the problem of manual management of declarative InRes (in other words, representation of all IS components in the form of declarative InRes, in particular, using ontologies and meta-ontologies)

Table 2. Problems associated with automatic control and methods for their solution

№	Problem	Solving
1	Heterogeneous classes of control objects: InRes, problem solvers, user interfaces	Use of systems of rules and mechanisms with feedback
2	Heterogeneity of the states of the control object (automatic control during the periods of operation of the object and between these periods)	Use of internal mechanisms (embedded in IS) together with external mechanisms
3	Achieving consistency between automatic control mechanisms and manual control mechanisms	Use of meta-information in mechanisms of external automatic control
4	Different Degrees of Uncertainty in Automatic Control Problems	Use of problem-dependent control mechanisms along with problem-independent ones

The heterogeneity of classes of control objects (in particular, components of IST can be objects) does not contribute to finding common, problem-independent solutions for automatic control problems. Therefore, problem-dependent solutions are also used.

For automatic management of knowledge bases, problem-dependent mechanisms are used (for example, for the ontology of diagnosing the technical condition of vehicle, for the ontology of innovation and investment activities, including transport enterprise).

An example of such automatic feedback control mechanism is iterative algorithm for inductive knowledge base formation, which consists of two asynchronous processes:

1) processing incoming examples from the training sample and transferring the result (set of alternative knowledge bases) to the second process;

2) choosing from many examples of the best knowledge base and updating the working knowledge base.

An example of problem-independent mechanism for automatic user interface management is mechanism for automatic adaptation to user data and characteristics. This mechanism generates visual representation of the interface based on the dynamic characteristics of the user. Problem solvers can be automatically controlled by both problem-dependent and problem-independent mechanisms.

An example of problem-independent mechanism in problem solver is the automatic parallelization of the functioning of agents on multi-agent platform [7]. In accordance with the multi-agent approach, IST management can be carried out at the following levels:

IST subsystems (components) operate in parallel with each other and are launched for execution through the control subsystem based on information about the user's authority;

agents within each IST subsystem interact with each other asynchronously using communication subsystem based on the control graph (control tree, goal tree, decision tree, etc.);

parallelization of agents within IST is controlled by the agent distribution scheme of this IST;

uniform load on the nodes of the computing farm (server, client computers, multiprocessor systems) is achieved by the balancing algorithm.

An example of problem-dependent mechanism is the automatic control of problem solver of expert system for technical diagnostics of transport objects (vehicles, infrastructure transport objects) [14].

The solver control mechanism, when the results of monitoring the knowledge base, performed every time it is changed, makes it possible to reduce the set of tested hypotheses during processing (technical diagnostics) by the solver of each detail (each vehicle node, transport infrastructure object or part thereof, etc.) by based on rigid system of rules.

The consistency of the mechanisms of automatic and manual control is carried out through the use of meta-information in the mechanisms of external control.

Using meta-information allows you to:

present InRes in form understandable for user-managers;

managing users to monitor the process of automatic InRes management (for example, knowledge bases) of the corresponding IS.

With low degree of uncertainty in the automatic control task, the automatic control mechanism is built on the basis of system of rules, and with high degree, it is necessary to use automatic control mechanisms with feedback.

Iterative methods of inductive knowledge formation and automatic adaptation to the characteristics of IS users are built on the basis of feedback mechanisms, and the mechanisms for automatic parallelization of the functioning of agents and automatic adaptation to data are implemented on the basis of rule systems.

Automated management of IS. The problems associated with the automated management of IP are presented in table 3. The first two of them have already been considered in table 1 and table 2.

Table 3. Problems associated with automated control and methods for their solution

№	Problem	Solving
1	Heterogeneous classes of control objects: InRes (knowledge bases), user interfaces, problem solvers	Manual adjustment of the results of automatic control. Teaching systems to solve problems.
2	Heterogeneous composition of the group of user-controllers for each class of control objects	Representation of InRes to each user-manager in terms of its conceptual system Use of problem-dependent control mechanisms together with problem-independent ones.
3	Combining manual and automatic control mechanisms	Reduction of the problem of manual control of IS to the problem of manual control of its InRes

Sharing the mechanisms of manual and automatic control provides the opportunity: the user-manager to correct the results of automatic control; show the solution of particular problems that are generalized by automatic control mechanisms and used by the solver.

An example of automated control task is the task of debugging technical knowledge bases, where monitoring the knowledge base regarding selection of diagnostics (states) of transport objects (vehicles or transport infrastructure objects) reveals errors and inaccuracies in this knowledge base. The mechanisms of inductive formation of knowledge bases determine the options for eliminating these errors and inaccuracies, and the SA expert who manages the knowledge base chooses from these options those that he considers the best.

Complex ontology of designing IS of technical objects (in IST – dynamic transport). Let's consider some aspects of building complex knowledge structure in IST using complex ontology as formal theory of knowledge interpretation.

Complex ontology of design, as complex system of knowledge, integrates the analysis and interpretation of heterogeneous information and involves the development of algorithmic and software tools for representing ontological knowledge and working with such knowledge. Among the directions for creating IST ontology system, one should highlight, in particular: *organization ontology; project ontology; research-topic ontology*.

The implementation of these areas is associated with the solution of problems of representation, search and processing of information using ontological knowledge [15, 16].

In the work, ontological model of managing the processes supported by IST (including the processes of its design and maintenance) was chosen as the model of the ontology of SA.

The model of IST is based on complex ontology and makes it possible to formalize control processes in such dynamic SA as transport. SA under consideration consists of technical, transport facilities (vehicles, equipment, etc.), transport infrastructure facilities (buildings, stations, bridges, railways, repair depots, etc.), as well as links between all these objects.

IST design is carried out at various levels of abstraction (detailed reflection of elements, properties, characteristics, etc.). Such structure can be implemented with varying degrees of detail, depending on the characteristics of the design tasks.

The creation of formal system that describes the behavior of controlled complex dynamic object (which is IST) is carried out on the basis of conceptual model of the essential properties of studied SA, which determines construction of dynamic knowledge base of IS and provides the possibility of formal and rigorous definition of concepts and patterns of natural classification.

Conceptual model of ontology. The system that describes the knowledge base during the functioning of IST in real time contains elements that provide ontology modification based on standard procedures of complex ontology and meta-ontology. Building conceptual model of IST ontology involves the following steps:

1. Formalization of complex ontology:
 - Modernization of the classical model.
 - Modernization based on the system concept.
2. Formalization of meta-ontology:
 - Model based on the concept of the system.
 - Model based on formal theory.
3. Formalization of theoretical models of knowledge engineering:
 - Model "Field of knowledge".
 - Model "Pyramid of knowledge".
4. Formalization of ontology axioms:
 - Axioms of identification.
 - Axioms of planning.
 - Axioms of computation.

Objects in this ontological model are systematized according to the functional feature of their

properties, which are part of the class hierarchy. *Links* determine the structure of system, and *elements* determine the function of nodes in this structure. Structure can be refined into more detailed descriptions of specific classes of model objects by separating properties (at each level of model).

The considered classification can be refined (renamed, extended, supplemented by derived classes) depending on the task of information processing and changes in knowledge about IST. For example, class INFORMATION STRUCTURE in property classification can be refined by highlighting the properties STRUCTURE BY MANAGEMENT and STRUCTURE BY DATA. This will entail allocation in classification of components within the class INFORMATION COMMUNICATION of subclasses of communications COMMAND TRANSMISSION and DATA TRANSMISSION, which can be assigned appropriate designations.

When formalizing the task of building ontology knowledge base, the interpreted characteristics of the system improve and simplify its use for managing IST (including its design and maintenance), especially in emergency and extreme situations.

The ontology model used describes the computer interpretation (construction of formal system models) of SA related to the formalization of the task of monitoring the functioning of IST and modeling emergency and extreme situations that arise during operation.

Ontological model of SA. The development and formalization of complex ontology when creating design and maintenance management system IST involves formal representation based on the conceptualization of knowledge of SA model, which describes set of objects and concepts, knowledge about them and relationships between them.

Subject area DSA is part of reality to be reflected on the basis of intelligent technologies in order to obtain new information about its properties. *DSA* is interpreted as part of the real world that has semantic localization (spatial, temporal, functional, etc.).

Considering the *semantic space* of studied SD_{SA} , it is necessary to perform semantic localization of its subdomains SD_{SA_i} ($i=1, \dots, n$). $SD_{SA} = \{SD_{SA_1}, \dots, SD_{SA_i}, \dots, SD_{SA_n}\}$.

Semantic localization in IST is associated with definition of the boundaries of individual D_{SA} subdomains (SD_{SA_i}) in SD_{SA} semantic space that encompasses them. At the stage of knowledge formalization, the components of subdomains included in SA D_{SA} can be considered as set P of their semantic properties P_{ij} :

$$OM_{SD_{SA_1}} = \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1m}\}, \dots, OM_{SD_{SA_n}} = \{P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{nm}\}.$$

In this case, there is intersection of sets of semantic properties of different SD_{SA_i}

$$OM_{SD_{SA_1}} \cap \dots \cap OM_{SD_{SA_i}} \cap \dots \cap OM_{SD_{SA_n}} \neq \{0\}.$$

Which allows us to write down the criterion for the localization of D_{SA} in semantic space

$$OM_{SD_{SA_1}} \cap \dots \cap OM_{SD_{SA_i}} \cap \dots \cap OM_{SD_{SA_n}} = \{0\}.$$

Necessary criterion for the existence of SA D_{SA} is the distinguishability of its properties in presented semantic localization. For the set of properties P of model of SA D_{SA} under study, its unique identification follows. At the same time, the properties remain identical to themselves for time that is sufficient to construct SA D_{SA} model and use it in IST knowledge system.

When modeling IST processes, *functional completeness* and *logical integrity* of model are of great importance. The functional completeness of SA D_{SA} model does not imply the most complete reflection of the properties of objects, but only the fixation of those properties that are necessary and sufficient for solving the tasks of IST management (including its design and maintenance).

The criterion for the functional completeness of the SA model depends on the class of tasks being solved and requires the determination of the criterion for the depth of detail SA. The formal statement of problems allows us to highlight the features of the current situation, the modeling of which is necessary and sufficient for choosing solutions for the design and maintenance of IST.

The complex ontology that is used in the development of the IST management system (in particular, its design and maintenance) can be based on various formalizations.

Formalization of the ontology of SA. The conceptual foundations for formalizing ontologies of various SA were considered in [14, 17, 18]. In [14, the allocation of classes of terms, relations and

transformations corresponding to physical and abstract entities for solving SA problems (in our case, in transport) is described.

The SA representation serves as signature for the development of subject knowledge model. Let us define ontology of SA D_{SA} as:

$$Ont(D_{SA})_S = \langle T(S), R(S), Ax(S) \rangle,$$

where S (Subject) is set of SA D_{SA} objects, $T(S)$ is finite set of classes of terms (concepts) of SA D_{SA} that have features that make up their distinctive feature in ontology; $R(S)$ – finite set of relations between term classes; $Ax(S)$ is finite set of axioms (functions, interpretations) defined on ontology classes and relations.

A natural constraint imposed on the sets $T(S)$, $R(S)$, and $Ax(S)$ is their finiteness and non-emptiness. The elimination of the emptiness of the sets $R(S)$ and $Ax(S)$ makes it possible to use hierarchical system of concepts interconnected by various relationships.

Concepts are organized in hierarchies, the links within which are structured in such way as to carry out logical conclusion based on the transition from the general to the particular and vice versa.

Theoretical aspects of "knowledge engineering" when interpreting the behavior of complex object (technical, transport, intellectual, etc.): determine the basis for the formation of dynamic models "field of knowledge" and "pyramid of knowledge"; require clarification; should be focused on strategies for presenting and interpreting information in complex systems.

Let's consider these questions on the examples of complex ontology implementation when building the "field of knowledge" and "pyramid of knowledge" models.

The "field of knowledge" model is informal description of the main concepts and relationships between them, identified from the knowledge system of the studied SA. The formation of the "field of knowledge" is carried out at the stage of structuring and is the first step towards the formalization of knowledge. When designing and maintaining IST, the "field of knowledge" model should be considered as complex dynamic structure.

One of the directions for the implementation of modern trends in the construction of the "field of knowledge" model is associated with the concept of *ontological engineering* – one of the approaches to the semiotic modeling of SA [19].

The semiotic model of the "field of knowledge" of SA D_{SA} can be represented as follows:

$$SM_{D_{SA}} = \langle Sin, Sem, Pr \rangle,$$

where Sin is the syntax; Sem is the semantics; Pr is the pragmatics.

The operational model of SA D_{SA} within the framework of the semantic structure is represented as:

$$OM_{D_{SA}} = \langle Sc, Sf \rangle,$$

where Sc is the conceptual structure; Sf is functional structure.

The "field of knowledge" model is being improved on the basis of applied semiotics methods within the framework of the situational management approach [20]. The implementation of the approach to the formalization of the "field of knowledge" based on semiotic modeling opens up new possibilities for using complex ontology in formalizing the knowledge of complex systems.

The "pyramid of knowledge" model can be represented by the following interpretation:

$$F: Pkn \rightarrow Pkn^*,$$

where $Pkn = (S, T, R, St)$; $Pkn^* = (S, T^*, R^*, St^*)$; S is the set of SA objects; T^* – meta-concepts of higher level of abstraction than T ; R^* – meta-relations; St^* are meta-strategies.

An example of implementation of "pyramid of knowledge" is the interpretation of procedural component of IST knowledge base. The implementation of information transformation mechanisms in the "pyramid of knowledge" model depends on the complexity of current situation and is determined by different functional structures. One example of such structure is information flow when choosing the preferred solution in the IST process management system (including design and maintenance).

Ontological approach to IST design. The application of the ontological approach simplifies the process of optimal design, allows solving the main tasks of modern design at various stages of creating IST, and coordinating the parallel work of IST developers and the IST management system.

IST process management is process that includes, in particular, following steps:

Preparation of terms of reference for the development of IST and its monitoring.

Development of the SA model (with precise definition of the SA objects, their characteristics, properties and relationships), its verification and testing.

Development of IST architecture.

Development of the IST information base structure (knowledge base, database, ontology, meta-ontology, etc.) and its dynamic modification.

When implementing these stages, the technology of parallel design is used, which provides direct and feedback connection between the current and previous stages. When designing IST, it is advisable to use the decomposition method. Based on the basic principles of IST optimal design, knowledge-oriented information technologies are introduced into the design process using the example of applying the concept of ontological knowledge bases.

Ontological knowledge bases contribute to the presentation of design process data in the form of structure with clearly defined relationships between the various components of the process, the integration of various design data, and the organization of links between various stages and design tasks. By formal ontological model we mean triple:

$$O_M = \langle S, R, Fun \rangle,$$

where S is finite set of SA objects; R is finite set of relations between the SA objects; Fun is finite set of functions (interpretations) defined on objects. Consider the IST design ontology, which contains the concepts of SA, the interpretation of knowledge and relationships within this area.

Let us describe the ontological approach in the form of the following algorithm of actions:

- 1) compiling dictionary based on the terminology of SA for which IST is being designed;
- 2) using dictionary, obtaining ontology of SA that reflects the relationships between concepts;
- 3) verification by experts of the created ontology of SA, support and filling of the ontology.

The thesaurus of SA can be used as tool for standardization and formalization of knowledge, as well as for providing access to users who solve IST process management tasks (including design and maintenance).

Thesaurus of SA is designed to solve the following tasks:

classification and unification of the concepts of SA;

classification of methods and tasks of IST design;

construction of descriptions of methods and tasks of IST design in knowledge bases.

The IST process management ontology (including design and maintenance) uses thesaurus and is required to:

develop and fix common understanding of the area of knowledge under consideration;

present knowledge in form that is convenient for their processing in IST;

provide opportunity to obtain and accumulate new knowledge;

provide the possibility of reuse of knowledge (including reuse of ontologies).

To represent the IST design ontology, the ontology description language OWL (Ontology Web Language) [21] was chosen, which consists of the following components: classes, class properties, and individuals (representatives of classes or properties). The construction of the IST ontology is performed in the ontology editor Protégé [22].

The developed ontological model is represented as an ontograph. Protégé allows you to formally check the ontological model (in particular, check for the absence of errors, the presence of all necessary links and dependencies within the ontology).

Conclusions. The complex ontology used in IST is defined as semantically-oriented information environment of conceptual generalization, which provides the possibility of integrating knowledge while formalizing current information.

The main advantages of using the proposed ontological approach to managing IST processes, in particular, are:

compact representation of the knowledge system of SA (specification and conceptualization);

the possibility of searching for information in the knowledge system of the obtained ontology (obtaining reference and training information);

setting and solving the necessary applied tasks within the framework of SA (for example, tasks of design and maintenance IST);

possibility of gaining new knowledge and development of IST (management system of IST);

the possibility of using modern multi-agent technology, when each agent has its own ontological model.

The proposed ontological approach to IST control (management) allows moving to automatic process control (if there are appropriate restrictions). In the absence of restrictions, but in the presence of ontological models of individual agents, automated control is used.

The developed ontology of SA is planned to be expanded and supplemented with new components, imposing appropriate restrictions.

The program code in OWL obtained from the simulation results in Protégé can be further used inside the knowledge base, processing this information in various software applications, including Java applications.

REFERENCES

1. Gribova, V.V., & Fedorishchev, L.A. (2017) Software tool for virtual environment development based on cloud platform.. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 56, 937-944. Retrieved from <https://doi.org/10.1134/S1064230717060065>.
2. Martin, F.R. (2019). How important are semantic networks in artificial intelligence. Retrieved from <https://analyticsindiamag.com/semantic-networks-ai/>
3. Schmidhuber, J. (2015). Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*, 61, 85-117.
4. Kupriyanovsky, V., & Pokusaev, O., & Volokitin, Y., & Namiot, D., & Petrunina, I., & Zazhigalkin, A. (2018). Formalized ontologies and services for high-speed and digital railways. *International Journal of Open Information Technologies*, 6(6), 69-86.
5. Types of Knowledge Representation (2021). Retrieved from https://www.brainkart.com/article/Types-of-Knowledge-Representation_8892/
6. Abar, S., & Theodoropoulos, G.K., & Lemariner, P., & OHare, G.M. (2017). Agent based modelling and simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, 13–33.
7. Leonard, N.E. (2014). Multi-agent system dynamics: Bifurcation and behavior of animal groups. *IFAC Annual Reviews in Control*, 38(2), 171-183.
8. Dorri, A., & Kanhere, S.S., & Jurdak, R. (2018). Multi-Agent Systems: A survey. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/324847369_Multi-Agent_Systems_A_survey.
9. Highnam, K. (2020). The Future of Multi-Agent Systems Research. Retrieved from <https://medium.com/@kwhighnam/the-future-of-multi-agent-systems-research-5aef163f1d69>.
10. Tkachenko, O., & Tkachenko, K., & Tkachenko, O. (2020). Using ontologies for control and planning in complex systems. *Annali d'Italia* 11 (1), 64-69. ISSN 3572-2436
11. Scherer, Matthew U. (2016). Regulating artificial intelligence systems: risks, challenges, competencies, and strategies. *Harvard Journal of Law & Technology*, 29 (2).
12. Ohnyevyy, O.V., & Zavorotnyy, M.V. & Ohneva, A.M. (2019). Metody stvorenniya mul'tyahentnykh system upravlinnya informatsiynomy resursamy u real'nomu chasi [Methods of creating multi-agent real-time information resource management systems]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Seriya: «Tekhnichni nauky» – Bulletin of Khmelnytsky National University. Series: "Technical Sciences"*, 4 (275), 106-110. Retrieved from <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2019-275-4-106-110> [in Ukrainian].
13. Nedashkiv's'kyi, O.L. (2014). *Planuvannya ta proektuvannya informatsiynykh system [Planning and design of information systems]*. Kyiv: State.University of Telecommunications [in Ukrainian].
14. Tkachenko, O.I., & Tkachenko, K.O., & Tkachenko, O.A. (2020). Vykorystannya ontolohichnykh modeley v tsyfrovizatsiyi transportu: problemy ta perspektyvy [The use of ontological models in the digitization of transport: problems and prospects]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi – Transport systems and technologies*, 35, 113-120 [in Ukrainian].
15. Sanfilippo, E.M. (2018). Feature-based product modelling: an ontological approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(11), 1097-1110.
16. Munira K., & Anjumb, M.Sh. (2017). The use of ontologies for effective knowledge modelling and information retrieval. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210832717300649>. doi: 10.1016/j.aci.2017.07.003.

17. List, C. (2018). Levels: descriptive, explanatory, and ontological. Retrieved from http://eprints.lse.ac.uk/87591/1/List_Levels%20descriptive_2018.pdf.
18. Greger, S.E., & Porshnev, S.V. (2013). Building an ontology of information system architecture. *Fundamental Research*, 10, 2405-2409.
19. Lyashenko, D.N. (2015). *Semioticheskoye modelirovaniye real'nosti [Semiotic modeling of reality]*. Odessa: Pechatnyy dom.
20. Tkachenko, O. & Tkachenko, A., & Tkachenko K. (2020). Ontological Modeling of Situational Management. *Digital platform: information technology in the sociocultural area*. 3 (1), 22-32.
21. Web Ontology Language (OWL). Retrieved from <https://www.w3.org/OWL/>.
22. Protégé. Retrieved from http://protrgrwiki.stanford.edu/index.php/Protégé_UserDocs.

Костянтин Ткаченко¹, Ольга Ткаченко²

¹ Кафедра інформаційних технологій та дизайну, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0549-3396>

² Кафедра інформаційних технологій та дизайну, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1800-618X>

МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ НА ТРАНСПОРТІ

У статті розглядаються актуальні проблеми моделювання процесів управління в інтелектуальних системах на транспорті. Управління такими системами передбачає також контроль і моніторинг процесів їхнього проектування та супроводження. В статті запропоновано онтологічну модель управління процесами інтелектуальних систем на транспорті. Запропонована онтологічна модель необхідна для формування загального розуміння сутностей предметної області, якою є транспортна сфера (транспортні системи, транспортні підприємства, транспортні засоби та транспортна інфраструктура). Запропонована онтологічна модель сприяє представленню знань у вигляді, який є зручним для їхньої обробки в інтелектуальній системі на транспорті; забезпеченню можливості отримання та накопичення нових знань.

У запропонованому онтологічному підході забезпечується багаторазове використання знань та, раніше розроблених, онтологій. Запропонований підхід дозволяє використовувати сучасну мультиагентну технологію, коли кожному агенту відповідає своя онтологічна модель. Розглянутий онтологічний підхід до моделювання управління інтелектуальними системами дозволяє перейти до автоматичного управління процесами в цих системах (за наявності відповідних обмежень).

Розроблену онтологічну модель предметної галузі планується розширити та доповнити новими складовими, наклавши відповідні обмеження. Отриманий за результатами моделювання в Protégé програмний код OWL можна надалі використовувати всередині бази знань інтелектуальної системи, обробляючи цю інформацію в різних програмних застосунках, в тому числі, і Java-застосунках.

Ключові слова: управління, проектування, інтелектуальна система, мультиагентна технологія, інформаційні ресурси, база знань, моделювання, онтологічна модель.

Halyna Holub^{1}, Vitalii Kharuta², Olga Zaiats³, Mykola Tkachuk⁴*

¹Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

²Department of Transport Law and Logistics, National Transport University, M.Omelianovycha - Pavlenka str., 1, Kyiv, 01010 Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8897-7558>

³Department of Management, National Transport University, M.Omelianovycha - Pavlenka str., 1, Kyiv, 01010 Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6574-4516>

⁴Alarm and Communication Service of the Regional Branch of the South-Western Railway of JSC Ukrzaliznytsia, Lysenko str, 6, Kyiv, 01054, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9683-4303>

*Corresponding author: golub_gm@gsuite.duit.edu.ua

RESEARCH OF BIOENERGY POTENTIAL ON IMPROVING ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTALITY IN TRANSPORT PROJECTS

The article considers the problems of energy efficiency management of the rolling stock of the transport sector. The operation and operation of vehicles are analyzed and it is determined that road transport is the main consumer of energy resources in the transport sector, which is about 90%. Road transport requires 6.5 times more fuel than rail, and 5 times more fuel than sea or river.

It has been studied that the transport sector has a negative impact on environmental friendliness due to high emissions. To successfully solve this problem, it is necessary to use bioenergy, which will increase the energy efficiency and environmental friendliness of the transport sector and is a strategy for the development of the transport sector of the country and the European Union.

An analytical review of legislative acts, namely EU directives and national transport strategy for the period up to 2030, which regulate the promotion of energy efficiency in transport.

The main groups of tools and the use of information technology are considered, which allow to achieve the set goals in the development of energy efficiency in transport.

The impact of alternative fuels resulting from the processing of biological waste or biological raw materials for the country's transport sector, in particular road transport, which will significantly reduce CO₂ emissions, has been studied. Biofuels are able to provide clean energy for all modes of transport and are currently the most important type of alternative fuel. Its influence on improving the energy efficiency and environmental friendliness of the transport sector has been studied.

Keywords: *energy efficiency, information technologies, transport sector, bioenergy, monitoring, diagnostics, environmental friendliness.*

Introduction. Ukraine's transport sector is a critical sector for reducing greenhouse gas emissions. Transport accounts for about 19% of the world's energy use and a quarter of CO₂ emissions related to the fuel and energy sector. The entire transport system of Ukraine is dependent on imports of oil and gas, which leads to increased energy efficiency in transport. In recent years, there has been a decrease in energy consumption. If we talk about road transport, it is the main consumer of energy resources in the transport sector, which is about 90%.

Comparing the transportation of the same cargo on different modes of transport, road transport requires 6.5 times more fuel than rail, and 5 times more than sea or river [1].

In the European Union (EU), the transport sector is one of the biggest air pollutants, a source of

greenhouse gas emissions, and has a negative upward trend. According to [1], from 1990 to 2012, emissions in the EU increased by 20%.

To achieve the targets set by the EU Transport White Paper, emissions must be reduced by 67% by 2050. The current EU transport system cannot be called sustainable either in terms of energy consumption or the types of energy resources used.

To ensure the energy efficiency of the transport complex, it is necessary to use alternative fuels from renewable raw materials. What is the basis of the strategy for the development of the transport sector in terms of improving energy efficiency and environmental friendliness.

The purpose and objectives of the study. The aim of the study is to analyze the impact of the use of alternative fuels from renewable raw materials for the efficient operation of the transport sector and increase energy efficiency and environmental climate of our country.

Objectives of the study: 1. To analyze the problems of the impact of the transport sector on environmental friendliness and energy. 2. Investigate solutions that will increase energy efficiency. 3. Investigate the impact of alternative sources of fuel from renewable raw materials on improving energy efficiency and environmental friendliness of the country's transport sector.

Materials and methods of research. The strategy of development of the transport sector of the country and the EU is to ensure the energy efficiency of the transport complex is the use of bioenergy. Therefore, the EU is trying to build a legislative framework that would maximize the development of energy efficiency in transport. In particular, key EU legislation in this area:

Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of renewable energy sources establishes a general legal framework for the production and promotion of energy from renewable sources. Among other things, it sets a target for the use of 10% of RES energy in the transport sector.

Directive 2014/94/EC “On the development of infrastructure for alternative fuels”. The key objectives of the directive are: reducing the dependence of EU transport systems on oil, reducing greenhouse gas emissions under the EU Climate and Energy Package, improving urban air quality, increasing the competitiveness of the European economy, stimulating innovation and economic growth. The directive sets out the steps to be taken to develop the EU's single transport market, namely the deployment of a network of electricity and bio-filling stations, the development of harmonized EU standards and common technical specifications, and the provision of relevant, consistent and understandable information to consumers [2-3].

Directive 2009/30/EC on fuel quality introduces mechanisms for monitoring and reducing greenhouse gas emissions. The provisions of the Directive apply to all types of petrol, diesel and biofuels used in motor vehicles, as well as diesel used for off-road vehicles.

Directive 2009/33/EC “On the development of environmentally friendly and energy efficient vehicles” is aimed at the widespread introduction of environmentally friendly cars. It stipulates that the energy and environmental consequences of the use of cars throughout their lives should be taken into account when purchasing cars, as provided for in the Public Procurement Directives and the Civil Service Regulation. If such impacts are to be monetized and taken into account when deciding to purchase a car, the costs associated with operating the car must be calculated according to the general rules set out in the Directive. EU Regulation №443/2009 requires a reduction in CO₂ emissions from new cars to an average of 120 g / km and a further reduction to 95 g / km from 2020. This requirement alone will achieve more than 30% of the emission reduction target for the non-ETS sector. The main goal of the Roadmap to a Single European Transport Area is to define a long-term strategy for the development of the EU transport system in order to make it more efficient, safe and secure. The roadmap is designed for 2050 with intermediate targets for 2020 and 2030 and sets ambitious targets for energy efficiency, reduction of oil dependence and greenhouse gas emissions, and technological development.

The National Transport Strategy for the period up to 2030, which was adopted by our Government in 2018, is dedicated to the issue of increasing energy efficiency and environmental friendliness of transport, namely:

improving pedestrian infrastructure, parking areas, limiting the speed of vehicles and developing infrastructure for bicycles;

establishing the obligation to comply with environmental standards;

introduction of economic incentives for the transition of freight and passenger traffic to more environmentally friendly rail and water transport; • introduction of a system of tolls from road users depending on the ecological class of the car;

introduction of economic measures to stimulate the use of more environmentally friendly modes of transport in cities (electric cars, public transport, bicycles);

stimulating the use of alternative energy sources, as well as environmental modes of transport and special equipment, etc..

To develop energy efficiency in transport, the so-called main groups of tools are used, with which you can achieve your goals. Consider these groups of tools. The most effective group of tools are fiscal instruments, which operate on the principle of paying more for less environmentally friendly transport and reducing the cost of purchasing or using more energy-efficient and environmentally friendly cars. In particular, the fuel tax has been introduced in many countries around the world and has a significant impact on the energy efficiency of used cars. Another group that is no less effective is the infrastructure tools that introduce charging station networks that will reduce emissions. Another area of work to reduce emissions from transport should be the development of infrastructure for cyclists and pedestrians. EU administrative countries have been requiring mandatory certification of cars according to environmental standards since 1988. Today, the EU has Euro-6 standards that set minimum environmental requirements for cars manufactured or imported into the EU. In Ukraine, the introduction of Euro-6 standards was postponed until 2020. To monitor the current technical condition of cars in many EU countries introduced a mandatory roadworthiness test, which, including compliance with environmental requirements is also checked. If the level of harmful emissions is exceeded, the car will not pass the technical inspection and will not be allowed to operate.

The next group of information tools. Improving energy efficiency and environmental friendliness in transport is impossible without raising the awareness of end users. That is why it is important to conduct information campaigns on the use of bioenergy and transport.

Therefore, the development strategy provides for the mandatory use of liquid biofuels (biocomponents) in the field of transport.

The main purpose of the draft Law is to create an effective legislative mechanism for the development of a competitive market for the production and use of bioethanol and biocomponents in transport in Ukraine.

The draft law is aimed at implementing the provisions of Directive 2009/28 / EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources in energy consumption of RES in transport and the implementation of Ukraine's commitments. accession to the Energy Community [4-7].

The project proposes to legislate the mandatory content of liquid biofuels (biocomponents) in all volumes of automotive gasoline released from places of fuel production, places of wholesale trade in fuel and places of retail sale of fuel, except for gasoline with an octane number of 98 and above and gasoline supplied for the needs of the Ministry of Defense, the State Reserve and for the creation of minimum reserves of oil and petroleum products.

According to the project, from May 1, 2022, the content of liquid biofuels in all volumes of gasoline should be at least 5 percent.

Biofuels have been around for many years. In fact, people have been using vegetable oil-based diesel engines for much longer than petroleum-based diesel fuel. Over the last decade, biofuels have come to the fore as a key way to address our carbon footprint and our dependence on fossil fuels.

According to the 2014 EU Fuel Directive, biofuels are currently the most important type of alternative fuel, accounting for 4.7% of the total fuel used by EU vehicles in 2011. It will also significantly reduce CO₂ emissions. Biofuels are able to provide clean energy for all modes of transport.

Biofuels are an alternative type of fuel that results from the processing of biological waste or biological raw materials. For road transport, it can be in the form of biodiesel or biogasoline, where a certain amount of biofuel is mixed with traditional gasoline or diesel fuel. In fact, EU Directive 2009/30 / DC allows the mixing of ethanol with gasoline up to 10% of the volume and content of FAME (biodiesel methyl ester of fatty acids made from natural fats) in diesel fuel not more than 7%. In April 2018, the UK government announced its goal to double the current amount of bio-matter in diesel fuel from 4.75% to 9.75% by 2020 and then to 12.4% by 2032. Most fuels already include some bio-raw materials, and we don't even realize it.

Sources of biofuels include corn, sugar cane, palm oil, rapeseed oil, soybeans and ethanol. Crop-based sources, such as rapeseed oil, help to "remove" CO₂ from the atmosphere during the growing process, helping to compensate for CO₂ emissions from oil combustion. For example, bioethanol is classified as carbon-neutral because any CO₂ released during production is removed from the environment by the crops themselves. However, the use of raw materials for fuel has some disadvantages. Withdrawal of land that was previously used for growing crops may affect the price of crops. Biodiesel currently uses about 30,000 square kilometers of arable land across the EU, and is expected to increase in the future.

Companies around the world are investing and implementing biofuels in a variety of ways. In the UK, the global fast food corporation McDonald's is converting vegetable oil from their kitchens into biodiesel, which they use to refuel more than half of their trucks. The United States recycles waste from Auckland, California. In Australia, a Queensland refinery produces biofuels from recycled tire waste. Laboratory tests have shown that this diesel is no different from a diesel derived from fossil fuels, and has all the necessary characteristics.

The growing use of biofuels has a significant impact on lubricants. In any engine, a small amount of fuel goes into the oil. The current generation of engines with low emissions and higher performance operates at higher temperatures. This means that lubricants also work at higher temperatures than in the past [8, 11]. Biofuels are less stable than other fuels and are easily oxidized. The combination of higher temperatures and biofuels causes increased oxidation, which in turn creates carbon deposits in the engine and reduces the viscosity of the lubricant. Biodiesel, like all fuels, gets into the oil pan, where it contributes to the deterioration of oil quality.

With regard to lubricants, the wider use of biofuels raises two key issues. The first is the deposits formed as a result of oxidation, they limit the flow of oil and lead to increased wear and, consequently, reduce engine life. Second, the increase in carbon deposits due to oxidation in the grooves of the piston rings, which limit the movement of the rings and increase the friction and wear of the cylinders. These deposits are abrasive on the parts they come in contact with and lead to higher component wear.

As engines and fuels change, lubricants must adapt to new conditions. To solve the problem of oxidation created by fuel, motor oils are developed using high-quality base oils and additives to increase resistance to oxidation [9-10]. Currently, this applies to oils that are designed and tested for vehicles running on 20% biofuels. However, if the engine was running on 100% biofuel, it would need a completely different oil, as well as different intervals for its replacement.

Any car engine oil contains 70 to 80% base oil, so it is possible to increase the use of renewable materials, as do fuel companies. They can be obtained from vegetable sources such as rapeseed oil or palm oil.

Secondary lubricants can also play a big role. Engine oil does not wear out - it is contaminated with deposits in the engine. With proper collection, treatment and cleaning procedures, used engine oil can be converted to high quality base oil and mixed with high quality lubricants.

«One gallon of used engine oil provides the same 2.5 liters of [base] oil as 42 gallons of crude oil».
US Environmental Protection Agency

In the short term, biofuel use is expected to continue to grow. In the long run, electric cars will dominate [12-14]. This will require further innovation in the lubricants industry, as electric vehicles do not require standard motor oils at all. However, they need advanced cooling systems and transmission lubricants to ensure efficient operation of vehicles. Meanwhile, the recommendations for users remain the same: use the right high-quality oil from a well-known supplier, which includes the latest additives to combat the effects of biodiesel and meet all the needs of modern engines. The balance of each additive in the finished lubricant is very complex and is the result of many studies and tests. The slightest over-processing of an element by only 0.001% can destroy the whole balance.

In the early 2000s, some biodiesel consumption was already recorded, especially in Germany and France. In the period from 2004 to 2010 there was a significant increase in biofuels to the overall level of 4% (in terms of energy content) of transport energy. However, growth halted until 2016, probably due to uncertainty over the restrictions on indirect land use change (ILUC). In recent years (following the publication of the ILUC Directive), growth has resumed. On average, biodiesel (FAME and HVO together) accounted for 6.4% of diesel energy consumption in 2019. Bioethanol averaged 3.7% of gasoline energy consumption [15-16].

About 30% of biofuels consumed in the EU-28 in 2019 are classified as "modern biofuels", ie they are produced from residues and waste (including used oils for biodiesel). They can be doubled to achieve 10% RES in transport at EU level.

The share of electricity (one third of which is renewable) is 1.7% of total energy consumption by transport. This is mostly the case for rail transport - the use of electricity in motor vehicles in 2019 is still insignificant (0.08% of total energy consumption in transport), but growth can be expected in the coming years.

Conclusions. The work of the country's transport industry is analyzed, in particular the problem of impact on the environment and energy. The shortcomings of the impact of the functioning of the transport sector on the environment have been identified. It is proposed to solve the problem by using bioenergy, namely biodiesel and biogas. The development of bioenergy makes it possible to expand the range of available energy sources, strengthen the country's energy security, promote energy independence of the state, improve the environment. The experience of using this type of biofuel in different countries of the world is analyzed and it is determined that the EU will reduce the evaporation of fossil fuels by 50% by 2030, and by 100% by 2050. It is determined that the increase of energy efficiency and environmental friendliness is possible through the use of alternative fuels from renewable raw materials.

REFERENCES

1. Dombrovska G.P. & Demyanenko T.I. (2010). Al'ternatyvna enerhetyka – novi innovatsiyni tekhnolohiyi [Alternative energy - new innovative technologies]. *Vestnyk NTU "KHPY": Tekhnichnyy prohres ta efektyvnist' vyrobnytstva - Bulletin of NTU "KhPI": Technical progress and production efficiency*, 16, 54-59. Retrieved from <http://archive.kpi.kharkov.ua/View/19861/> [in Ukrainian].
2. Bioenerhetychna asotsiatsiya Ukrainy. Dorozhnya karta rozvytku bioenerhetyky v Ukraini do 2050 roku ta Plan diy do 2025 roku [Bioenergy Association of Ukraine. Roadmap for the development of bioenergy in Ukraine until 2050 and the Action Plan until 2025]. *uabio.org*, Retrieved from <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/11/Zvit-D5.-Dorozhnya-karta-rozvytkubioenergetyky-v-Ukrayini-do-2050-roku-i-Plan-dij-do-2025.pdf> [in Ukrainian].
3. Begun S.V. (2020). Rozvytok bioenerhetyky v Ukraini: zastosuvannya dosvidu YES. [Development of bioenergy in Ukraine: application of EU experience]. *Enerhetychna ta tekhnohenna bezpeka. Seriya «Natsional'na bezpeka - Energy and man-made Security. National Security Series»*, 28,1-19 [in Ukrainian].
4. Melnychenko, O.I., Kulbovskiy, I.I., Holub, H., & Kharuta, V. (2020). Aspekty metrolohichnoho zabezpechennya tekhnolohichnykh protsesiv informatsiyno-vymiryuval'nykh system v proektakh infrastruktury transportu [Aspects of metrological support of technological processes of information and measuring systems in transport infrastructure projects]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu: Tekhnichni nauky - Bulletin of the National Transport University: Technical Sciences*, 1 (46), 226-235 [in Ukrainian].

5. Association Agreement between the European Union and its Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu>.
6. European Energy Security Strategy. Brussels, 28.5.2014. COM (2014) 330 final. Retrieved from <https://www.eesc.europa.eu/resources/docs/european-energy-security-strategy.pdf>.
7. Kaletnik G., Honcharuk I., Okhota Y. (2020). The Waste-Free Production Development for the Energy Autonomy Formation of Ukrainian Agricultural Enterprises. *Journal of Environmental Management & Tourism*. V. 11. №. 3 (43). P. 513-522.
8. Holub, H., Kulbovskiy, I.I. (2016). Doslidzhennya ta analiz normatyvnoyi ta normatyvno-tekhnichnoyi dokumentatsiyi, yaki zabezpechuyut' informatsiyu bezpeku SMART GRID system [Research and analysis of normative and normative-technical documentation that ensure information security of SMART GRID systems]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti - Information and control systems for railway transport*, 3, 50 – 57.
9. Maack J. Scenario analysis: A tool for task managers. Social Development Paper. 2001. No. 36. World Bank, Washington, DC. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.199.1964>.
10. Medipally S. R., F. Md. Yusoff S. Banerjee, M. Shariff. Microalgae as Sustainable Renewable Energy Feedstock for Biofuel Production. *BioMed Research International*. 2015. March (22). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1155/2015/519513>.
11. OECD-FAO Agricultural outlook 2020-2029. Retrieved from <https://www.oecd.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-19991142.htm>
12. Pryshliak N., Tokarchuk D. Socio-economic and environmental benefits of biofuel production development from agricultural waste in Ukraine. *Environmental & Socio-economic Studies*. 2020. V. 8. №. 1. P. 18-27.
13. Shpykuliak O., Bilokinna I. (2019). Green cooperatives in the formation of an institutional mechanism of development of alternative power engineering in the agrarian sector of the economy. *Baltic Journal of Economic Studies*. V.5 № 2. P. 249-255. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2019-5-2-249-255>
14. Luk'ianykhina O.A. & Vakulenko I.A. (2011). Vyznachennya napryamiv rozvytku al'ternatyvnoyi enerhetyky v konteksti vyrobnytstva biopalyva [Defining areas of alternative energy in the context of biofuels production]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu - Bulletin of Sumy State University*, 1, 27 – 33 [in Ukrainian].
15. Pivnyak G.G. & Scaper F.P. (2013). Al'ternatyvna enerhetyka v Ukraini [Alternative energy in Ukraine]. *Dnipropetrovs'k: Nats. him. un-t. D.: NHU* [in Ukrainian].
16. WBA Global Bioenergy Statistics (2020, December 30). Retrieved from <http://www.worldbioenergy.org/uploads/201210%20WBA%20GBS%202020.pdf>.

Галина Голуб¹, Віталій Харута², Ольга Заяц³, Микола Ткачук⁴

¹Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

² Кафедра транспортного права та логістики, Національний транспортний університет, вул. М.Омельовича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8897-7558>

³ Кафедра менеджмента, Національний транспортний університет, вул. М.Омельовича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6574-4516>

⁴Служба сигналізації та зв'язку регіональної філії «Південно-Західна залізниця» АТ «Укрзалізниця», вул. Лисенко, 6, м. Київ, 01054, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9683-4303>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ БІОЕНЕРГЕТИКИ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ В ПРОЄКТАХ ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто проблеми управління енергоефективністю рухомого складу транспортного сектору. Проаналізовано роботу та експлуатацію транспортних засобів та визначено, що автомобільний транспорт є основним споживачем енергетичних ресурсів у транспортному секторі, що становить близько 90%. Для перевезень автомобільним транспортом потрібно у 6,5 разів більше палива, ніж залізничним, і у 5 разів більше ніж морському чи річковому.

Досліджено, що транспортний сектор має негативний вплив на екологічність, завдяки великому обсягу викидів. Для успішного рішення даної проблеми необхідно застосування біоенергетики, що дозволить підвищити енергоефективності і екологічність транспортного

сектору та є стратегією розвитку транспортного сектору країни і країн Європейського Союзу.

Проведено аналітичний огляд законодавчих актів, а саме: директив ЄС та національної транспортної стратегії на період до 2030 року, які регламентують стимулювання розвитку енергоефективності на транспорті.

Розглянуті основні групи інструментів та використання інформаційних технологій, які дозволяють досягти поставлених цілей в розвитку енергоефективності на транспорті.

Досліджено вплив альтернативного виду палива, який отримується в результаті переробки біологічних відходів або біологічної сировини для транспортного сектору країни, зокрема автомобільного транспорту, що сприятиме істотному скороченню викидів CO₂. Біопаливо здатне забезпечити чисту енергію для всіх видів транспорту та в даний час є найбільш важливим типом альтернативних видів палива. Досліджено його вплив на підвищення енергоефективності та екологічності транспортного сектору.

Ключові слова: енергоефективність, інформаційні технології, транспортний сектор, біоенергетика, моніторинг, діагностика, екологічність.

Інна Саяпіна^{1*}

¹ Доцент кафедри “Системи штучного інтелекту та телекомунікаційні технології”, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

* Автор, відповідальний за листування: inna.saiapina@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ РЕЙКОВОГО КОЛА

У статті запропонована оптимізація існуючого пристрою підвищення завадостійкості тональних рейкових кіл. За рахунок того, що сигнальний струм у тональному рейковому колі являє собою сигнал тональної частоти, модульований імпульсами, то завдяки розмиканню тракту передачі тонального рейкового кола на вході колійного приймача під час інтервалів між імпульсами сигнального струму можна захистити колійний приймач від впливу на нього завад. Для врахування часу затримки на проходження сигналу з виходу колійного генератора на вхід колійного приймача у пристрої підвищення завадостійкості передбачена лінія затримки. Але час проходження сигнального струму у тракці тонального рейкового кола може коливатись залежно від його параметрів роботи. Для урахування цих коливань та підвищення ефективності виключення завад в інтервалах між імпульсами корисного сигналу запропонований метод адаптивного управління лінією затримки, який дозволить адаптувати параметр часу затримки залежно від довжини рейкової лінії, несучої частоти сигналу, опору ізоляції та частоти модулюючого сигналу. Завдяки вирішенню задачі класифікації даних, що містять інформацію щодо впливу параметрів роботи тонального рейкового кола на час проходження сигналу, було обрано оптимальну структуру моделі на основі нейронних мереж, яка реалізує метод адаптивного управління лінією затримки.

Ключові слова: тональне рейкове коло, класифікація, інтелектуальний аналіз даних, завадостійкість, нейронні мережі, база даних.

Вступ. Підвищення швидкостей руху поїздів висуває нові вимоги щодо заходів з вдосконалення та модернізації систем, які відповідають за безпеку процесу перевезень. Важливим елементом даних систем є рейкові кола, від надійності роботи яких залежить робота систем залізничної автоматики.

Для вирішення проблеми відмов рейкових кіл у зв'язку з несправністю ізолюючих стиків стали впроваджуватися безстикові рейкові кола, зокрема тональні рейкові кола (ТРК). Вони працюють у складних умовах дії великої кількості завад від тягового струму, атмосферних впливів, завад, викликаних впровадженням нових перспективних видів електрорухомого складу, що негативно впливає на забезпечення електромагнітної сумісності роботи ТРК [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для вирішення проблеми завадостійкості ТРК у різних країнах продовжують розроблятися модернізовані види ТРК [3-5].

Розвиток технологій дозволяє використовувати як апаратні рішення на основі нової перспективної елементної бази, так і ефективні програмні алгоритми. Перспективним напрямом є впровадження новітніх технологій та алгоритмів штучного інтелекту для покращення ідентифікації несправностей, прогнозування відмов та підвищення завадостійкості

ТРК [6]. Для вирішення даних задач дослідники застосовують такі засоби, як нейронні мережі [7, 8], нейро-нечітку логіку [9], вейвлет-перетворення [10], глибинну мережу переконань [5] алгоритм комбінованого дерева рішень та теорію множин [11], метод опорних векторів [12], алгоритм динамічного трансформування часу [13]. Використання сучасних технологій дозволяє значно підвищити характеристики надійності ТРК, тому актуальним є задача впровадження їх для модернізації видів ТРК, що застосовуються на залізницях України.

Мета і завдання дослідження. Метою проведеного дослідження є застосування перспективних засобів штучного інтелекту і інтелектуального аналізу даних для покращення завадостійкості ТРК, що застосовуються на залізницях України. Для цього вирішуються такі завдання:

- підвищити ефективність відомого пристрою підвищення завадостійкості ТРК за рахунок розробки методу адаптивного управління лінією затримки;
- проаналізувати вплив параметрів роботи ТРК на величину часу затримки, виконавши класифікацію даних з застосуванням алгоритму дерева рішень;
- розробити модель реалізації адаптивного методу управління лінією затримки.

Матеріали та методи дослідження. Відомий пристрій підвищення завадостійкості ТРК [14], який дозволяє виключити надходження завад на вхід колійного приймача за рахунок розмикання тракту передачі сигналу на час інтервалу між імпульсами сигнального струму ТРК. Сигнальний струм тональних рейкових кіл третього покоління (ТРК-3), що використовуються на українській залізниці, являє собою сигнал несучої тональної частоти, що модулюється імпульсами з частотою 8 або 12 Гц. В інтервалах між цими імпульсами ніякого корисного сигналу для колійного приймача не надходить, але можуть надходити завади, що діють на рейкове коло. Тому для виключення дії цих завад на вході колійного приймача підключається керований електронний ключ, який розмикає тракт по керуючому сигналу, що надходить з генератора одиничного імпульсу. Питання синхронізації розмикання електронного ключа саме під час інтервалу між імпульсами вирішується таким чином. Корисний сигнал, що подається у тракт ТРК, одночасно з тим подається ще й на лінію затримки, час затримки якої відповідає часу проходження корисного сигналу з виходу колійного генератора через рейкову лінію на вхід колійного приймача. Вихід лінії затримки підключено до входу генератора одиничного імпульсу, який виробляє керуючий імпульс, за яким електронний ключ і розмикає тракт. Для ефективної роботи даної схеми слід зазначити, що тривалість імпульсу генератора одиничного імпульсу повинна відповідати частоті модуляції корисного сигналу, а лінія затримки повинна бути регульованою відповідно до часу проходження сигналу по тракту, щоб з однієї сторони не викликати хибну зайнятість рейкового кола, а з іншої сторони виключити вплив максимуму завад на колійний приймач. Але час проходження сигналу у рейковому колі є змінною величиною, яка залежить від умов роботи ТРК. І чим точніше цей час буде визначений, тим вищу завадостійкість ТРК можна буде забезпечити. Тому для вирішення задачі точного визначення часу затримки запропоновано розробити метод адаптивного управління лінією затримки, що полягає в точному налаштуванні часу затримки сигналу залежно від параметрів роботи ТРК: частоти несучого сигналу, довжини ТРК, опору ізоляції та частоти модуляції.

Для аналізу впливу даних параметрів роботи ТРК на час розповсюдження сигналу використана імітаційна модель ТРК [15], яка була перевірена на адекватність [16]. За допомогою моделювання створено базу даних з 518 вимірювань.

За допомогою пакету інтелектуального аналізу даних для Excel виконана класифікація даних на основі алгоритму дерева рішень з метою визначення ключових параметрів, що впливають на величину часу затримки (рис. 1).

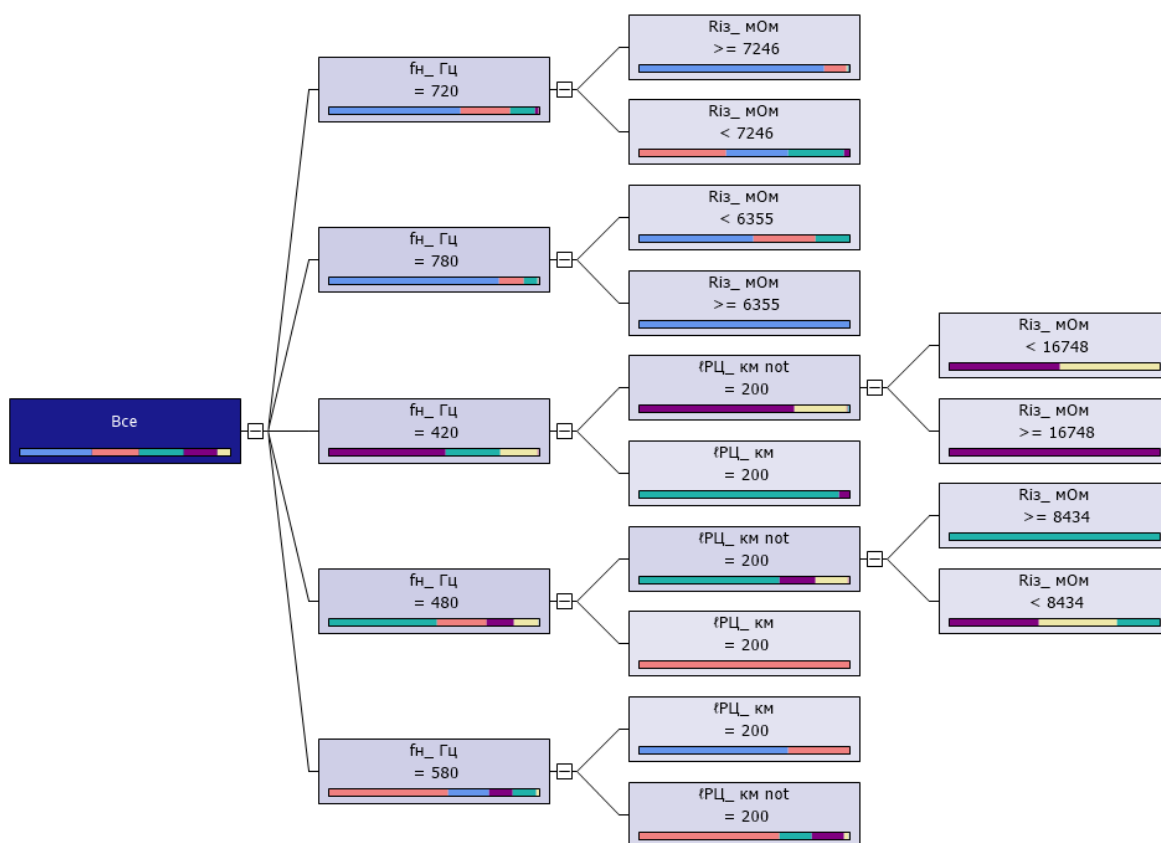


Рис. 1. Дерево рішень для параметру часу затримки, отримане за результатами класифікації даних

При класифікації алгоритм розподілив діапазон значень величини часу затримки сигналів на 5 інтервалів, кожен з яких позначений певним кольором на гістограмі дерева рішень.

Таблиця 1. Позначення інтелектуального аналізу даних

Значення інтервалу t_z , мс	Кількість значень t_z , що відповідають інтервалу	Імовірність, %	Гістограма
< 0,35	118	32,06	Blue
0,35-0,47	83	22,8	Red
0,47-0,56	79	21,75	Green
0,56-0,67	59	16,46	Purple
$\geq 0,67$	23	6,93	Yellow

Результати класифікації показують, що основним фактором, який впливає на значення часу затримки, є частота несучого сигналу. Завдяки цим висновкам інтелектуального аналізу було вирішено обрати структуру моделі адаптивного пристрою управління лінією затримки, реалізовану за допомогою програмного комплексу Matlab, його розширень Simulink та Neural Network Toolbox і наведену на рис. 2. До складу даної моделі входять п'ять нейронних мереж, кожна з яких видає затримку для 5 відповідних частот, що використовуються у ТРК-3: 420 Гц, 480 Гц, 580 Гц, 720 Гц та 780 Гц. Для знаходження точного часу затримки на вхід моделі надходять вхідні дані, що складаються з значення частоти несучого сигналу, довжини ТРК, значення опору ізоляції рейкової лінії та частоти модуляції.

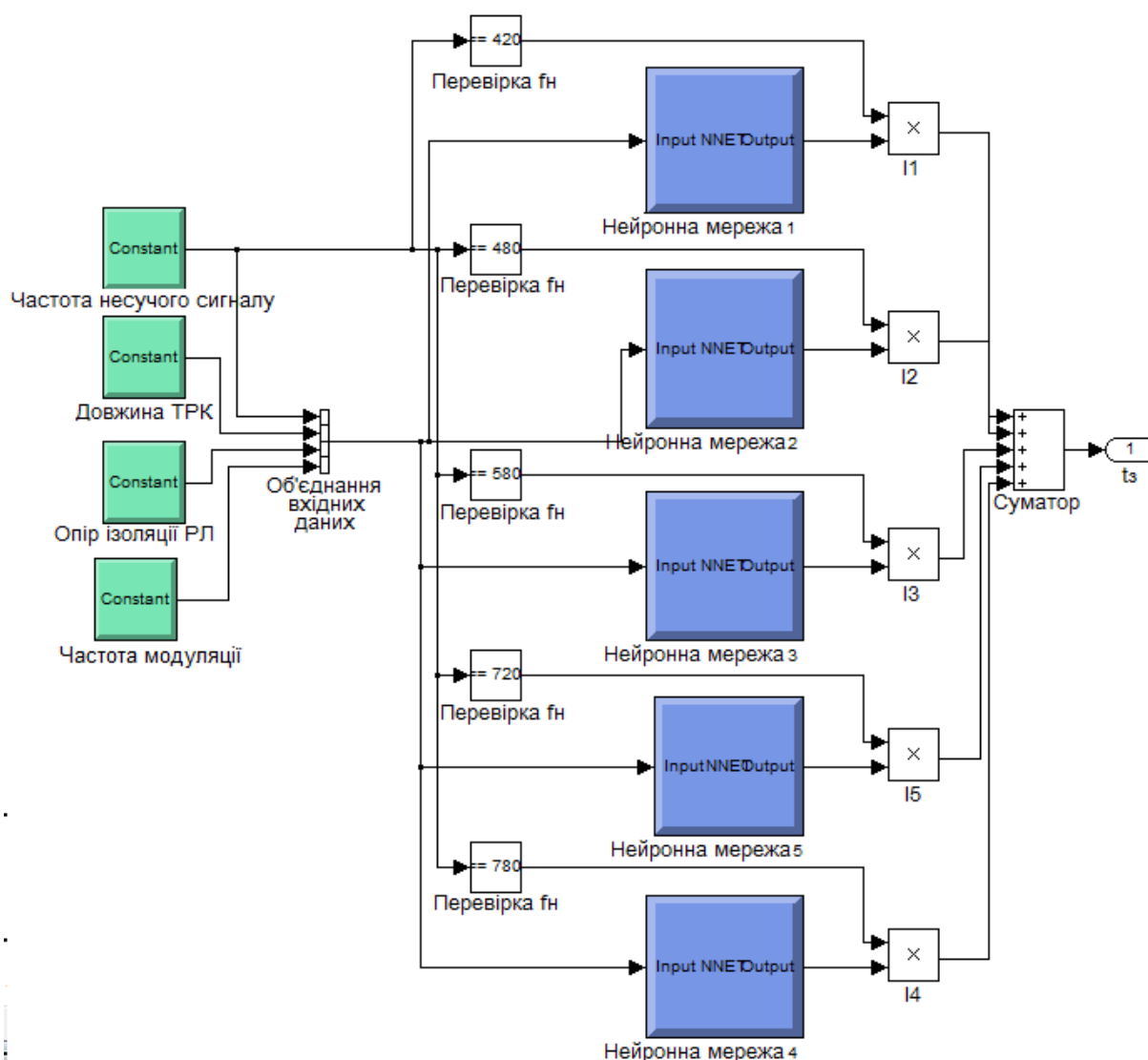


Рис. 2. Структура моделі адаптивного пристрою управління лінією затримки

Блоки перевірки частоти несучого сигналу перевіряють чи збігається частота несучого сигналу, що надходить у вхідних даних, з частотою відповідної нейронної мережі. Якщо так, то на вихід блоку перевірки надходить логічна одиниця, якщо ні – то логічний нуль. Таким чином блоки I1-I4 обнуляють свої виходи, якщо частота сигналу не відповідає, і на вихід суматора надходить лише значення часу затримки від нейронної мережі, яка видає точний результат саме для даної несучої частоти сигналу за результатами аналізу інших трьох вхідних параметрів: довжини ТРК, опору ізоляції та частоти модуляції. Створення окремої нейронної мережі для кожної несучої частоти сигналу дозволяє підвищити точність результату та зменшити похибку моделювання.

Нейронні мережі являють собою перцептрон і мають структуру з прямим розповсюдженням сигналу і зворотним розповсюдженням помилки. Активаційною функцією є гладка і безперервна функція гіперболічного тангенсу.

Чотири нейронні мережі, які адаптують величину затримки для сигналів з несучими частотами 420 Гц, 480 Гц, 580 Гц і 780 Гц були навчені за допомогою методу Левенберга-Марквардта [17, 18], призначеного для оптимізації параметрів нелінійних регресійних моделей.

Вхідний сигнал має вигляд $y = f(w, x)$, де $f(w, x)$ є регресійною моделлю, що відображає залежність між вхідними і вихідними сигналами навчання. На початку роботи алгоритму задається початковий вектор параметрів w , який на кожному наступному кроці ітерації коригується на величину приросту:

$$\Delta w = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T (y - f(w)), \quad (1)$$

де μ – параметр регуляризації, який назначається на кожній ітерації алгоритму,
 J – матриця Якобі функції $f(w, x)$ в точці w ,
 I – одинична матриця.

Критерієм при оптимізації є середньоквадратична помилка моделі на навчальній вибірці

$$mse = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(w, x_i))^2}{N}. \quad (2)$$

Робота методу спрямовано послідовне наближення початкових значень параметрів до шуканого локального оптимуму. Алгоритм зупиняється у разі, якщо значення параметра приросту Δw наступної ітерації менше заданого значення або знайдені параметри приводять помилку навчання менше встановленої величини

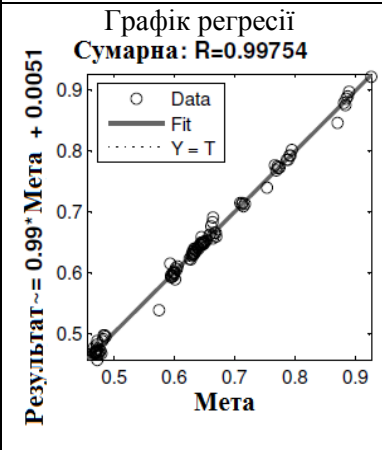
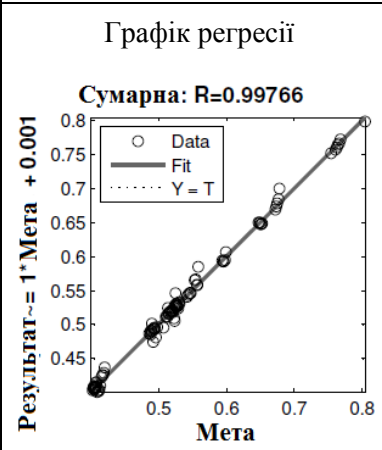
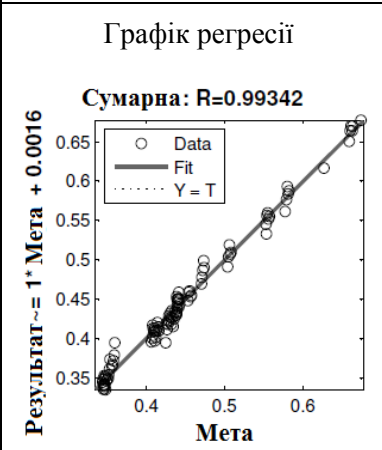
$$\|f(w_i, x) - y(x)\| < \varepsilon_{зад}, \quad (3)$$

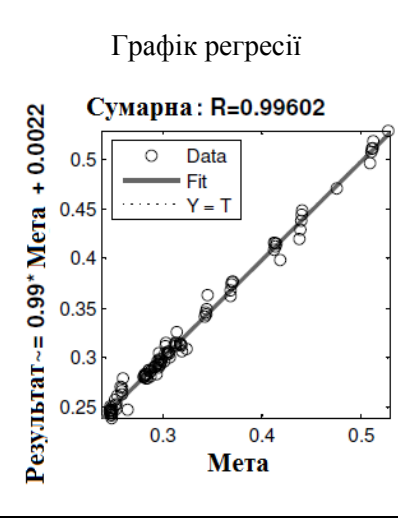
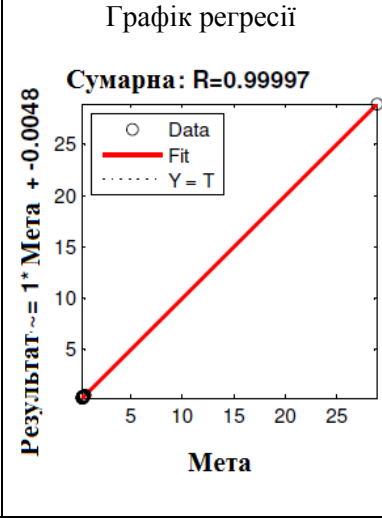
де $y(x)$ – вихідний навчальний вектор,

$\varepsilon_{зад}$ – встановлена допустима величина помилки.

Для навчання п'ятої нейронної мережі, що адаптує величину затримки для сигналів з несучою частотою 720 Гц, кращий результат показав метод байєсівської регуляризації [19], для підстроювання ваг та зміщень, в основі якого використовується метод Левенберга-Марквардта. Даний метод мінімізує комбінацію квадратів помилок і вагомості для отримання найкращих узагальнюючих властивостей нейронної мережі.

Таблиця 2. Результати навчання та моделювання нейронних мереж

Нейронна мережа 1 (420 Гц)	Нейронна мережа 2 (480 Гц)	Нейронна мережа 3 (580 Гц)
Помилка навчання $1,54 \cdot 10^{-8}$	Помилка навчання $5,87 \cdot 10^{-9}$	Помилка навчання $2 \cdot 10^{-8}$
<p style="text-align: center;">Графік регресії Сумарна: $R=0.99754$</p>  <p style="text-align: center;">Результат $\sim 0.99 \cdot \text{Мета} + 0.0051$</p>	<p style="text-align: center;">Графік регресії Сумарна: $R=0.99766$</p>  <p style="text-align: center;">Результат $\sim 1 \cdot \text{Мета} + 0.001$</p>	<p style="text-align: center;">Графік регресії Сумарна: $R=0.99342$</p>  <p style="text-align: center;">Результат $\sim 1 \cdot \text{Мета} + 0.0016$</p>
Помилка моделювання $5,1 \cdot 10^{-7}$	Помилка моделювання $1 \cdot 10^{-7}$	Помилка моделювання $1,6 \cdot 10^{-7}$

Нейронна мережа 4 (780 Гц)	Нейронна мережа 5 (720 Гц)
$4,58 \cdot 10^{-9}$	$1,74 \cdot 10^{-8}$
Графік регресії	Графік регресії
 <p style="text-align: center;">Сумарна: R=0.99602</p>	 <p style="text-align: center;">Сумарна: R=0.99997</p>
Помилка моделювання $2,2 \cdot 10^{-7}$	Помилка моделювання $4,8 \cdot 10^{-7}$

Для оцінки підвищення точності налаштування захисного часового інтервалу за умови використання запропонованого адаптивного методу управління лінією затримки для ТРК-3 припустимо, що за умови звичайної роботи лінія затримки була б налаштована на середнє значення часу затримки, що становить $t_{зсер} = 0,4565$ мс. Максимальне і мінімальне значення часу затримки сигналу серед результатів всіх вимірів становить відповідно $t_{3max} = 0,9269$ мс для сигналу з частотою 420 Гц при довжині рейкової лінії 1 км і опорі ізоляції 0,85 Ом·км, і $t_{3min} = 0,2464$ мс сигналу з частотою 780 Гц при довжині рейкової лінії 0,2 км і опорі ізоляції 50 Ом.. Тобто, адаптивний метод управління лінією затримки для ТРК-3 дозволяє підвищити точність налаштування часового інтервалу у випадку t_{3max} до 0,47 мс, а у випадку t_{3min} до 0,21 мс.

Висновки. У статті запропонована оптимізація існуючого пристрою підвищення завадостійкості тональних рейкових кіл. Для більш ефективного виключення завад в інтервалах між імпульсами корисного сигналу запропонований метод адаптивного управління лінією затримки, який дозволить адаптувати параметр часу затримки залежно від довжини рейкової лінії, несучої частоти сигналу, опорі ізоляції та частоти модулюючого сигналу. Завдяки результатам класифікації даних, що містять інформацію про вплив параметрів роботи ТРК на час проходження сигналу, було обрано оптимальну структуру моделі на основі нейронних мереж, що реалізує метод адаптивного управління лінією затримки. Дана модель побудована на основі нейронних мереж, що мають структуру з прямим розповсюдженням сигналу і зворотним розповсюдженням помилки. Для навчання використані методи Левенберга-Марквардта та байєсівської регуляризації. Помилки навчання склали $1,54 \cdot 10^{-8}$, $5,87 \cdot 10^{-9}$, $2 \cdot 10^{-8}$, $4,58 \cdot 10^{-9}$, $1,74 \cdot 10^{-8}$. Запропонований адаптивний метод адаптивного управління лінією затримки для ТРК-3 з несучою частотою сигналу 420 Гц при довжині рейкової лінії 1 км і опорі ізоляції 0,85 Ом·км дозволяє підвищити точність налаштування часу затримки сигналу до 0,47 мс.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гаврилук В.И., Щека В.И., Мелешко В.В. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2015. №5 (59). С.7-15.
2. V. Havryliuk, Model of Propagation of Traction Current Harmonics from Trains to a Track Circuit Receiver // 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/AP EMC49932.2021.9597152.
3. K. B. Park, J. Y. Park, M. S. Jang, M. S. Lim, and S. H. Kim. A study on the internal modeling of track circuit (UM71-C) on HSL // Proceedings of. KIEE Conf. Korean Inst. Electr. Eng., 2006, pp. 1130–1131.

4. A. Debiolles, L. Oukhellou, P. Aknin, and T. Denoeux. Track circuit automatic diagnosis based on a local electrical modelling // Proceedings of WCRR, Jun. 2006, pp. 4–8.
5. Z. Zheng, S. Dai and X. Xie, Research on Fault Detection for ZPW-2000A Jointless Track Circuit Based on Deep Belief Network Optimized by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm // IEEE Access, vol. 8, pp. 175981-175997, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025628
6. V. Havryliuk. ANFIS Based Detecting of Signal Disturbances in Audio Frequency Track Circuits // 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAIC51296.2020.9239127.
7. T. de Bruin, K. Verbert and R. Babuška. Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 28, no. 3, pp. 523-533, March 2017, doi: 10.1109/TNNLS.2016.2551940
8. Z. W. Huang, X. Y. Wei, Z. Liu. Fault diagnosis of railway track circuits using fuzzy neural network. J. China Railway Soc., 2012, vol. 34, no. 11, pp. 54–59. doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2012.11.009
9. Zanwu Huang, Shaobin Li, and Xueye Wei. Analysis of temperature impact on audio frequency track circuits using linear regression model / AIP Conference Proceedings 1834, 020019 (2017). doi: <https://doi.org/10.1063/1.4981558>
10. V. Havryliuk. Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 491-496, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879833.
11. W. B. Zhu, X. M. Wang. Research on fault diagnosis of railway jointless track circuit based on combinatorial decision tree // J. China Railway Soc., 2018, vol. 40, no. 7, pp. 74–79. doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2018.07.011
12. Zhang M. Railway track circuit fault diagnosis based on support vector machine with particle swarm optimization // 2013 International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering, 1-2 dec. 2013. Lancaster: DEStech Publications, 2013. 662p.
13. Dong W. Fault diagnosis for compensating capacitors of jointless track circuit based on dynamic time warping // Mathematical Problems in Engineering. New York: Hindawi Publishing Corporation. Vol. 2014. P.2-13.
14. Саяпина І.О.. Удосконалення методів і засобів підвищення завадостійкості тональних рейкових кіл: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / УкрДУЗТ. Харків, 2017. 160 с
15. Саяпина І.А. Моделирование характеристик передачи сигналов тональной рельсовой цепи // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Харків: УкрДАЗТ, 2012. Вип.134. С.173-181.
16. Саяпина І.А. Проверка модели рельсовой цепи на адекватность // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал. Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 4(101). С.31-36.
17. Levenberg, K. A. Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares // Quarterly of Applied Mathematics. USA:Brown University, 1944.Vol. 2. P. 164-168.
18. Ranganathan A. The Levenberg-Marquardt Algorithm // Tutorial on LM Algorithm, 2004. P.1-5.
19. Foresee F.D., Hagan M.T. Gauss-Newton Approximation To Bayesian Learning // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. San Jose CA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997. P. 1930-1935.

REFERENCES

1. V.I. Havryliuk, V.I. Shcheka, V.V. Meleshko (2015). Ispytaniya novykh tipov podvizhnogo sostava na elektromagnitnyuyu sovmestimost' s ustroystvami signalizatsii i svyazi [Tests of new types of rolling stock for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices]. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport], 5(59). 7-15.
2. V. Havryliuk, (2021). Model of Propagation of Traction Current Harmonics from Trains to a Track Circuit Receiver. 2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). 1-4. doi: 10.1109/APEMC49932.2021.9597152.
3. K. B. Park, J. Y. Park, M. S. Jang, M. S. Lim, and S. H. Kim, (2006). A study on the internal modeling of track circuit (UM71-C) on HSL. Proceedings of. KIEE Conf. Korean Inst. Electr. Eng., 1130–1131.
4. A. Debiolles, L. Oukhellou, P. Aknin, and T. Denoeux, (2006). Track circuit automatic diagnosis based on a local electrical modelling. Proceedings of WCRR, 4–8.
5. Z. Zheng, S. Dai and X. Xie, (2020). Research on Fault Detection for ZPW-2000A Jointless Track Circuit Based on Deep Belief Network Optimized by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm. IEEE Access, 8, 175981-175997. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025628
6. V. Havryliuk (2020). ANFIS Based Detecting of Signal Disturbances in Audio Frequency Track Circuits. 2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 1-6. doi: 10.1109/SAIC51296.2020.9239127.
7. T. de Bruin, K. Verbert and R. Babuška (2017). Railway Track Circuit Fault Diagnosis Using Recurrent Neural Networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28(3), 523-533. doi: 10.1109/TNNLS.2016.2551940

8. Z. W. Huang, X. Y. Wei, Z. Liu (2012). Fault diagnosis of railway track circuits using fuzzy neural network. J. China Railway Soc., 34, 11, 54–59. doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2012.11.009
9. Zanwu Huang, Shaobin Li, and Xueye Wei (2017). Analysis of temperature impact on audio frequency track circuits using linear regression model. AIP Conference Proceedings 1834, 020019 doi: <https://doi.org/10.1063/1.4981558>
10. V. Havryliuk (2019). Audio Frequency Track Circuits Monitoring Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 491-496, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879833
11. W. B. Zhu, X. M. Wang (2018). Research on fault diagnosis of railway jointless track circuit based on combinatorial decision tree. J. China Railway Soc., 40, 7, 74–79. doi: 10.3969/j.issn.1001-8360.2018.07.011
12. Zhang M. (2013). Railway track circuit fault diagnosis based on support vector machine with particle swarm optimization. 2013 International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering. Lancaster: DEStech Publications, 662.
13. Dong W. (2014). Fault diagnosis for compensating capacitors of jointless track circuit based on dynamic time warping. Mathematical Problems in Engineering. New York: Hindawi Publishing Corporation, 2-13.
14. I.O. Saiapina (2017). Improvement of methods and means to increase audio frequency track circuits noise immunity. *Thesis of PhD* Kharkiv, 160. [in Ukrainian]
15. I. Saiapina (2012). Modelirovaniye kharakteristik peredachi signalov tonal'noy rel'sovoy tsepi [Modeling the Signaling Characteristics of a Tone Track Circuit]. Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koyi derzhavnoyi akademiyi zaliznychnoho transportu [Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport], 134, 173-181. [in Russian]
16. I. Saiapina (2013). Proverka modeli rel'sovoy tsepi na adekvatnost' [Validation of the track circuit model for adequacy]. Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti [Information and control systems for railway transport], 4(101), 31-36. [in Russian]
17. Levenberg, K. A. (1944) Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics, 2, 164-168.
18. Ranganathan A. (2004) The Levenberg-Marquardt Algorithm. Tutorial on LM Algorithm, 1-5.
19. Foresee F.D., Hagan M.T. (1997) Gauss-Newton Approximation To Bayesian Learning. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. San Jose CA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1930-1935.

*Inna Saiapina*¹

¹ Associate Professor, Department of Artificial Intelligence and Telecommunication Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

DATA CLASSIFICATION METHOD AND NEURAL NETWORKS APPLICATION FOR INCREASING NOISE IMMUNITY OF AUDIO FREQUENCY TRACK CIRCUIT

The article proposes the optimization of the existing device for improving the noise immunity of audio frequency track circuits. Due to the fact that the signal current in the audio frequency track circuit is a tone frequency signal modulated by pulses, by opening the transmission path of the audio frequency track circuit at the input of the track receiver during the intervals between signal current pulses, the track receiver can be protected from interference. To take into account the delay time for the signal to pass from the output of the track generator to the input of the track receiver, a delay line is provided in the device for increasing noise immunity. But the time of passage of the signal current in the path of the audio frequency track circuit may vary depending on its operating parameters. To take into account these fluctuations and to increase the efficiency of eliminating interference in the intervals between useful signal pulses, a method of adaptive control of the delay line is proposed, which allows adapting the delay time parameter depending on the length of the rail line, the carrier frequency of the signal, the insulation resistance and the frequency of the modulating signal. By solving the problem of classifying data containing information about the influence of the operation parameters of the audio frequency track circuit on the signal transit time, the optimal structure of the model based on neural networks was chosen. This model implements the method of adaptive control of the delay line.

Keywords: audio frequency track circuit, classification, data mining, noise immunity, neural networks, database.

ЗМІСТ

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Демченко В.О., Гулак С.О., Демченко О.В., Заїка Д.О.</i> Вплив профілю колеса та твердості на стійкість колії з різними конструкціями скріплень	5
<i>Фомін О.В., Ловська А.О.</i> Визначення навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з енергопоглинальними балками	13
<i>Волошин Д.І., Волошина Л.В.</i> Управління виробничими ризиками в технологічних системах вагоноремонтних підприємств	22
<i>Косарчук В.В., Чаусов М.Г., Твердомед В.М., Пилипенко А.П., Азарков О.В.</i> Мазильна композиція для підвищення зносостійкості важконавантажених пар тертя	30
<i>Крайнюк О., Буц Ю., Лоцман П., Барбашин В.</i> Використання золошлаків у дорожньому будівництві з позиції екологічної безпеки	41
<i>Сулим А.О., Хозя П.О., Стринжа А.М., Речкалов В.С., Федоров В.В.</i> Шляхи та перспективи удосконалення вагонів-думпкарів, призначених для експлуатації магістральними коліями 1520 мм	51
<i>Orynyk D.</i> Repair of cement, grain, mineral wagons and gondola cars in a single flexible asynchronous flow	66
<i>Калабухін Ю.Є., Мартинов І.Є., Труфанова А.В.</i> Систематизація економіко-технологічних станів пасажирських вагонів в експлуатації	73
<i>Рябов Є.С., Мосін С.В., Овер'янова Л.В., Кондратьєва Л.Ю., Демидов О.В., Гулак С.О.</i> Оцінка технічних параметрів локомотиву для залізничного кар'єрного транспорту	83
<i>Барибін М.А.</i> Модель встановлення величини витрат палива на тягу дизель-поїздів та рейкових автобусів	101
<i>Сидоренко А.М., Яцько С.І.</i> Оцінка впливу режимів роботи системи електричної тяги на втрати від нерівномірності споживання електроенергії та заходи щодо їх зниження	115
<i>Михалків С.В., Жалкін Д.С., Жалкін С.Г., Равлюк В.Г.</i> Визначення інформативних складових методом швидкої ексцесограми для вібродіагностування підшипників кочення	128
<i>Kulbovskiy I., Holub H., Sapronova S., Andonova S.</i> Conceptual approaches for determination of production and technological potential in traffic rolling stock projects	137

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Фомін О.В., Ловська А.О., Фоміна А.М., Прокопенко П.М. Розрахунок міцності кришки люка напіввагона із полімерного композиційного матеріалу	143
Шукула О. Побудова моделі нелінійного деформування просторово-армованих волокнистих матеріалів з розорієнтованими волокнами	153
Саяпіна І.О., Горобченко О.М., Демченко В.О. Штомпель Ю.М. Моделювання та інтелектуальний аналіз параметрів тонального рейкового кола	167
Дубравін Ю.Ф., Ткаченко В.П. Дослідження моделі асинхронного тягового двигуна електровоза змінного струму	175

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Samsonkin V., Popova H., Shcherbyna R., Horetskyi O., Soloviova O. Analysis of empirical research of students and graduates of the faculty of «Railway transport management» about the state of psychological climate in railway subdivisions	190
Голіков В.В., Сінюта К.О. Основні підходи до управління рухом судна на курсі	209
Пасічник А.М., Лебідь І.Г., Кущенко Є.С. Аналіз ефективності побудови мережі транспортно-логістичних комплексів на основі факторно-рейтингової моделі	216
Болгов О.С. Забезпечення судноплавної безпеки навалювального судна на етапі проведення вантажних операцій	229
Ohar O., Shelekhan H., Pestremenko-Skrypka O., Zveriev P. Ways to restore national transport and logistics activities in the postwar period	236

ІНФОРМАЦІЙНІ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА РЕСУРСОСБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Тимченко Л.І., Кокряцька Н.І., Герцій О.А, Жук Д.О., Каплун В.А., Дубова Н.Б. Метод знаходження енергетичних центрів фрагментів зображень лазерних трас	244
Ткаченко К.,Ткаченко О. Modeling of management of intelligent systems in transport	253
Holub H., Kharuta V., Zaiats O., Tkachuk M. Research of bioenergy potential on improving energy efficiency and environmentality in transport projects Дослідження потенціалу біоенергетики на підвищення енергетичної ефективності та екологічності в проектах транспорту	263
Саяпіна І.О. Застосування методу класифікації даних та нейронних мереж для підвищення завадостійкості рейкового кола	270

Науково-виробниче видання
Scientific and production edition

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS
OF THE STATE UNIVERSITY OF INFRASTRUCTURE AND TECHNOLOGIES

Серія «Транспортні системи і технології»
Series «Transport Systems and Technologies»

Випуск 39

Issue 39

Відповідальний за випуск *I. О. Саяніна*

Підписано до видання 30.06 2022.
Ум. друк. арк. 16,33. Обл.-вид. арк. 21,8.
Наклад 50 прим. Зам. № 2185-09/22.

Надруковано в друкарні редакційно-видавничого відділу
Державного університету інфраструктури та технологій.
Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 6148 від 18.04.2018.
03049, м. Київ-49, вул. І. Огієнка, 19.
<https://tst.duit.in.ua/>