

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ

ЗБІРНИК
НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

СЕРІЯ

«ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ
І ТЕХНОЛОГІЇ»

ВИПУСК 38

Київ·ДУІТ·2021

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 38

Kyiv·SUIT·2021

УДК 656:62

Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 38. К.: ДУІТ, 2021. 272 с. DOI:10.32703/2617-9040-2021-38

Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies». № 38. K.: SUIT, 2021. 272 p. DOI:10.32703/2617-9040-2021-38

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

С. Андонова (S. Andonova), Prof. Eng., Dr. Eng., завідувач кафедри «Машинобудівна техніка і технології», 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. Саятіна, 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 № 4 від 14 грудня 2021 р.).

Recommended for publication by the Academic Council of DUIT (Minutes № 4 of December 14, 2021).

Засновник і видавець – Державний університет інфраструктури та технологій
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 23070-12910ПР 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 наук
та доктора філософії 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, 2021

Сергій Панченко¹, Олексій Фомін², Гліб Ватуля³, Альона Ловська⁴, Світлана Дериземля⁵, Андрій Рибін⁶

¹ Ректор, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

² Професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, Україна, 04071. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

³ Проректор з наукової роботи, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3823-7201>

⁴ Доцент 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>

⁵ Старший лаборант кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID <http://orcid.org/0000-0001-6556-4454>

⁶ Старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID <http://orcid.org/0000-0003-4430-8018>

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

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАПОВНЮВАЧІВ В СКЛАДОВИХ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЯХ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Для зменшення навантаженості рам вантажних вагонів при експлуатаційних режимах запропоновано використання наповнювачів у їх складових. Використання наповнювача доцільно здійснювати в найбільш навантажених елементах несучої конструкції, а саме – хребтовій балці. У зв'язку з цим необхідною умовою використання наповнювача в хребтовій балці є створення її замкненої конструкції. Проведено визначення динамічної навантаженості вагонів з урахуванням запропонованих заходів. Проведені розрахунки показали, що при використанні наповнювача максимальні прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів на 4% нижчі за ті, що отримані для несучих конструкцій без наповнювачів.

Наведено результати визначення основних показників міцності несучих конструкцій вантажних вагонів з урахуванням використання наповнювачів в їх складових. Встановлено, що міцність рам розглянутих типів вагонів при основних експлуатаційних режимах забезпечується. При цьому максимальні еквівалентні напруження в несучих конструкціях вагонів нижчі на 4 – 9% за ті, що виникають у типових конструкціях рам.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій рухомого складу та зменшенню витрат на його утримання в експлуатації.

Ключові слова: вагон, несуча конструкція, хребтова балка, динамічна навантаженість, міцність.

Вступ. Головною умовою ефективної та безперебійної роботи транспортної галузі є злагоджена експлуатація окремих її складових. Залізничний транспорт вже тривалий час є найважливішою складовою транспортної галузі. Для забезпечення ефективності його функціонування важливим є впровадження в експлуатацію рухомого складу з покращеними техніко-економічними показниками. Досягти цього можливо шляхом врахування принципово нових рішень при проектуванні рухомого складу. Ці рішення повинні бути спрямовані на

зменшення навантаженості рухомого складу, підвищення ресурсу експлуатації, підвищення швидкостей руху в завантаженому та порожньому станах, зменшенню витрат на утримання тощо.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Результати структурно-динамічного аналізу вантажного вагона наведені у роботі [1]. Розрахунок здійснений за методом скінчених елементів з використанням сучасних засобів його реалізації. При цьому розглянуто багаторівневу систему вільності вагона.

Особливості визначення динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона моделі С70 з урахуванням різної висоти центру ваги проводиться у роботі [2]. Розрахункові сили, які діють на несучу конструкцію напіввагона визначені на підставі нормативних стандартів, які використовуються на залізницях Китаю. Разом з цим в роботі не зазначено перспектив щодо удосконалення несучих конструкцій вагонів для забезпечення міцності в експлуатації.

Заходи щодо удосконалення несучих конструкцій вагонів для зменшення їх навантаженості при експлуатаційних режимах висвітлюються у публікаціях [3, 4]. Наведені результати розрахунку на міцність несучих конструкцій вагонів з урахуванням запропонованих заходів. Однак зазначені рішення щодо удосконалення спрямовані на зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів у вертикальній площині.

Вибір конструктивних рішень елементів вагонів з малою масою тари проводиться у публікації [5]. Як методика використана порівняльна оцінка показників міцності, витривалості та стійкості несучої конструкції мінімальної маси, виготовленої з різних матеріалів.

Обґрунтування вибору нового профілю для хребтової балки вантажного вагона проводиться у статті [6]. В роботі наведений ряд конструктивних рішень рам вантажних вагонів різного типу. Наведені результати розрахунку на міцність несучих конструкцій вагонів з урахуванням запропонованих рішень.

Разом з цим в даних роботах не запропоновано заходів щодо зменшення навантаженості несучих конструкцій вагонів при експлуатаційних режимах.

Заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона наведені у роботі [7]. В якості розрахункового використаний метод ОПК. Конструктивна схема кузова, що проектується, дозволила знизити масу вагона і підвищити його вантажопідйомність із забезпеченням необхідної міцності і надійності конструкції.

Однак дослідження проведені стосовно вагона-хопера. При цьому не приділено уваги удосконаленню несучих конструкцій інших типів вагонів.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є висвітлення результатів обґрунтування використання наповнювачів в складових несучих конструкцій вантажних вагонів. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

провести визначення динамічної навантаженості вагонів з урахуванням використання наповнювачів в хребтових балках;

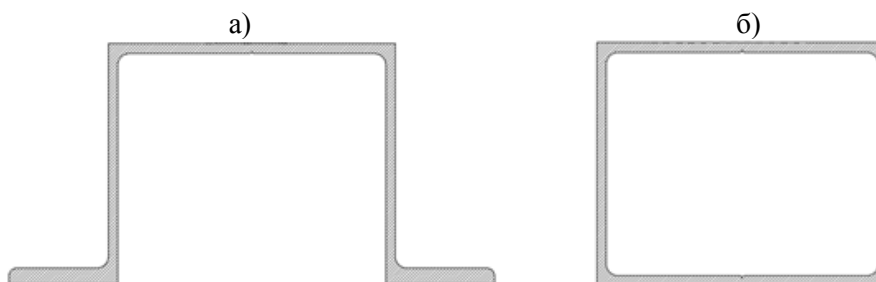
визначити основні показники міцності несучих конструкцій вантажних вагонів з урахуванням використання наповнювачів в хребтових балках.

Матеріали та методи дослідження. Одним з найбільш навантажених елементів несучих конструкцій вагонів є хребтова балка рами, яка постійно знаходиться під впливом вертикальних та повздовжніх навантажень. У зв'язку з цим мають місце такі пошкодження хребтової балки як тріщини, обрив зварювальних швів, деформації, перекіс тощо (рис. 1).

Для зменшення навантаженості несучих конструкцій вагонів при експлуатаційних режимах можливим є використання наповнювачів у їх складових. Використання наповнювача доцільно здійснювати в найбільш навантажених елементах несучої конструкції, а саме – хребтовій балці. Важливо сказати, що типові хребтові балки вантажних вагонів здебільшого представлені Z-подібними профілями або швелерами (рис. 2). У зв'язку з цим необхідною умовою використання наповнювача в хребтовій балці є створення її замкненої конструкції.



*Рис. 1. Пошкодження рам вагонів
а), в) тріщина в хребтовій балці; б) обрив зварювального шва;
г) відрив шворневої балки*



*Рис. 2. Переріз хребтової балки
а) типова конструкція; б) удосконалена конструкція*

Блоково-ієрархічну схему вагона з наповнювачем в хребтовій балці наведено на рис. 3. Схема представлена на прикладі напіввагона.

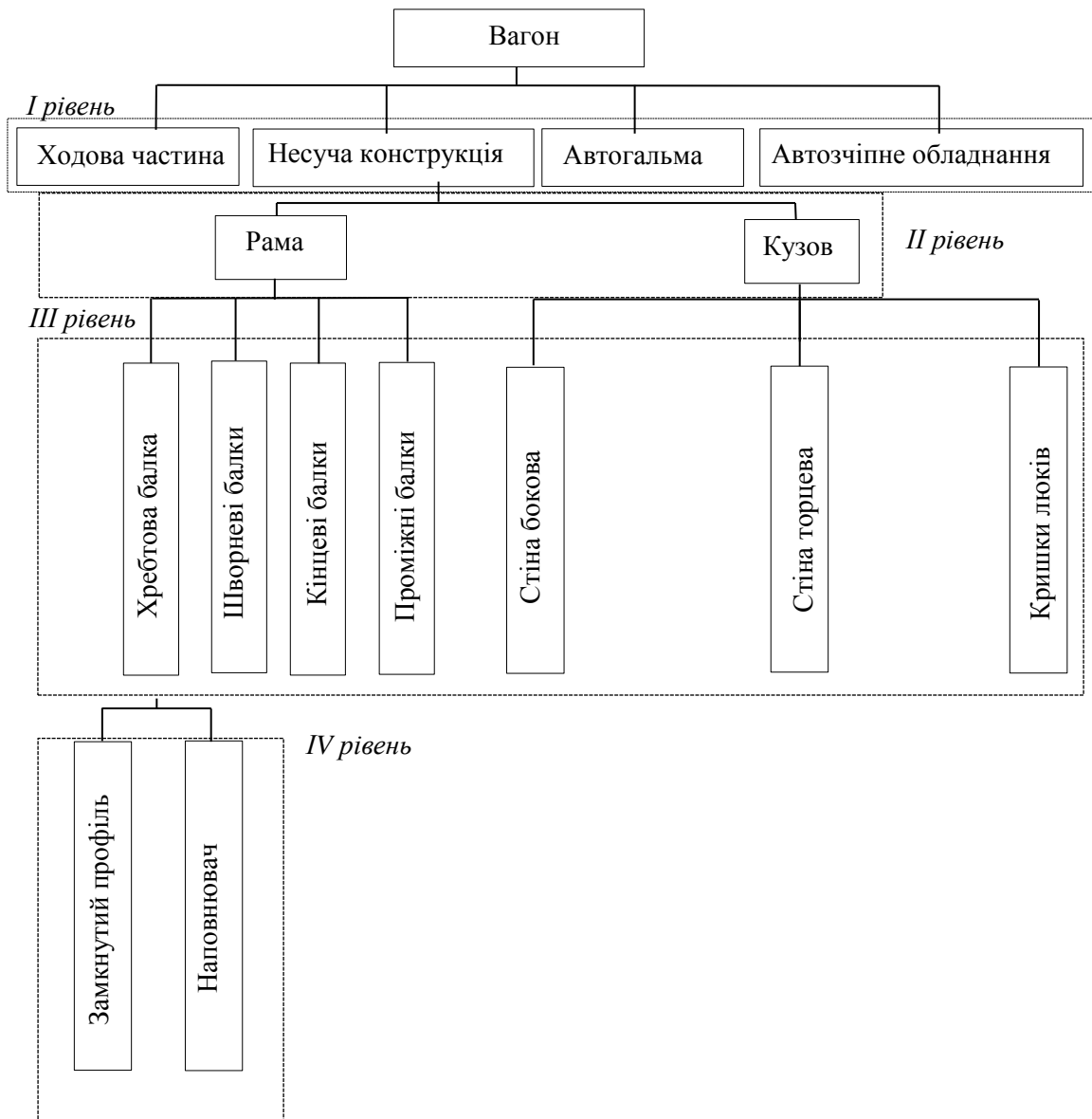


Рис. 3. Блокова-ієрархічна схема на піввагона

Для визначення навантаженості несучих конструкцій вагонів з урахуванням заходів щодо удосконалення здійснено математичне моделювання.

Для цього використано математичну модель, наведену у роботі [8], яка описує динамічне навантаження несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами-цистернами. Тому дану модель було доопрацьовано шляхом урахування переміщень несучої конструкції вагону у повздовжній площині.

Враховано, що наповнювач в хребтовій балці має пружні властивості.

$$M_{\phi p} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\phi} = P_n - (2P_{mp} + c \cdot x), \quad (1)$$

$$I_B \cdot \ddot{\phi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \phi \cdot (M_B \cdot h) = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

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

де

$$\Delta_1 = z - l \cdot \varphi; \quad \Delta_2 = z + l \cdot \varphi,$$

$M_{бр}$ – маса бруто вагона; M_B – маса несучої конструкції вагона; I_B – момент інерції вагона; P_n – величина повздовжньої сили на задній упор автозчепу; P_{mp} – сили тертя, які виникають між п'ятниками рами та підп'ятниками візків; c – жорсткість матеріалу, яким заповнені елементи несучої конструкції вагона; l – половина бази вагона; F_{TP} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона.

При доопрацюванні моделі також враховано силу тертя, яка виникає між п'ятниками та підп'ятниками та зумовлену дією повздовжньої сили на задній упор автозчепу.

Розв'язок диференціальних рівнянь (1) – (3) здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad [9, 10].

Початкові умови прийняті рівними нулю [11 – 13]. Проведені розрахунки показали, що при використанні наповнювача максимальні прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів на 4% нижчі за ті, що отримані для несучих конструкцій без наповнювачів.

Також в рамках дослідження здійснено розрахунок основних показників міцності рам деяких вантажних вагонів. Просторові моделі вагонів побудовані в програмному комплексі SolidWorks (рис. 4). Для розрахунку на міцність використано програмний комплекс SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів. Оптимальна кількість елементів скінчено-елементних моделей визначена за графоаналітичним методом [14, 15].

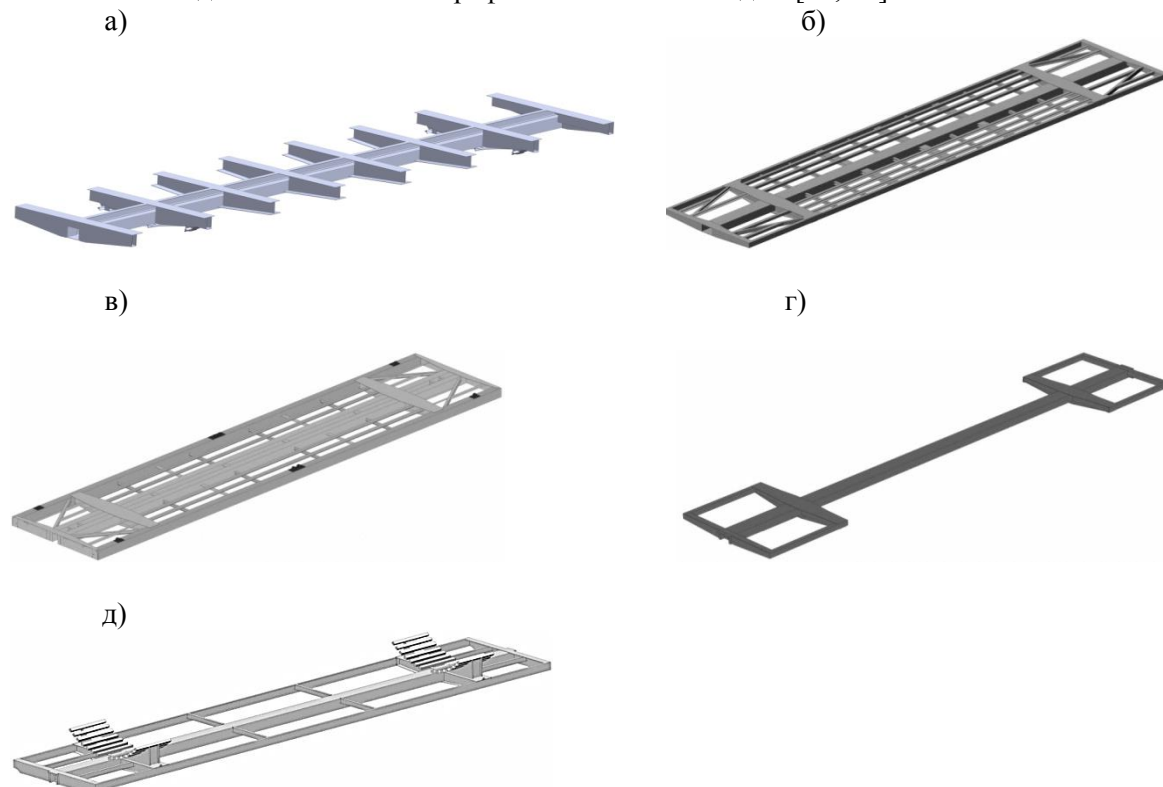


Рис. 4. Просторові моделі рам основних типів вантажних вагонів з замкненими конструкціями хребтових балок

а) напіввагон; а) критий вагон; б) вагон-платформа; в) вагон-хопер; г) вагон-цистерна

Результати розрахунків на міцність несучих конструкцій вагонів з замкненими хребтовими балками, заповненими наповнювачем, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Основні показники міцності рам вантажних вагона

Показник міцності	Режим навантаження				
	І режим			ІІІ режим	
	удар	стиснення	ривок-розтягнення	удар-стиснення	ривок-розтягнення
Напіввагон					
Напруження, МПа	298,5	287,3	276,5	274,3	271,5
Переміщення в вузлах, мм	7,6	7,5	7,5	7,2	7,3
Критий вагон					
Напруження, МПа	329,3	306,2	298,3	276,4	248,7
Переміщення в вузлах, мм	12,6	12,1	10,5	11,3	10,4
Вагон-платформа					
Напруження, МПа	321,3	290,2	276,5	273,4	268,5
Переміщення в вузлах, мм	13,5	13,4	12,6	12,7	12,6
Вагон-хопер					
Напруження, МПа	325,8	292,3	284,6	278,5	306,4
Переміщення в вузлах, мм	15,3	15,2	14,6	14,7	14,7
Вагон-цистерна					
Напруження, МПа	232,6	218,2	203,5	206,5	232,6
Переміщення в вузлах, мм	5,2	4,8	4,7	5,1	5,2

За даними, наведеними у табл. 1, можна зробити висновок, що міцність рам розглянутих типів вагонів при основних експлуатаційних режимах забезпечується. При цьому максимальні еквівалентні напруження в несучих конструкціях вагонів не перевищують допустимих [16, 17] та нижчі на 4 – 9% за ті, що виникають у типових конструкціях рам.

Висновки

1. Проведено визначення динамічної навантаженості вагонів з урахуванням використання наповнювачів в хребтових балках. Результати розрахунки показали, що при використанні наповнювача максимальні прискорення, які діють на несучі конструкції вагонів на 4% нижчі за ті, що отримані для несучих конструкцій без наповнювачів.

2. Визначено основні показники міцності несучих конструкцій вантажних вагонів з урахуванням використання наповнювачів в хребтових балках. Встановлено, що міцність рам розглянутих типів вагонів при основних експлуатаційних режимах забезпечується. При цьому максимальні еквівалентні напруження в несучих конструкціях вагонів нижчі на 4 – 9% за ті, що виникають у типових конструкціях рам.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій рухомого складу та зменшенню витрат на його утримання в експлуатації.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених «Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених

динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів», яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

ЛІТЕРАТУРА

1. S. S. Haraka, S. C. Sharma, S. P. Harsha. Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method. *Procedia Materials Science*. 2014. No. 6. P. 1891–1898.
2. Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui. Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. *Procedia Engineering*. 2012. No. 29. P. 3572–3577.
3. Fomin O., Lovska A., Medvediev I., Shatkovska H. Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №5/7 (107). P. 30 – 37.
4. Фомін О. В., Ловська А. О. Визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи з зв'язками зв'язками у повздовжніх балках. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71). №1. Частина 2. С. 135-140.
5. Бороненко Ю. П., Філіпова І. О. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2017. № 3 (69). P. 121 – 129. doi 10.15802/stp2017/104546
6. Соколов А. М., Савушкина Ю. В., Новоселов А. Ю., Коротков Д. С. Универсальный профиль для хребтовой балки вагонов. Транспорт Российской Федерации. 2019. №1(80). С. 50 – 55.
7. Кебал Ю. В., Шатов В. А., Тьокотев О. М., Мурашова Н. Г. Удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна. Збірник наукових праць ДЕУТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2017. Вип. 30. С. 113 – 122.
8. 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.
9. Романенко І. О., Животовський Р. М., Петрук С. М., Шишацький А. В., Волошин, О. О. Математична модель розподілу навантаження в телекомунікаційних мережах спеціального призначення. Системи обробки інформації, 2017. № 3. С. 61 – 71.
10. 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.
11. 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.
12. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 2021. Vol. 14(8). 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
13. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 6. Issue 7 (108). P. 21 – 29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.

REFERENCES

1. S. S. Haraka, S. C. Sharma, S. P. Harsha. (2014). Structural dynamic analysis of freight railway wagon using finite element method. *Procedia Materials Science*. 1891–1898. (in English).
2. Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui. (2012). Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. *Procedia Engineering*, 29. 3572–3577. (in English).
3. Fomin O., Lovska A., Medvediev I., Shatkovska H. (2020). Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №5/7 (107). 30 – 37. (in English).
4. Fomin O. V., Lovska A. O. (2021). Vyznachennya vertikal'nih priskoren' nesuchoi konstrukcii vagona-platformi z v'yazkimi zv'yazkami u povzdovzhnih balkah. *Vcheni zapiski Tavrijs'kogo nacional'nogo universitetu imeni V.I. Vernads'kogo. Seriya: Tekhnichni nauki*, 32 (71). №1. Chastina 2. 135 – 140. (in Ukrainian).

5. Boronenko Yu. P., Filipova I. O. (2017). Vybory konstruktivnykh resheniy elementov vagonov s maloy massoj tary. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 3 (69). 121 – 129. doi 10.15802/stp2017/104546 (in Ukrainian).
6. Sokolov A. M., Savushkina Yu. V., Novoselov A. Yu., Korotkov D. S. (2019). Universal'nyj profil' dlya hrebtovoj balki vagonov. *Transport Rossijskoj Federacii*, №1(80). 50 – 55. (in Russian).
7. Keval Yu. V., Shatov V. A., Tokotev O. M., Murashova N. G. (2017). Udoshkonalennya konstrukcii vagona-hopera dlya perevezennya zerna. *Zbirnik naukovih prac' DETUT. Seriya «Transportni sistemi i tekhnologii»*, 30. S. 113 – 122. (in Ukrainian).
8. Bogomaz G. I., Mehov D. D., Pilipchenko O. P., Chernomashenceva Yu. G. (1992). Nagruzhenost kontejnerov-cistern, raspolozhennyh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepkku. *Zb. nauk. prac "Dinamika ta keruvannya ruhom mehanichnih sistem"*, 87–95. (in Russian).
9. Romanenko I. O., Zhivotovskij R. M., Petruk S. M., Shishackij A. V., Voloshin, O. O. (2017). Matematichna model rozpodilu navantazhennya v telekomunikacijnih merezhah specialnogo priznachennya. *Sistemi obrobki informacii*, 3. S. 61 – 71. (in Ukrainian).
10. Shishackij A. V., Lyutov V. V., Zhuk O. G., Zhivotovskij R. M. (2016). Udoshkonalena metodika ocinyuvannya parametriv signaliv z cifrovimi vidami modulyacii. *Nauka i tekhnika Povitryanih Sil Zbrojnih Sil Ukraini*, 4(25). S. 117 – 121. (in Ukrainian).
11. Shishackij A. V., Olshanskij V. V., Zhivotovskij R. M. (2016). Algoritm viboru robochih chastot dlya zasobiv vijskovogo radiozvyazku v umovah vplivu navmisnih zavrad. *Sistemi ozbroennya i vijskova tekhnika*, 2. S. 62 – 66. (in Ukrainian).
12. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 14(8). 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915> (in English).
13. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6. 7 (108). P. 21 – 29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162 (in English).
14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight cars. Strength and Dynamic Requirements], 54. GOST 33211-2014 (2016). (in Russian).

Sergii Panchenko¹, Oleksij Fomin², Glib Vatulia³, Alyona Lovska⁴, Svitlana Deryzemlia⁵, Andrii Rybin⁶

¹Rector, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

²Professor of Department of Cars and Carriage Facilities, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

³Vice-rector for science, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

⁴Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

⁵Senior Assistant of the Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

⁶Senior Lecturer of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

JUSTIFICATION OF FILLERS USING IN THE BEARING STRUCTURES COMPONENTS OF FREIGHT CARS

To reduce the load on the freight cars frames under operational conditions, it has been suggested that to use fillers in their components. Fillers using is advisable in the most loaded elements of the bearing structure, namely, the spine beam. Therefore, a necessary condition for filler using in the spine beam is the creation of its closed structure. The dynamic load of railcars was carried out, taking

into account the proposed provisions. Calculations have shown with filler using, the maximum accelerations acting on the bearing structures of wagons are 4% lower than those accelerations obtained for bearing structures without fillers.

The results of determining the main strength indicators of bearing structures of freight cars are presented, taking into account the fillers using in their components. It has been established that the strength of the frames of the considered types of wagons under the main operating conditions is ensured. At the same time, the maximum equivalent stresses in the bearing structures of wagons are 4-9% lower than those in typical frame structures.

The conducted research will contribute to the creation of innovative structures of rolling stock and reduce the cost of its maintenance work in operation.

Keywords: *wagon, bearing structure, spine beam, dynamic loading, strength.*

Володимир Пузир¹, Олександр Крашенінін², Юрій Дацун³, Олександр Обозний^{4*}, Ольга Шапатіна⁵, Володимир Задесенець⁶

¹Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6096-9049>

²Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7462-3372>

³Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5794-1528>

⁴Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0843-6023>

⁵Кафедра управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-6212>

⁶Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6900-6265>

*Автор, відповідальний за листування: obozny@kart.edu.ua

ВИБІР СТРАТЕГІЇ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ ПРИ ЗАПРОВАДЖЕННІ СЕРВІСУ

В експлуатації часом виникають ситуації щодо невизначеності оцінки технічного стану обладнання локомотивів і одночасно вибору оптимальної стратегії його утримання, в тому числі з можливістю застосування сервісу. Застосування концепції сервісу дає можливість стимулювати роботу всіх підрозділів локомотивного господарства, економити всі види ресурсів на експлуатацію локомотивів.

Відповідно до цього в статті обґрунтовується вибір стратегії утримання локомотивного парку за допомогою використання положень теорії статистичних рішень. Для теоретичного обґрунтування переходу на сервіс щодо прийняття рішень в конфліктних ситуаціях і визначення оптимальної стратегії поведінки кожного з учасників в даній ситуації застосовувались підходи теорії ігор. Розглядалися підходи до вибору стратегії утримання локомотивного парку при запровадженні сервісу на основі положень теорії стратегічних ігор за критерієм максимуму ефективності.

Показано на прикладах рішення деяких задач вибору стратегії ТО, ПР локомотивів для різних виробничих ситуацій. Зроблено висновок, що найкраще описує різні ситуації і дозволяє приймати раціональні рішення змішана стратегія. Також зазначено, що для конкретизації алгоритму дій найбільш ефективним підходом є комплексне застосування теорії стратегічних рішень, теорії нечітких множин, теорії розпізнавання образів.

Ключові слова: локомотиви, гравці, теорія стратегічних ігор, стратегія, сервіс.

Вступ. На фоні загального погіршення технічного стану локомотивного парку залізниць, недостатнього фінансування його гілок і особливо локомотивного господарства Укрзалізницею зроблена спроба поступового реанімування галузі.

Це і структурне реформування підрозділів залізниць і оновлення рухомого складу за рахунок закупівлі закордонного швидкісного рухомого складу і вантажних локомотивів.

Але ці кроки в цілому ще не внесли суттєвих змін в роботу транспорту і поліпшення його технічного стану. Досі експлуатується тяговий і нетяговий рухомий склад, що досяг або перевершив нормативний термін його використання.

Разом з цим, як свідчить досвід розвинутих країн, доцільно при експлуатації локомотивів впроваджувати концепцію сервісу, оскільки це дає можливість стимулювати роботу всіх підрозділів локомотивного господарства, економити всі види ресурсів на експлуатацію локомотивів [1, 2, 3, 4].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. В наукових виданнях з'явилася ряд цікавих підходів щодо обґрунтування необхідності переходу до нових стратегій утримання тягового рухомого складу [1, 2, 3]. Зокрема, це запровадження системи АСУНТ, модульного формування локомотивів та принципів сервісу локомотивів.

Слід відзначити, що ці підходи мають деякі особливості, щоб на пряму запровадити їх в нашій країні: це можливість фінансування, промисловий потенціал і наявність накопиченого позитивного досвіду.

Разом з цим, у вітчизняних фахових виданнях проведені дослідження щодо особливості розвитку інфраструктури і особливостей утримання локомотивів [4, 5, 6, 7].

Вітчизняними і закордонними науковцями багато уваги приділялося оптимізації системи ТО, ПР ТРС, впровадження в ТО і ПР методів і систем діагностування, засобів автоматизації і інформаційних технологій, оцінці життєвого циклу ТРС [4, 8, 9, 10].

Поєднання цих підходів з позитивним досвідом країн, що запровадили принцип сервісу, дозволить адаптуватися галузі до нових реалій утримання рухомого складу.

Теоретичне обґрунтування переходу на сервіс достатньо глибоко можна описати застосовуючи підходи теорії ігор [11, 12], щодо прийняття рішень в конфліктних ситуаціях і визначення оптимальної стратегії поведінки кожного з учасників в цій ситуації.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є розгляд підходів щодо вибору стратегії утримання локомотивного парку при запровадженні сервісу на основі положень теорії стратегічних ігор за критерієм максимуму ефективності.

Матеріали та методи дослідження. Перехід до нових принципів управління господарством, в тому числі все більшої його частини на створення конкурентного середовища і відходу від планової до ринкової економіки, ставить перед галуззю складні задачі. На фоні значного погіршення технічного стану рухомого складу і повільного його оновлення необхідно шукати шляхи, що дозволять впевнено утримувати галузь як ресурсоутворюючу.

Аналіз досвіду багатьох країн показує на необхідність всілякої економії фінансових і промислових ресурсів при організації роботи локомотивного господарства в рамках нових підходів до утримання локомотивів.

Обґрунтування цих підходів можна описати математично, застосовуючи методи теорії ігор, де зіштовхнуться інтереси двох або більше супротивників або гравців. В загальному випадку під гравцями розуміються групи з протилежними інтересами. Для вирішення конфлікту у кожного з гравців маєтись декілька виборів. Остаточне прийняття рішення гравцем може залежати як від випадковостей, так і від поведінки інших гравців.

В кожній грі гравці обирають для себе найбільш благосприйнятне рішення, яке не може бути порушене діями супротивника або природи, тобто обирають стратегію [11, 12].

Розглянемо декілька конкретних прикладів із розв'язання конфліктної ситуації, що може виникнути при організації ТО, ПР локомотивів.

Нехай замовлення на організацію ремонту обладнання локомотивів (дизелів і тягових електричних машин) для деякого регіону локомотивних депо виконувалося заводами на суму 1 млрд. грн.

Сервісний центр може виконати це замовлення за умови аудиту технічного стану ТРС і потужностей локомотивних депо на суму значно меншу, але можуть виникнути декілька ситуацій.

По плану сервісного центру він може виконати замовлення на суму 45 млн. грн. на ремонт дизелів і тягових електричних машин для локомотивних депо. При цьому середня собівартість ремонту дизеля складає 500 тис. грн., а тягової електричної машини відповідно 100 тис. грн.

Реалізація виконання замовлення сервісним центром на період поставки його в депо складає відповідно по дизелях 600 тис. грн., а по тягових електричних машинах 130 тис. грн.

По прогнозу, в разі наявності заявок на сервіс обладнання від депо, сервісний центр може виконати замовлення у кількості: дизелів – 40 одиниць, тягових електричних машин – 250 одиниць. А в разі невизначеності кількості заявок від депо сервісний центр планує відремонтувати 50 дизелів і 200 тягових електричних машин.

Звичайно, у разі невизначеності замовлень сервісний центр, з одного боку, може перевищити витрати на організацію підготовки до сервісу, коли замовлень буде менше, а з іншого боку, втратити частину прибутку, коли не зможе забезпечити сервісом локомотивні депо.

Виникає необхідність обрати стратегію, щоб максимізувати середній прибуток в умовах виникнення можливих ситуацій.

Якщо сервісний центр розраховує на першу стратегію (С) (організація сервісу 40 дизелів і 250 тягових електричних машин) для стабільних замовлень (С) і нестабільних замовлень (Н), то прибутки сервісного центру відповідно складатимуть:

$$CC: 40 \cdot (600 - 500) + 250 \cdot (130 - 100) = 11500 \text{ тис. грн.}$$

$$CH: 40 \cdot (600 - 500) + 200 \cdot (130 - 100) - 50 \cdot (130 - 100) = 8500 \text{ тис. грн.}$$

При виборі другої стратегії (Н) і можливих ситуацій прибуток сервісного центру складатиме відповідно:

$$HC: 40 \cdot (600 - 500) + 200 \cdot (130 - 100) - 10 \cdot (600 - 500) = 9000 \text{ тис. грн.}$$

$$HN: 50 \cdot (600 - 500) + 200 \cdot (130 - 100) = 11000 \text{ тис. грн.}$$

Тоді платіжна матриця матиме вигляд (табл. 1)

Таблиця 1. Платіжна матриця

Стратегія \ Ситуація	Стабільна (С), тис. грн.	Нестабільна (Н), тис. грн.
С (40 дизелів, 250 ТЕМ)	11500	8500
Н (50 дизелів, 200 ТЕМ)	9000	11000

Для спрощення розрахунків скоротимо наведені значення на 500 тис. грн. і отримаємо наступну матрицю (табл. 2).

Обчислимо нижню і верхню ціну, грн. і маємо:

$\alpha = \max \min(17, 18) = 18$; $\beta = \min \max(23, 22) = 22$. матриця не має сідлового елемента. Це визначає необхідність застосування змішаної стратегії для сервісного центру і локомотивних депо.

Позначимо через (x_1, x_2) і (y_1, y_2) змішані стратегії гравців. Маємо систему рівнянь

$$\begin{cases} 23x_1 + 18x_2 = \zeta \\ 17x_1 + 22x_2 = \zeta \end{cases} \quad (1)$$

Таблиця 2. Платіжна матриця

Стратегія \ Ситуація	Стабільна (С), грн.	Нестабільна (Н), грн.	min, грн.
С (40 дизелів, 250 ТЕМ)	23	17	17
Н (50 дизелів, 200 ТЕМ)	18	22	18
max	23	22	

Оскільки $x_1 + x_2 = 1$, то рішення системи (1) визначає оптимальні змішані стратегії для сервісного центру: $x_1 = \frac{2}{5}$, $x_2 = \frac{3}{5}$.

Підставляючи отримані значення в (1) отримуємо ціну в грн.

$$\zeta = 23 \cdot \frac{2}{5} + 18 \cdot \frac{3}{5} = 20 \text{ грн.}$$

З урахуванням попереднього спрощення

$$\zeta = 20 \cdot 500 = 10000 \text{ тис. грн.}$$

Аналогічно оптимальна змішана стратегія (можливі ситуації) визначається з рівнянь

$$\begin{cases} 23y_1 + 17y_2 = \zeta \\ 18y_1 + 22y_2 = \zeta \end{cases} \quad (2)$$

Оскільки $y_1 + y_2 = 1$ отримуємо $y_1 = \frac{1}{2}$, $y_2 = \frac{1}{2}$

$$\zeta = 23 \cdot \frac{1}{2} + 17 \cdot \frac{1}{2} = 20 \text{ грн. (10000 тис. грн.)}$$

Таким чином, використовуючи змішану стратегію гравець (сервісний центр) в середньому буде отримувати 10000 тис. грн. за виконання замовлень з ремонту дизелів і тягових електричних машин.

Остаточно можна визначити кількість дизелів (Д) і тягових електричних машин (ТЕМ), для яких необхідно організувати сервіс при максимальному середньому прибутку сервісного центру

$$N = (40Д + 250ТЕМ) \cdot \frac{2}{5} + (50Д + 200ТЕМ) \cdot \frac{3}{5} = 46Д + 220ТЕМ$$

Тобто найкращим для сервісного центру є підготовка до організації ремонту 46 дизелів і 220 тягових електричних машин.

Розглянемо ситуацію, коли перед сервісним центром виникає завдання вибору оптимальної стратегії за таких умов. Сервісний центр організує ремонт і контроль готової продукції для потреб депо, що експлуатують рейкові автобуси.

Зокрема, в експлуатації через порушення вимог заводу-виробника досить часто спостерігається вихід з ладу гумово-вакуумних амортизаторів. В комплекті за договірною ціною цей амортизатор коштує 20 тис. у.о., але при виході з ладу організація його заміни в середньому коштує 200 тис. у.о.

У сервісного центру є декілька варіантів знизити ці витрати.

Можна застосувати деяку технологію, яка гарантує виявлення передвідмовного стану гумово-вакуумного амортизатора з імовірністю 0,75, але використання цієї технології коштує 20 тис. у.о.

Інша технологія достатньо дешева, але з імовірністю 0,9 вона може пошкодити амортизатор.

Сервісний центр може також отримати імпорتنі гумово-вакуумні амортизатори високої якості за 100 тис. у.о.

Оскільки сервісний центр організує сервіс декількох депо, йому необхідно мінімізувати середні витрати на один гумово-вакуумний амортизатор.

Цю задачу можна звести до рішення наступної ігрової ситуації, що наведена в табл. 3.

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Наведені в табл. 3 витрати отримані таким чином. Коли виконується перевірка за 20 тис. у.о. і визначається стан відмови гумово-вакуумного амортизатора, то витрати дорівнюють:

$$2.1: (-200) \cdot 0,25 + (-20) \cdot 0,75 + (-20) = -85 \text{ тис. у.о.}$$

Для інших сполучень стратегія – ситуація маємо:

$$2.2: (-20) \cdot 0,25 + (-20) \cdot 0,75 + (-20) = -40 \text{ тис. у.о.}$$

$$3.1: (-20) \cdot 0,1 + (-20) \cdot 0,9 = -20 \text{ тис. у.о.}$$

$$3.2: (-200) \cdot 0,1 + (-200) \cdot 0,9 = -200 \text{ тис. у.о.}$$

Як видно з наведеної табл. 3, гра не має сідлової точки, тобто потрібно використання змішаної стратегії. Зауважимо, що при застосуванні 2, 3, 4 стратегії можна зробити деякі спрощення, виходячи з наступних розрахунків.

При застосуванні 2-ї і 3-ї стратегії для ситуації наявності відмови змішане використання цих стратегій при будь-якому їх співвідношенні не перевищує витрати при застосуванні 4-ї стратегії.

$$(-85) \cdot 0,9 + (-20) \cdot 0,1 = -78,5 \text{ тис. у.о.} > -100 \text{ тис. у.о.}$$

Таблиця 3. Витрати коштів при різних співвідношеннях обраної стратегії і можливих ситуацій

Стратегія \ Ситуація	Стан гумово-вакуумних амортизаторів		Мінімум у рядку
	1 Відмова	2 Працездатний	
1. Без контролю	-200 тис. у.о.	-20 тис. у.о.	-200 тис. у.о.
2. Перевірка (р = 0,75)	-85 тис. у.о.	-40 тис. у.о.	-85 тис. у.о.
3. Перевірка (р = 0,9)	-20 тис. у.о.	-200 тис. у.о.	-200 тис. у.о.
4. Закупки по імпорту	-100 тис. у.о.	-100 тис. у.о.	-100 тис. у.о.
Максимум у стовпцях	-20 тис. у.о.	-20 тис. у.о.	

Але при ситуації, коли стан гумово-вакуумного амортизатора працездатний, співвідношення цих стратегій не повинно використовуватися в діапазоні менше 7:3 (або 0,7:0,3)

$$(-40) \cdot 0,7 + (-200) \cdot 0,3 = -80 \text{ тис. у.о.} > -100 \text{ тис. у.о.}$$

В іншому випадку

$$(-40) \cdot 0,6 + (-200) \cdot 0,4 = -104 \text{ тис. у.о.} < -100 \text{ тис. у.о.}$$

Звідси можна зробити висновок, що четверта стратегія не входить в оптимальну змішану стратегію.

Із стратегій, що залишилися, можна створити три гри 2×2.

При використанні 1-ї і 2-ї стратегії (табл. 4).

Таблиця 4. Витрати коштів при використанні 1-ї і 2-ї стратегії

Стратегія \ Ситуація	Стан гумово-вакуумних амортизаторів		Мінімум у рядку
	1 Відмова	2 Працездатний	
1. Без контролю	-200 тис. у.о.	-20 тис. у.о.	-200 тис. у.о.
2. Перевірка (р = 0,75)	-85 тис. у.о.	-40 тис. у.о.	-85 тис. у.о.
Максимум у стовпцях	-85 тис. у.о.	-20 тис. у.о.	

Ця гра має сідлову точку, тобто витрати на організацію сервісу гумово-вакуумних амортизаторів складуть 85 тис. у.о.

При використанні 1-ї та 3-ї стратегій (табл. 5).

Ця гра не має сідлової точки, тому потрібно визначити оптимальне співвідношення використання цих стратегій з системи рівнянь

$$\begin{cases} 200x_1 + 20x_2 = \zeta \\ 20x_1 + 200x_2 = \zeta \\ x_1 + x_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Знаходимо значення $x_1 = \frac{1}{2}$, $x_2 = \frac{1}{2}$.

Середня вартість застосування цих стратегій

$$\zeta = (-200) \cdot \frac{1}{2} + (-20) \cdot \frac{1}{2} = -110 \text{ тис. у.о.}$$

Таблиця 5. Витрати коштів при використанні 1-ї і 3-ї стратегії

Стратегія \ Ситуація	Стан гумово-вакуумних амортизаторів		Мінімум у рядку
	1 Відмова	2 Працездатний	
1. Без контролю	-200 тис. у.о.	-20 тис. у.о.	-200 тис. у.о.
3. Перевірка (p = 0,9)	-20 тис. у.о.	-200 тис. у.о.	-200 тис. у.о.
Максимум у стовпцях	-20 тис. у.о.	-20 тис. у.о.	

При використанні 2-ї і 3-ї стратегій (табл. 6)

Таблиця 6. Витрати коштів при використанні 2-ї і 3-ї стратегії

Стратегія \ Ситуація	Стан гумово-вакуумних амортизаторів		Мінімум у рядку
	1 Відмова	2 Працездатний	
2. Перевірка (p = 0,75)	-85 тис. у.о.	-40 тис. у.о.	-85 тис. у.о.
3. Перевірка (p = 0,9)	-20 тис. у.о.	-200 тис. у.о.	-200 тис. у.о.
Максимум у стовпцях	-20 тис. у.о.	-40 тис. у.о.	

Ця гра також не має сідлової точки. Визначимо оптимальне співвідношення при використанні цих стратегій з системи рівнянь

$$\begin{cases} 85x_1 + 20x_2 = \zeta \\ 40x_1 + 200x_2 = \zeta \\ x_1 + x_2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Знаходимо значення $x_1 = \frac{4}{5}$, $x_2 = \frac{1}{5}$

Середня вартість застосування цих стратегій

$$\zeta = (-85) \cdot \frac{4}{5} + (-20) \cdot \frac{1}{5} = -72 \text{ тис. у.о.},$$

Ці витрати найкращі з трьох отриманих, тому ці витрати є ціллю гри.

Остаточно оптимальна змішана стратегія з сервісу гумово-вакуумних амортизаторів буде такою $\left(0; \frac{4}{5}; \frac{1}{5}; 0\right)$. Тобто, коли сервісний центр проводить контроль стану гумово-вакуумних амортизаторів, йому доцільно застосовувати 2-гу і 3-ю стратегію, причому 2-у стратегію в 4 рази частіше.

Розглянемо ігрову задачу так званої торгівлі.

Нехай фірма А, що організується в нашій країні, планує організувати випуск власних запасних частин для швидкісного рухомого складу. Для цього потрібні ресурси і техніка, яких у фірми А немає.

В цій ситуації можливо заключити контракти з фірмою В, яка може забезпечити фінансування цього проекту, але ставить за це умову передати фірмі В частину випущених запасних частин для швидкісного рухомого складу за перший рік роботи фірми А.

Передбачається випуск запасних частин для швидкісного рухомого складу за рік в обсязі в середньому 250 одиниць за ціною 40 тис. грн. (всього 100 млн. грн.).

Для фірми А, що представляє країну з послабленою інфраструктурою і неефективною економікою, потрібно виконання цього завдання якомога швидко.

Фірма В вимагає отримати частину готової продукції більше половини, оскільки тільки це покриє її витрати, що для неї принципово.

Фірма В не може вимагати від фірми А виконання своїх інтересів, бо фірма А може залучити до випуску запчастин для ШРС іншу фірму С.

Складається конфліктна ситуація між взаємодією фірм, бо вони обидві отримують прибуток і сума їх платежів не дорівнюють нулю. Це кооперативна гра з ненульовою сумою. Оцінити можливості фірм можна шляхом визначення функції корисності.

Коли якась одна фірма отримує весь прибуток за рік, корисність для неї дорівнює 1, а для іншої відповідно 0. Тобто при рості корисності для однієї фірми, іншій фірмі приходить втрачати цю користь.

Найкращим рішенням є такий розподіл прибутку, коли добуток корисностей є максимальним.

Загалом функцію корисності можна задати на основі статистичних даних для конкретних умов функціонування будь-якого підприємства (фірми).

Запишемо функцію корисності для фірми А як функцію $y_1 = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4$ в загальному вигляді.

Тобто із зростанням платежів від фірми В фірма А отримує все більше користі в своїй діяльності.

Разом з цим для фірми В функція корисності зі збільшенням платежів також зростає, але в протифазі до інтересів фірми А. Цю особливість представимо для функції корисності у такому вигляді $y_2 = -b_1x^3 + b_2x^2 + b_3x + b_4$. Тобто, чим менше платежів витрачається на фірму В, тим менше значення приймає функція корисності.

Для умови досягнення оптимального значення функції корисності визначимо перемножену функцію $y = y_1 \cdot y_2$. У зв'язку зі складністю аналітичного представлення максимальної корисності надамо числовий приклад реалізації цієї задачі. З даних, що наведені в [1, 2] запишемо для фірми А функцію корисності у вигляді

$$y_1 = 10^{-6}x^3 - 0,62 \cdot 10^{-3}x^2 + 0,41 \cdot 10^{-1}x + 0,29 \cdot 10^{-1}$$

Для фірми В відповідно

$$y_2 = -0,3 \cdot 10^{-6} x^3 + 0,134 \cdot 10^{-4} x^2 + 0,115 \cdot 10^{-1} x - 0,2 \cdot 10^{-1}$$

Відповідність платежів і корисності від їх розподілу наведені в табл. 7.

Як видно з розрахунків, максимальне значення у досягається при розподілі платежів 30 млн. грн. фірмі А і 70 млн. грн. фірмі В, коли $y = 0,601$.

Таблиця 7. Відповідність платежів і корисності від їх розподілу

А	y_1	0	0,386	0,636	0,798	0,891	0,933	0,943	0,938	0,939	0,963	1
	x_1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
В	y_2	1	0,921	0,842	0,753	0,655	0,55	0,439	0,325	0,208	0,091	0
	x_2	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$y_1 \cdot y_2$		0	0,355	0,535	0,601	0,583	0,513	0,414	0,305	0,196	0,088	0

На рис. 1 представлено рішення цієї задачі. По осі абсцис у чисельнику відображено платіж на користь фірми А, у знаменнику – платіж на користь фірми В.

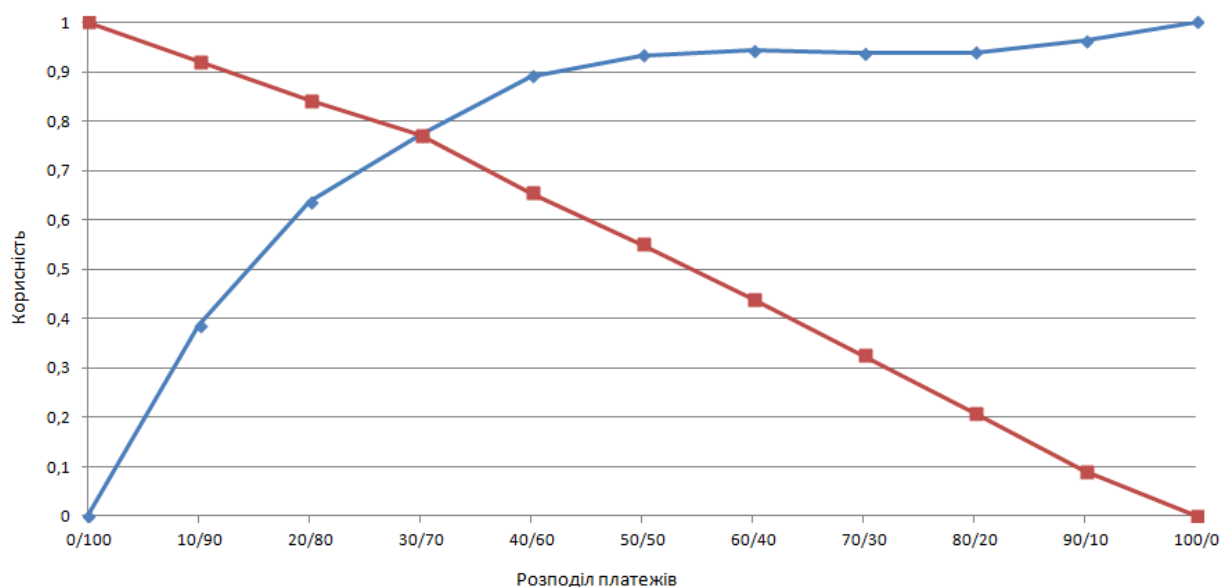


Рис. 1. Графічне представлення рішення ігрової задачі торгівлі

Висновки. 1. З проведених досліджень щодо вибору стратегії утримання локомотивного парку видно, що методами стратегічних ігор можна вирішувати досить різні типи задач, що пов'язані з прийняттям рішень, зокрема, обґрунтування поступового переходу до сервісу, вибір тактики обслуговування рухомого складу, оптимальна взаємодія між різними фірмами.

2. При реалізації ігор було показано, що змішана стратегія найкраще описує різні ситуації і дозволяє приймати раціональні рішення, в тому числі з точки зору максимального прибутку і оптимальної програми виконання ТО, ПР обладнання ТРС.

3. Показано, що складні задачі можна спростувати без втрати інформації і забезпеченні оптимальної стратегії роботи ремонтних підрозділів.

4. В разі ситуації, що притаманна кооперативній грі з ненульовою сумою доцільно отримати інформацію про динаміку функції корисності, по якій можна оцінювати обрані стратегії гравців.

5. Отримані результати є первинною оцінкою при прийнятті рішень і потребують для конкретизації алгоритму дії додаткових ресурсів і методик, зокрема, це можуть бути положення теорії нечітких множин, теорії розпізнавання образів. Комплексне їх застосування надасть більшої чіткості оцінювання при виборі стратегії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Просвирнов А.А. Модульность как фактор повышения эффективности управления жизненным циклом АЭС. // Инновационное проектирование. 2012. №5. С. 106 – 117.
2. Балабин В.Н., Брагин А.В. Сервис-модульные центры – новая философия эксплуатации и обслуживания модульных локомотивов. // Современные наукоемкие технологии. 2014. №4. С. 44-49.
3. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис / К.В. Липа и др. М.: ООО “ТМХ-Сервис”, 2012. 160 с.
4. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э.Д. Тартаковский и др. Луганск: Изд-во “Ноллидж”, 2011. 174 с.
5. Tartakovskiy E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. Systems approach to the organization of locomotive maintenance on Ukraine railways. In Rail Transport—Systems Approach. Springer, Cham, 2017. pp. 217-236
6. Szkoda, M., Kaczor, G., Pilch, R., Smolnik, M., Konieczek, Z. Assessment of the influence of preventive maintenance on the reliability and availability indexes of diesel locomotives. Transport Problems, 16(1), 2021. 5-18 p. DOI: 10.21307/tp-2021-001
7. Kadry S. Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques: Methods and Techniques. IGI Global, 2012. 461 p.
8. Ram M., Pham H. Advances in Reliability Analysis and its Applications. Springer Nature, 2019. 387 p.
9. Тартаковский Е.Д., Устенко О.В., Крашенин О.С. Оцінка показників ТО при подовженні терміну експлуатації ТРС по наробці // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. Харків: УкрДАЗТ, 2012. Вип. 132. С. 5-11.
10. Yevick D, Yevick H. Fundamental Math and Physics for Scientists and Engineers. John Wiley & Sons, 2014. 464 p.
11. Bellman R., Dreyfus S. Applied Dynamic Programming. Princeton University Press, 2015. 390 p.
12. Carter M, Price C., Rabadi G. Operations Research: A Practical Introduction. CRC Press, 2018. 470 p.
13. Kumar A., Ram M. The Handbook of Reliability, Maintenance, and System Safety through Mathematical Modeling. Elsevier Science, 2021. 520 p.
14. Cantos, P. Efficiency Measures and Output Specification: The Case of European Railways / Cantos P., Pastor J.M., Serrano L. // J. of Transport and Statistic . – 2000/ - Vol. 3, №3. – P. 61 – 68
15. Hughes, M. Cost and capacity drive high speed train design / M/ Hughes // Railway Gazette International. 2010. №5. P. 37-39
16. Krashenin O.S. New technology center for temple mills train service Eurostar // Railway Gazette International. 2008. №10. P. 820-821.

REFERENCES

1. Prosvirnov A.A. (2012). Modulnost kak factor povysheniia effektivnosti upravleniia zhiznennym tsyklom AES [Modularity as a factor in increasing the efficiency of NPP life cycle management]. *Innovative design*, 5, 106-117 [in Russian].
2. Balabin V.N., Bragin A.V. (2014). Servis-modulnye tsentry – novaia filosofia ekspluatatsii i obsluzhivaniia modulnykh lokomotivov [Service modular centers - a new philosophy of operation and maintenance of modular locomotives]. *Modern high technologies*, 4, 44-49 [in Russian].
3. K.V. Lipa. (2012). Avtomatizirovannaia sistema upravleniia nadezhnostii lokomotivov (ASUNT). Kontseptsiiia TMH-Servis [Automated locomotive reliability control system (ASCNT). *TMH-Service concept*]. Moscow, ООО ТМХ-Сервис [in Russian]
4. E.D. Tartakovskiy. (2011). Metody otsenki zhiznionogo tsykla tiagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Methods for assessing the life cycle of traction rolling stock of railways]. Lugansk, Noulidzh Publ. [in Russian]
5. Tartakovskiy E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. (2017) Systems approach to the organization of locomotive maintenance on Ukraine railways. In Rail Transport—Systems Approach. Springer, Cham, pp. 217-236
6. Szkoda, M., Kaczor, G., Pilch, R., Smolnik, M., Konieczek, Z. (2021). Assessment of the influence of preventive maintenance on the reliability and availability indexes of diesel locomotives. *Transport Problems*, 16(1), 5-18 p. DOI: 10.21307/tp-2021-001
7. Kadry S. (2012). Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques: Methods and Techniques. IGI Global., 461 p.
8. Ram M., Pham H.(2019). Advances in Reliability Analysis and its Applications. Springer Nature. 387 p.

9. Tartakovskiy E.D., Ustenko O.V., Krashenin O.S. (2012) Otsinka pokaznykiv TO pry podovzhenni terminu ekspluatatsii TRS po narobtsi [Assessment of indicators of maintenance when the term of operation of TRS is raised according to the narrative]. *Zb. Nauk. Prac. Ukr. Derzh. Akad. Zaliznych. Transp.* 132, 5-11 [in Ukrainian].
10. Yevick D, Yevick H. (2014). *Fundamental Math and Physics for Scientists and Engineers*. John Wiley & Sons. 464 p.
11. Bellman R., Dreyfus S. (2015). *Applied Dynamic Programming*. Princeton University Press, 390 p.
12. Carter M, Price C., Rabadi G. (2018). *Operations Research: A Practical Introduction*. CRC Press, 470 p.
13. Kumar A., Ram M. (2021). *The Handbook of Reliability, Maintenance, and System Safety through Mathematical Modeling*. Elsevier Science, 520 p.
14. Cantos, P. (2000). Efficiency Measures and Output Specification: The Case of European Railways *J. of Transport and Statistic.* 3 (3), 61 – 68.
15. Hughes, M. (2010). Cost and capacity drive high speed train design. *Railway Gazzete International.* 5, 37-39.
16. Krashenin O.S. (2008). New technology center for temple mills train service Eurostar. *Railway Gazzete International.* 10, 820-821.

Volodymyr Puzyr¹, Oleksandr Krashenin¹, Yurii Datsun¹, Oleksandr Obozny¹, Olga Shapatina², Volodymyr Zadesenets¹

¹Maintenance and Repair of Rolling Stock Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine

²Cargo and Commercial Work Management Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine

CHOICE OF LOCOMOTIVE PARK MAINTENANCE STRATEGY WHEN INTRODUCING THE SERVICE

In operation, sometimes there are situations of uncertainty in assessing the technical condition of locomotive equipment and at the same time choosing the optimal strategy for its maintenance, including the possibility of using the service. Application of the concept of service gives the chance to stimulate work of all divisions of locomotive economy, to save all kinds of resources for operation of locomotives.

According to this, the article substantiates the choice of strategy for maintaining the locomotive fleet using the provisions of the theory of statistical solutions. Game theory approaches were used to theoretically substantiate the transition to a service for decision-making in conflict situations and to determine the optimal strategy of behavior of each of the participants in this situation. Approaches to the choice of strategy for the maintenance of the locomotive fleet during the introduction of the service on the basis of the provisions of the theory of strategic games on the criterion of maximum efficiency were considered.

It is shown on examples of the decision of some problems of a choice of maintenance strategy of locomotives for various industrial situations. It is concluded that a mixed strategy describes different situations best and allows to made rational decisions. It is also noted that the most effective approach to concretize the algorithm of actions is the complex application of the theory of strategic decisions, the theory of fuzzy sets, the theory of pattern recognition.

Keywords: *locomotives, players, strategy games theory, strategy, service.*

Зеленько Юлія¹, Калимбет Микола².

¹ Професор, завідувача кафедрою Хімії та інженерної екології Дніпровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5551-0305>

² Аспірант кафедри Хімії та інженерної екології, Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-2209-6395>

ВИГОТОВЛЕННЯ СОРБЦІЙНОГО ПОЛОТНА З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК ЗАСІБ ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ РОЗЛИВІВ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН НА ТРАСПОРТІ

У статті піднімаються проблеми залізничного транспорту в багатьох країнах світу, в тому числі державах Євросоюзу та Україні, перевезення різних класів небезпечних вантажів, забезпечення безпеки під час їх перевезенні, посилення технічних норм і екологічних вимог до безпеки процесів перевезень небезпечних вантажів всіма видами транспорту, а також піднімається проблема локалізації та ліквідації аварій під час перевезення різних класів небезпечних вантажів залізничним транспортом. Обговорено методи та способи локалізації та ліквідації розливів небезпечних вантажів, описано сорбційний метод, як обраний метод для вирішення проблеми, дано короткий опис сорбентів, представлено різні варіанти та модифікації матеріалів для виготовлення вуглецевих сорбентів, підбрано матеріали які будуть використані для виготовлення універсального сорбційного полотна, описано методу отримання універсально-сорбційного полотна, продемонстровано спеціальну установку для карбонізації (Карбонізатор), яка була трохи модернізована та виготовлена авторами за кресленням конструкції установки Енгельського технологічного університету. Описано методу проведення експериментів. Дана характеристика універсального сорбційного полотна, його сорбційні властивості, а також запропоновано методу використання універсального сорбційного полотна, як засіб для локалізації та/або ліквідації рідких небезпечних речовин 3, 5, 8 класів небезпеки.

Ключові слова: екологічні технології, небезпечні вантажі, локалізація аварій, ліквідація аварій, карбонізація, універсальний сорбційне полотно.

Вступ. В даний час в багатьох країнах світу, в тому числі державах Євросоюзу та Україні, зростає розуміння важливості вирішення глобальних проблем транспортних комплексів. Це, перш за все, пов'язано з вимогами підвищення безпеки та ефективності перевезень, з ростом мобільності суспільства, необхідністю зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище та інших.

В останнє десятиліття спостерігається значне посилення технічних норм і екологічних вимог до безпеки процесів перевезень небезпечних вантажів всіма видами транспорту. Це безпосередньо пов'язано з екологічними наслідками можливих аварійних або технологічних проток небезпечних вантажів внаслідок порушення регламенту їх перевезення.

Метою дослідження є розробка заходів та раціонального підходу до ліквідації наслідків аварій при перевезенні небезпечних вантажів.

Наукова новизна полягає в оновленні підходу до ліквідації та локалізації аварій під час перевезення небезпечних речовин, який по суті не є принципово новим, для розвинених стран, таких як, наприклад, Європейський Союз, але який не використовується в Україні.

У зоні аварійного розливу часто спостерігається конфлікт інтересів між прагненням захисту навколишнього середовища і необхідністю якнайшвидшого відновлення вантажного сполучення. Багато факторів безпосередньо впливають на вибір і реалізацію відповідної технології локалізації або ліквідації. В умовах дефіциту часу і безлічі сценаріїв розвитку аварійної ситуації вирішити дану організаційну задачу оперативно не представляється можливим. Більш того, існуючі технології і регламенти проведення ліквідаційних заходів показують свою оперативну недієздатність і відстрочену ефективність. Таким чином, на практиці локалізація і ліквідація аварійних розливів небезпечних вантажів здійснюється частково або не проводиться зовсім. Узагальнюючи сказане вище, можна прийти до такого висновку: традиційні технології локалізації і ліквідації розливів небезпечних вантажів на залізничному транспорті не мають універсальності, необхідної для оперативного та ефективного захисту навколишнього середовища. Отже, необхідно розробити новий підхід, який навіть в складних умовах забезпечить простоту, універсальність і ефективність організації ліквідаційних заходів.

Існує багато способів ліквідації аварійних наслідків при перевезенні небезпечних вантажів, таких як нейтралізація, гасіння піною чи водою, але найбільш розповсюдженим методом локалізації ліквідації наслідків є використання сорбентів, тому що вони високу ступінь очищення, низьку собівартість, простоту у їх отриманні та використанні.

Отже, сорбент[1, 2] – спеціальний матеріал, який за рахунок фізико-хімічних процесів на власній поверхні здатен до поглинання речовин зі зменшенням їх початкової концентрації у вихідному розчині, саме цей механізм забезпечує високу ефективність ліквідаційних заходів на базі сорбційних технологій.

Сучасні сорбенти поділяються на[1,2]:

- вуглецеві адсорбенти на основі природних і синтетичних матеріалів (активоване вугілля, в тому числі таблетовані форми; активовані вуглецеві волокна);
- силікагелі;
- цеоліти;
- алюмогелі (альмагель, маалокс);
- алюмосилікати;
- інші неорганічні сорбенти;
- іонообмінні матеріали;
- органо-мінеральні і композиційні сорбенти;
- рідкі абсорбенти (вода, масла);
- органічні синтетичні і природні сорбенти (полісорб, ентеродез, ентеросорб; лігніни в різних модифікаціях – поліфепан; хітин, хітозан; целюлоза), пектини.

В умовах дефіциту фінансування природоохоронної діяльності все більший інтерес викликають субститути промисловим сорбентам на основі модифікації природних матеріалів і відходів.

В даній роботі був зроблений вибір на користь вуглецевих сорбентів, тому що вони простіші у виконанні та використанні, значно дешевші порівняно з іншими сорбентами, та мають досить високий ступінь очищення 95-99%.

На рис. 1 представлено різні варіанти та модифікації матеріалів на основі яких виготовляють вуглецеві сорбенти.

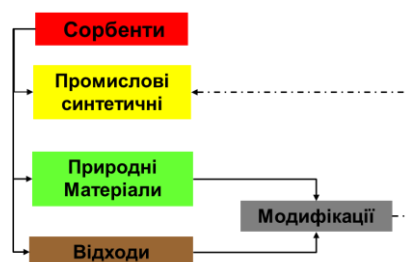


Рис. 1. Різні варіанти та модифікації матеріалів для виготовлення вуглецевих сорбентів

Взагалі, планується розробка універсального сорбенту як універсального засобу для локалізації та ліквідації наслідків аварій при перевезенні рідких фракцій небезпечних вантажів.

Варто зазначити, що сорбенти використовують для ліквідації аварійних наслідків тільки при перевезенні рідких небезпечних речовин. Саме тому при розробці універсального сорбенту ми виключили зі списку небезпечних вантажів які ми не можемо ліквідувати сорбційними методами, а залишили наступні небезпечні вантажі, які можна використовувати, для локалізації та ліквідації аварійних наслідків при перевезенні небезпечних вантажів, а саме:

Клас 3 Легкозаймисті рідини

Клас 5.1 Речовини, що окислюють

Клас 5.2 Органічні пероксиди

Клас 8 Корозійні речовини

У таблиці 1 представлені різні сорбційні матеріали, які використовують для різних класів небезпечних вантажів [3, 4, 5, 6, 7].

Таблиця 1. Аналіз практики застосування сорбційних матеріалів для різних класів небезпечних вантажів

Класи безпеки				
Сорбенти	3 клас	5 клас		8 клас
		5.1	5.2	
Активоване вугілля	+	+	+	+
Пісок	+			
Вовна	+			
Деревна тріска	+			+
Висушені зернові продукти	+			
Макулатура				+

Проаналізувавши дані з таблиці, було обрано декілька найбільш ефективних сорбційних матеріалів, а саме: активоване вугілля та відходи деревинної тріски. Як сировину для виготовлення активованого вугілля [8] пропонується використання відходів кавових зерен фракцією від 0,1 мм до 1 мм. Із відходів деревинної тріски або стружки пропонується використовувати крупну чи дрібну тріску або стружку розмірами від 5 мм до 20 мм.

Активний вугілля [9] – єдиний промисловий сорбент, що володіє неполярною поверхнею. Він добре адсорбує органічні, в тому числі неполярні речовини, наприклад: розчинники (вуглеводні, їх галогенопохідні, прості і складні ефіри тощо), барвники, нафтопродукти, тощо.

Активні вугілля в основному застосовуються для таких цілей[10]:

- очищення питних і стічних вод;
- рафінування цукру;
- очищення газів і рекуперації розчинників;
- отримання медикаментів;
- очищення спирту та вина;
- поділу газових сумішей;
- виробництва каталізаторів;
- одержання особливо чистих хімічних речовин;
- в системах захисту органів дихання.

Карбонізація (піроліз за своєю суттю) – найбільш поширений метод отримання вугілля та вуглецевих сорбентів. Дослідники у галузі [11,12,13,14,15] вважають, що під час карбонізації рослинної сировини супроводжується паралельними процесами дегідратації з утворенням вугілля та полімеризації з утворенням різноманітних смол через левоглюкозан.

Дослідники [16,17] класифікують процес карбонізації за трьома стадіями, які повною мірою описують хімізм карбонізації:

карбонізація в інтервалі температур від 150 °С до 300 °С: супроводжується розпадом основних складових геміцелюлоз (пентозанов) з виділенням у газову фазу води, кисень-вмістких газів, мурашиної та оцтової кислоти, фурфуролу;

карбонізація в інтервалі температур від 325 °С до 375 °С: супроводжується розпадом кристалічної целюлози та лігніну з утворенням води, вугілля, вуглекислого газу, метанолу та фенольних продуктів;

карбонізація в інтервалі температур від 400 °С до 650 °С: супроводжується складними піролітичними процесами, в результаті яких виникає розрив аліфатичних та ациклічних зв'язків сполук сировини з одночасними вторинними реакціями рекомбінації з утворенням напівкоксу;

карбонізація в інтервалі температур від 650 °С до 900 °С: остаточна карбонізація сировини, яка супроводжується процесами поліконденсації з втратою кисню, водню, азоту та сірки.

Остаточна карбонізація рослинної сировини настає при температурі обробки у діапазоні від 800 °С до 950 °С [18,19,20,21].

Загальна постановка експерименту карбонізації (методи та матеріали)

Процес карбонізації відходів виконували у оригінальному карбонізаторі принципова схема якого наведена на рис. 2. Карбонізатор (рис. 2) дозволяє проводити карбонізацію рослинних відходів в лабораторних умовах коксування без використання спеціального обладнання та інертного середовища. Зворотні клапани, встановлені на кришці обмежують доступ кисню у зоні карбонізації та не перешкоджають видаленню газоподібних продуктів.

Принцип його роботи: для карбонізації нам потрібно взяти циліндричну форму (1), у простір для розміщення відходів, зону карбонізації (2) засипати матеріал для карбонізування, потім потрібно накрити кришкою (3), потім треба зафіксувати болтами кришку форми (5), після чого карбонізатор відправляється у нагріту пічку. Вихід газу здійснюється через отвори зі зворотними клапанами для видалення продуктів карбонізації.

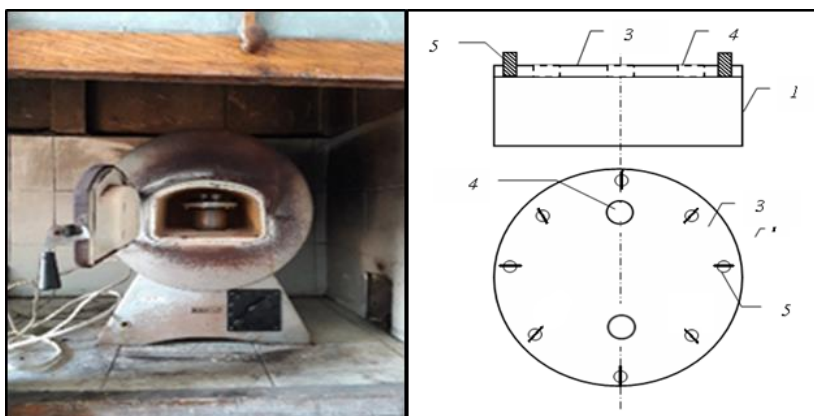


Рис. 2. Форма для карбонізації відходів:

а) загальний вигляд карбонізатора, б) принципова схем установки

1 – циліндрична форма, 2 – простір для розміщення відходів, зона карбонізації, 3 – кришка форми, 4 – отвори зі зворотними клапанами для видалення продуктів карбонізації, 5 – болти фіксації кришки форми

Дослідники у галузі [22] стверджують, що ця лабораторна установка здатна імітувати технологічні процеси карбонізації у промисловій шнековій печі. Карбонізація була організована у муфельній печі в умовах коксування при постійній температурі від 100 °С до 500 °С з шагом 50 °С, час карбонізації зразків відходів складав 30 хв. Після отримання сорбенту приступаємо до другої частини експерименту, а саме: визначення якісних та кількісних показників отриманого нами сорбенту.

У промисловості пропонується використовувати спеціальні піролізні установки.

Існує багато аналогів композитних універсальних сорбентів, які близькі за використанням, але як і усіх аналогів вони мають свої переваги

Авторами Зеленько Ю.В. та Сорока М.Л. був розроблений композиційний сорбент для очистки різноманітних поверхонь від нафтопродуктів [23], що містить висушене та гранульоване целюлозне волокно, карбонат кальцію та каолін, який додатково містить висушені та подрібнені сезонні відходи зон зелених насаджень міст (опале листя), целюлозне волокно, карбонат кальцію, сульфат кальцію та каолін при наступному співвідношенні компонентів, мас. %: 50-90; 3,0-15; 2,5-5; 2,5-10;

Перевагами даного сорбенту є те, що він зроблений з композитних матеріалів, а також те, що до складу входять різноманітні матеріали, частина з яких є відходами зон зелених насаджень, які використовуються як вторинна сировина. Цей сорбент має високу сорбційну ємність нарівні від 90% і вище.

Недоліками даного композиційного сорбенту для очистки різноманітних поверхонь від нафтопродуктів [22], є використання сорбенту у вигляді гранул, або листків, що ускладнює процес збирання відпрацьованого матеріалу, тому що дуже складно відділити гранули від ґрунту і до того ж, щоб якісно зібрати розливу небезпечну речовину, потрібно дуже багато гранул, або листків, щоб покрити усю площу розлитої плями.

Існують ще інші сорбенти, на основі цеолітів (універсальний мінеральний сорбент ЦТР-СОРБ).

Універсальний мінеральний сорбент ЦТР-СОРБ [23] призначений для ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з аварійними розливами нафти, нафтопродуктів, а також хімічно небезпечних речовин.

Сорбент застосовується для збору аварійних розливів з твердих поверхонь (асфальт, бетон, дерево, ґрунт тощо). Температура застосування від -50°C , до $+70^{\circ}\text{C}$, залежно від властивостей сорбата (речовина, що поглинається сорбентом продукту).

Сорбент може використовуватись транспортними і ремонтними підприємствами, дорожніми та евакуаційними службами для збору і видалення аварійних розливів масел, палива і робочих рідин (гальмівної, гідравлічної, що охолоджують) і очищення дорожнього полотна. Підприємствам хімічної та інших галузей промисловості використовують отруйні, токсичні і небезпечні для людини або навколишнього середовища рідини і рідкі речовини.

Перевагами даного сорбенту є:

- мінімальні витрати на ліквідацію аварійних розливів;
- висока вогнетривкість до 800°C ;
- можливість утилізації та вторинного використання після регенерації;
- екологічна безпека;
- використання для відновлення забруднених нафтопродуктами земель.

Однак недоліками відомого сорбенту є використання лише одного матеріалу як матеріалу для сорбенту, що не дає такого результату, також значні витрати на збір сорбенту після ліквідації та застосування сорбенту у вигляді сипучого матеріалу, значно здорожує процес ліквідації, є також недоліком цього сорбенту.

Основна характеристика активного вугілля та вуглецевих сорбентів загалом – це адсорбційні властивості, які визначаються текстурою сорбенту та природою поверхневих функціональних груп [14], а також вихід продукту карбонізації.

На першому етапі дослідження було вивчено залежність виходу продукту карбонізації від температури у камері лабораторної установки (див. рис. 3). Результати експериментів групувані у графіку залежності $E=f(T)$ подані на рис. 3

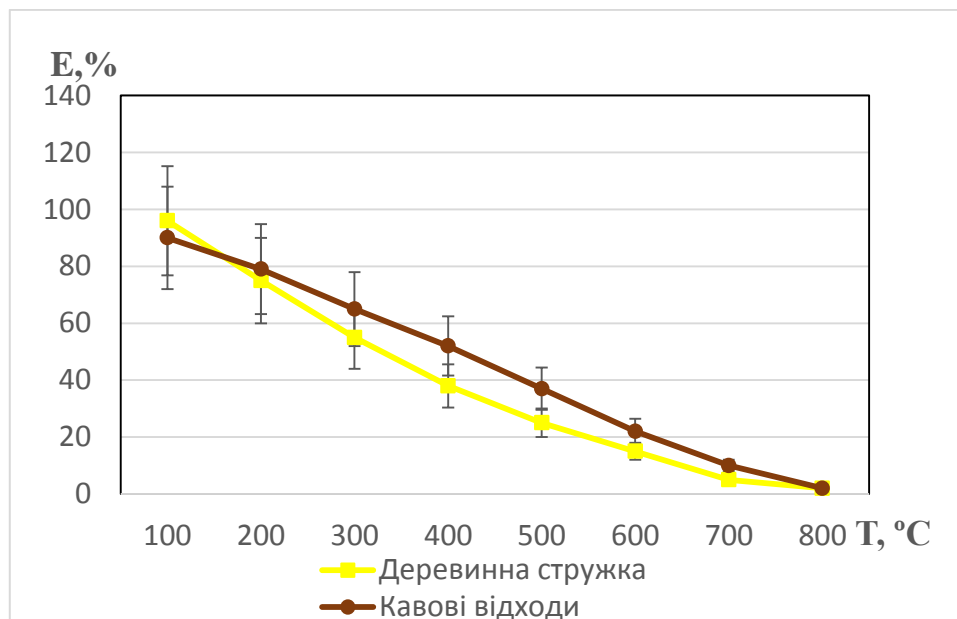


Рис. 3. Графік залежності виходу продукту карбонізації від температури у камері карбонізації

Аналізуючи графік залежності $E=f(T)$ (рис. 3), можна дійти висновку, що збільшення температури обробки відходів зменшує вихід продукту карбонізації за квадратичною залежністю. Вихід продукту карбонізації деревинної стружки при низьких температурах сягає 50...60 %, при помірних – 30...50 %, при середніх менше від 25 %.

Вихід продукту карбонізації кавових відходів при низьких температурах сягає 70...80 %, при помірних – 50...69 %, при середніх менше від 40 %. Створення інертного середовища (азот, аргон тощо) дозволить збільшити вихід продукту, особливо при середніх температурах карбонізації.

Варто зазначити, що вологість вихідних матеріалів, а саме: відходів кавової продукції та деревинної стружки, складала 5%. Розміри фракцій для кавових відходів були від 0,1 мм до 1 мм., а для відходів деревинної тріски або стружки від 5мм до 20 мм.

Далі визнається його адсорбційні характеристики за модельними розчинами речовин класів небезпек 3, 5, 8. Як було вище згадано, саме ці класи небезпеки містять рідкі небезпечні вантажі, що перевозяться залізницею.

Як модельні розчини пропонується використовувати речовини, що більш за все перевозяться різними видами транспорту. Переглянувши статистичні дані динаміки перевезень небезпечних речовин різними видами транспорту, з'ясували, що:

для 3 класу небезпеки – рідкі речовини, що більш за все перевозяться різними видами транспорту – це бензинове або дизельне пальне, авторами було обрано бензинове пальне.

для 5 класу небезпеки – рідкі речовини, що більш за все перевозяться різними видами транспорту – це перекис водню (H_2O_2).

для 8 класу небезпеки речовини що більше всього перевозяться різними видами транспорту відносяться 2 категорії луги та кислоти, саме тому у роботі було обрано 2 речовини це аміак, як представник категорії луги, та оцтова кислота, як представник категорії кислоти.

Проведення аналізу планується за стандартизованими гравіметричними методиками.

Наразі визначено адсорбційну активність за модельним розчином нафтопродуктів. Дослідження проводили за стандартизованою методикою «МВВ № 081/12-0116-03 Методика виконання вимірювань масової частки нафтопродуктів гравіметричним методом»[24].

Для цього дослідження були виготовленні макети сорбційних полотен різної густини та відсоткового складу, для того, щоб визначити за якими параметрами сорбційне полотно

демонструє найкращий результат. На рис. 4 подано детальні макети сорбційних полотен, із їх різними параметрами.

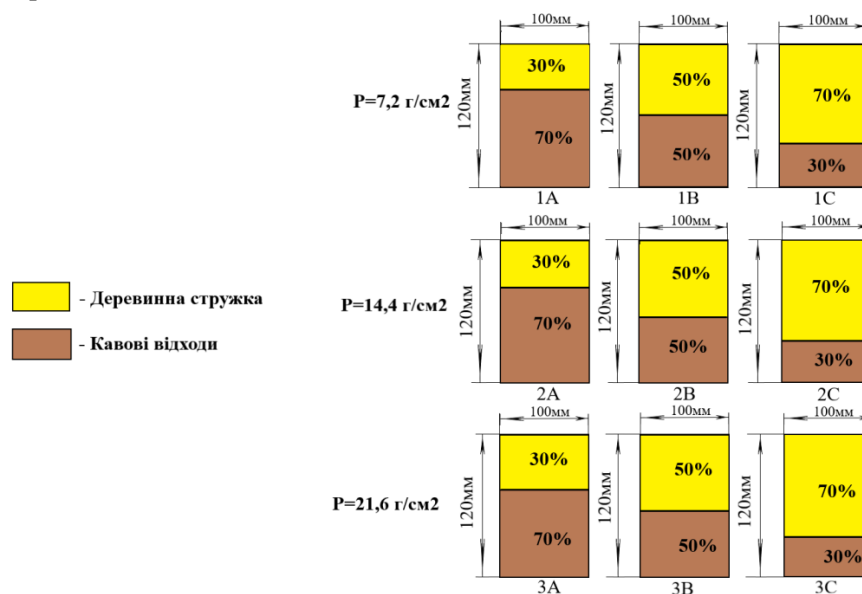


Рис. 4. Детальні макети сорбційних полотен, із їх різними параметрами

Ефект очищення універсального сорбційного полотна складає $> 90\%$. Похибка вимірювань не перевищувала 4%

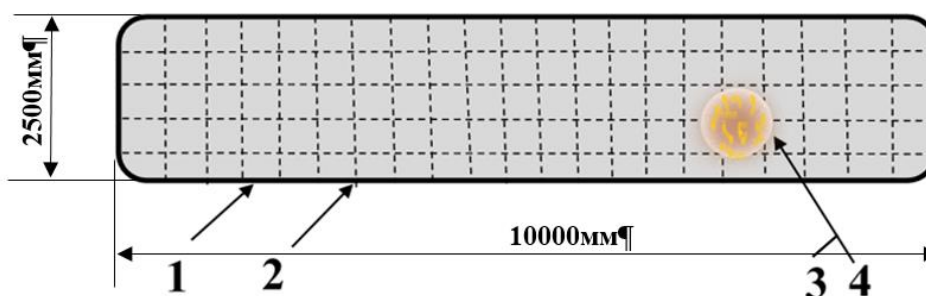
Використовувати сорбент можна у різному вигляді. Перший варіант це використання його у вигляді дрібнозернистої фракції. Другий варіант це завантаження вугілля, у спеціальні мішки, з фільтрувального матеріалу для виготовлення або сорбційних бонів [24], або сорбційних матів, чи сорбційних подушок.

Ми пропонуємо використовувати сорбент у вигляді сорбційного покривала.

Нами планується створення універсального полотна щільністю сорбційного полотна 1200г/м^2 , яке складатиметься із універсального сорбенту з композитних матеріалів (відходи кави, та деревинна стружка) а також мішківини у яку буде засипатись, вище згаданий універсальний сорбент з композитних матеріалів. Мішок пропонується виготовляти з фільтрувальної тканини ТГФ-8.

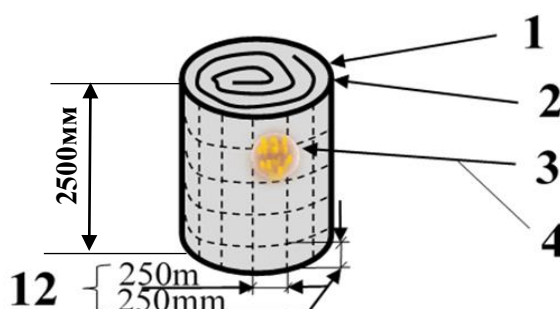
Тканина фільтрувальна поліпропіленова ТГФ-8 – це міцна, стійка до агресивного середовища тканина білого кольору з поліефірної нитки для фільтрації. Щільність 470г/м^2 , та температурним діапазоном від -100C до $+90\text{C}$. Використовується в гірничорудній, хімічній, будівельній промисловості. Служити також для пошиття різних виробів: мішки, фільтраційні рукави, пакувальні пристосування, повітряні фільтри, хімічні порошки. Склад: 100% нитка ПП. [24]

На рис. 5, а) та 5, б) схематично подано універсальне сорбційне полотно, що пропонується використовувати для локалізації ліквідації наслідків аварії при перевезенні небезпечних вантажів.



а

Рис. 5, а) Універсальне сорбційне полотно у розгорнутому вигляді



б

Рис. 5, б) Універсальне сорбційне полотно у згорнутому вигляді

Запропоноване сорбційне полотно (8) містить мішок (1) з фільтрувальної тканини (2), кавові відходи (до 70 %) (3), деревинна стружка (до 70 %) (4) з густиною сорбційного полотна (8) 1200 г/м² і більше. Сорбційне полотно (8) додатково буде прострочуватись. Ячейки (12) сорбційного полотна (8) пропонується виготовляти із розмірами 250 мм × 250 мм.

Контактування сорбційного полотна (8) відбувається спочатку мішком (1) з фільтрувальної тканини (2), а далі із сумішшю кавових відходів (3) та деревинної стружки (4).

Це полотно дозволить швидко ліквідувати розлив небезпечного вантажу в результаті аварії, під час перевезення їх залізничним транспортом.

На рис. 6, а) наведено приклад розробленої авторами процедури ліквідації наслідків аварії при перевезенні небезпечних вантажів з нафтопродуктами з використанням сорбційних матеріалів, та на рисунку 6, б) детально подано контейнер (3) з сорбційним полотном.

Схема працює таким чином. До локомотива (1) прикріплюється вагон (2) з контейнерами (3) із сорбційними полотнами (8), якщо виникає аварійна ситуація при перевезенні рідкого небезпечного вантажу (10), то спеціально навчена людина відкриває контейнери (3) із сорбційним полотном (8), дістане так звані сорбційні полотна (8), та закидає ними, зону утворення дзеркала (11) витоку (7), для того, щоб запобігти потрапляння небезпечного вантажу (10) у товщу ґрунту, та зменшити зону ураження товщі ґрунту (9). Потім відпрацьовані сорбційні полотна (8) засовують, назад у контейнера (3), а по прибутті локомотива (1) до місця його постійної дислокації, сорбційне полотно (8) регенерують, а після регенерації його можна використовувати знову.

Таким чином використання запропонованого універсального сорбційного полотна (8) дозволяє локалізувати та/або ліквідувати рідкі небезпечні речовини 3, 5, 8 класів небезпеки на рівні адсорбційної активності більше 90 %.

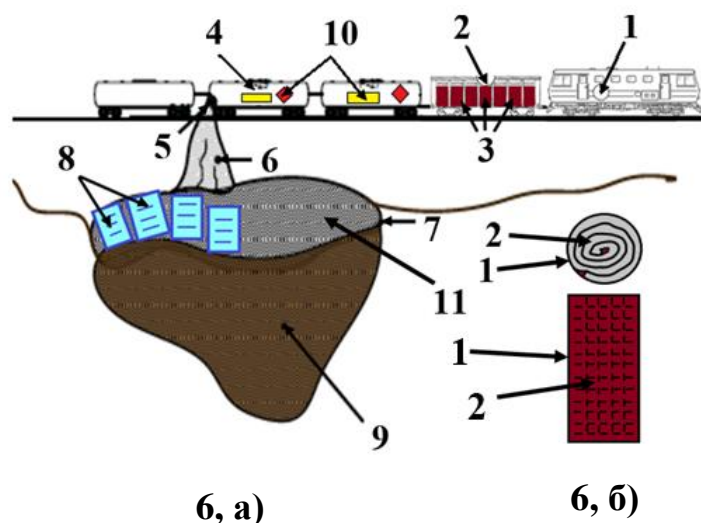


Рис. 6, а) Візуалізація процедури ліквідації наслідків аварії при перевезенні небезпечних вантажів (нафтопродуктів)

1 – локомотив; 2 – вагон із сорбційним полотном (8); 3 – контейнери з сорбційним полотном (8); 4 – цистерна з рідким небезпечним вантажем (10); 5 – отвір, через який трапляється виток небезпечної вантажу (10); 6 – поверхневий стік рідкого небезпечного вантажу (10) за рельєфом місцевості; 7 – зона утворення дзеркала витoku (11); 8 – сорбційне полотно; 9 – зона ураженої товщі ґрунту;

Рис. 6,б) Контейнер з сорбційним полотном

1 – контейнер для транспортування сорбційних полотен (8) 2 – сорбційне полотно (8) у складеному вигляді

Реалізація представленої технологічної схеми дозволяє не тільки отримати оперативний доступ до ліквідаційних матеріалів в зоні утворення і локалізації розливу, але і в значній мірі зекономити час на організацію забезпечення даними матеріалами.

Висока ефективність запропонованого методу забезпечується вибором відповідного сорбенту. Як зазначалося вище, ефективний вибір сорбенту є складним організаційним завданням, що важко реалізовується в оперативних умовах проведення ліквідаційних заходів. Представлена технологічна схема дозволяє вирішити дану проблему завчасно: вибір, придбання і накопичення сорбентів відбувається задовго до виникнення аварійної емісії.

Висновки. Мета та завдання що автори ставили перед собою, можна вважати виконаною на 100%. Авторами було:

- 1) Розроблено та виготовлено спеціального сорбційного полотна, як універсального засобу локалізації та ліквідації аварійних наслідків при перевезенні небезпечних вантажів.
- 2) Перевірено кількісні та якісні характеристики універсального сорбційного полотна.
- 3) Доведено можливість використання універсального сорбційного полотна, як засобу локалізації та ліквідації аварійних наслідків при перевезенні небезпечних вантажів.
- 4) Удосконалено методику локалізації та ліквідації аварійних наслідків при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом –використання сорбційних покривал, у якості ліквідаційного матеріалу.

Зробивши висновки ми повинні зрозуміти наскільки це важливо дотримуватись усіх правил безпеки, а також дослухатись до порад авторів, які можуть покращити стан справ, у питаннях, перевезенні небезпечних вантажів, їх локалізації, та ліквідації при їх перевезенні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аветісян В.Г., Андронов В.А. Розробка рекомендації щодо проведення аварійно-рятувальних робіт на залізничному транспорті. // Звіт про науково-дослідну роботу. / Міністерство України з питань надзвичайних

ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. Національний університет цивільного захисту України. м. Харків, 2010. 103 с.

2. Zelenko, Y., Malovanyu, M., Tarasova, L. (2019). Optimization of heat-and-power plants water purification. 2019 // Chemistry and Chemical Technology, 13(2), стр. 218–223

3. Eakalak Khan Wanpen VirojnagudThunyalux Ratpukdi. (2004). Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. November 2004, Volume 57, Issue 7, Pages 681–689.

4. Давыдова С. Л. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде. м. РУДН. 2004. 131. с.70.

5. Zelenko, Yu., Bezovska, M., Skvireckas, R., Neduzha, L. (2020). The impact of motor oils quality on improving the reliability in operation of traction rolling stock. //Transport Means – Proceedings of the International Conference, 2020. September, стр. 568–572.

6. Zelenko, Y., Bezovska, M., Kuznetsov, V., Muntian, A. Rocznik. (2020). Resource saving and eco-friendly technology for disposal of used railroad engine oils. // Ochrona Srodowiska. 2020, 22 (1), стр. 171–180.

7. Zelenko, Yu., Lunys, O., Neduzha, L., Steišūnas, S. (2019). The assessment of negative impact of oil products on railroad track and rolling stock constructions. // Transport Means – Proceedings of the International Conference, 2019 October, стр. 1300–1306.

8. Електронний ресурс URL - <https://vetline.pro/blog/vidi-sorbentiv> (Дата звернення: 01.11.2021 р.)

9. Roberta A.Browna, Andrew K.Kercherb, Thanh H.Nguyena, Dennis C.Nagleb, William P.Balla. (2006) Production and characterization of synthetic wood chairs for use as surrogates for natural sorbents // Organic Geochemistry. Volume 37, Issue 3. March 2006. Pages 321–333.

10. Богаев А. В., Лебедев И. А., Карчевский Д. Ф. Получение активных углей из скорлупы кедрового ореха / и др. // Ползуновский вестник, 2013. № 1. С. 282–284.

11. Осокин В. М., Сомин В. М. Исследования по получению новых сорбентов из растительного сырья для очистки воды // Ползуновский вестник, 2013. № 2. С. 280–282.

12. Глазкова Е. А., Новый синтетический сорбционный материал // Химия нефти и газа. – Томск: ИОА СО РАН, 2003. С. 592.

13. Коронелли Т.В. Принципы и методы интенсификации биологического разрушения углеводов в окружающей среде // Прикладная биохимия и микробиология. 1996. Т.32. №6. С. 579–585.

14. Кузнецов Б. Н. Каталитическая химия растительной биомассы // Соросовский образовательный журнал, 1996. № 12. С. 47–55.

15. Скурлатов Ю. И. Скурлатов, Г. Г. Введение в экологическую химию Дука, А. Мизити. М.: Высшая школа, 1999. 400 с.

16. Давыдова С. Л. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде //М. РУДН, 2004. 131 с.

17. Use of Sorbent Materials in Oil Spill Response / The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), Technical information paper. 2012. Vol. 8. 12 p.

17. Глазковская М. А. Состояние, динамика и диагностика почвенных экосистем, загрязненных нефтью, нефтепродуктами и промышленными водами // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1988. С. 7–50.

19. Ануров С. А. Анурова, Т. В. Клушин В. Н. и др., Получение углеродных адсорбентов из растительных отходов. Карбонизация сырья [электронне видання] // Электронный научный журнал «Исследовано в России», 2011. URL: <http://www.sci-journal.ru/articles/2011/017.pdf>. (Дата звернення: 01.11.2021 р.)

20. Валеєв І.А., Газизов Р.А. Разработка промышленной установки для получения сырья используемого в производстве сорбента медицинского назначения [текст] // Вестник технологического университета, 2015 Т.18, № 15.

21. Lu, G.Q., Do, D.D. (1994). Development of carbonaceous adsorbents from coal reject for acidic gases removal. // Journal Gas Separation and Purification Volume 8, Issue 1, 1994, Pages 17-29. ISSN: 09504214.DOI: 10.1016/0950-4214(94)85004-6

22. База патентів України Електронний ресурс: <https://uapatents.com/6-103388-kompozicijnijj-sorbent-dlya-ochistki-riznomanitnikh-poverkhon-vid-naftoproduktiv.html> (Дата звернення: 01.11.2021 р.)

23. Електронний ресурс: <http://tiet-sorbent.ru/granular%20sorbents/ctr%20sorbent.htm> (Дата звернення: 01.11.2021р.)

24. D. Dave, A.E. Ghaly Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis [Science Publications] // American Journal of Environmental Sciences 7 (5): 423-440, 2011.ISSN 1553-345X

25. Електронний ресурс: https://epicentrk.ua/shop/tkan-filtrovalnaya-tgf-8-56035.html?ssh=revenue&gclid=Cj0KCQiAkuP9BRCKARIsAKGLE8V7AXF7PBj8iYH0ZnXM7_ldMfHy3o5zovisrBvI-x65f3RwcRSZegaAp0WEALw_wcB (Дата звернення: 01.11.2021р.). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.028>

REFERENCES

1. Avetisyan V.G., Andronov V.A.(2010) Rozrobka rekomendacii schodo provedennia avariino-riatuvalnikh robit na zaliznichnomy transporti[Development of recommendations for carrying out emergency and emergency robots on retail transport.] zvit pro naukovo-doslidnii roboti. Ministerstvo Ukraini z pitan nadzvichainix sityaciy ta u spravax zaxisty naseleण्या vid naslidkiv Chornobilskoj katastrofy. Nacionalniy unversitet civilnogo zaxisty Ykrainu. m. Kharkiv[in Ukrainian].

2. Zelenko, Y., Malovanyu, M., Tarasova, L. (2019). Optimization of heat-and-power plants water purification. 2019. Chemistry and Chemical Technology. 13(2). P. 218–223.

3. Eakalak Khan Wanpen VirojnagudThunyalux Ratpukdi. (2004). Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. November 2004. Volume 57. Issue 7. Pages 681-689.
4. Davydova S. L. (2004) Neft i nefteprodukty v okruzhaiu srede[Oil and oil products in the environment.] m. RUDN. 131. c.70.
5. Zelenko, Yu., Bezovska, M., Skvireckas, R., Neduzha, L. (2020). The impact of motor oils quality on improving the reliability in operation of traction rolling stock. Transport Means – Proceedings of the International Conference, 2020 September, p. 568–572.
6. Zelenko, Y., Bezovska, M., Kuznetsov, V., Muntian, A. Rocznik. (2020). Resource saving and eco-friendly technology for disposal of used railroad engine oils. Ochrona Srodowiska. P. 171–180.
7. Zelenko, Yu., Lunys, O., Neduzha, L., Steišūnas, S. (2019). The assessment of negative impact of oil products on railroad track and rolling stock constructions. Transport Means – Proceedings of the International Conference. 2019. October. P. 1300–1306
8. Electronic view. URL - <https://vetline.pro/blog/vidi-sorbentiv>.
9. Roberta A.Browna, Andrew K.Kercherb, Thanh H.Ngyuena, Dennis C.Nagleb, William P.Balla. (2006) Production and characterization of synthetic wood chairs for use as surrogates for natural sorbents. Organic Geochemistry. Volume 37. Issue 3. March 2006. Pages 321-333.
10. Bohaev AV, Lebedev IA, Karchevskii DF, (2013) Poluchenie aktivnykh uhlei iz skorlupy kedrovoho orekha[Obtaining active coals from the shell of a pine nut] etc. Polzunovsky Bulletin, 2013. No. 1. P. 282-284.[in Russian]
11. Osokin VM, Somin VM (2013) Issledovaniia po polucheniiu novykh sorbentov iz rastitelnoho syria dlia ochistki vody. [Research on obtaining new sorbents from vegetable raw materials for water purification]. Polzunovsky Bulletin. 2013. № 2. P. 280-282 [in Russian].
12. Glazkova EA.(2003) Novyi sintrticheski sorbcionnyi material [New synthetic sorption material]. Chemistry of oil and gas. -Tomsk: IOA SO RAN, 2003 . p. 592 [in Russian].
13. Coronelli T.V. Principles and methods of intensification of biological destruction of hydrocarbons in the environment // Applied Biochemistry and Microbiology. 1996. 32. №. 6. P. 579-585 [in Russian].
14. Kuznetsov BN (1996) Kataliticheskaia khimia rastitelnoi biomassy [Catalytic chemistry of plant biomass]. Soros educational journal, 1996. №. 12. P. 47–55 [in Russian].
15. Skurlatov Yu. I. Skurlatov, GG(1999) Vvedenie d ekolohicheskuiu khimiiu Duka, A. Miziti.M. [Introduction to ecological chemistry Duka, A. Miziti. M.]: Higher school. 1999. p. 400 [in Russian].
16. Davydova S. L. (2004) Neft I nefteprodukty v okruzhaiushei srede [Oil and oil products in the environment] M. RUDN, 2004. p.131 [in Russian].
17. Use of Sorbent Materials in Oil Spill Response. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), Technical information pa-per. 2012. Vol. 8. p.12
18. Glazovskaya MA 1(988) Sostoianie, dinamika I diahnostika pochvennykh ekosistem, zahriaznennix neftiu, nefteproduktami I promyslovymi vodami [State, dynamics and diagnostics of soil ecosystems contaminated with oil, oil products and industrial waters] Restoration of oil-contaminated soil ecosystems: Sat. scientific. tr. M.: Nauka. 1988. P. 7–50[in Russian].
19. Anurov SA Anurova, TV Klushin VN et al., (2011) Poluchenie uhlerodnykh adsorbentov iz rastitelnykh otkhodov. Karbonizacia Syria [Obtaining carbon adsorbents from plant waste. Carbonization of raw materials] Electronic scientific journal «Investigated in Russia», 2011. URL: <http://www.sci-journal.ru/articles/2011/017.pdf> [in Russian].
20. Valeev I.A., Gazizov R.A. (2015) Razrabotka promyshlennoi ystanovki dlia polychenia Syria ispolzuemoho v proizvodstve sorbenta medetsinskoho naznachenia [Development of an industrial plant for obtaining raw materials used in the production of a sorbent for medical purposes] Bulletin of the Technological University. 2015. Vol.18. №. 15.
21. Lu, G.Q., Do, D.D. (1994). Development of carbonaceous adsorbents from coal reject for acidic gases removal. Journal Gas Separation and Purification. Vol. 8. Issue 1. 1994, Pages 17-29. ISSN: 09504214.DOI: 10.1016/0950-4214(94)85004-6
22. Baza Patentiv Ukrainy [Database of patents in Ukraine]: <https://uapatents.com/6-103388-kompozicijnijj-sorbent-dlya-ochistki-riznomanitnykh-poverkhon-vid-naftoproduktiv.html>.
23. Electronic view: <http://tiet-sorbent.ru/granular%20sorbents/ctr%20sorbent.htm>.
24. D. Dave, A.E. Ghaly Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis [Science Publications] // American Journal of Environmental Sciences 7 (5): 423-440, 2011. ISSN 1553-345X
25. Electronic view: https://epicentrk.ua/shop/tkan-filtrovalnaya-tgf-8-56035.html?ssh=revenue&gclid=Cj0KCQAKuP9BRCKARIsAKGLE8V7AXF7PBIj8iYHld5MznXxM7_r. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.028>

Zelenko Julia¹, Kalimbet Mukola²

¹ Head of Department Chemistry&Ecological Engineering, Dnipro National University of Railway Transport named after V.Lazaryan, Dnipro, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5551-0305>

² Postgraduate student of Department Chemistry&Ecological Engineering, Dnipro National University of Railway Transport named after V.Lazaryan, Dnipro, Ukraine

PRODUCTION OF THE SORPTION SHEET FROM COMPOSITE MATERIALS AS A LIQUIDATION AGENT FOR SPILL RESPONSE OF HAZARDOUS MATERIALS ON TRANSPORT

The article raises the issues of rail transport in many countries, including the European Union and Ukraine, transportation of various classes of dangerous goods, ensuring safety during their transportation, strengthening technical standards and environmental requirements for safety of dangerous goods transportation by all modes of transport and the problem of localization and liquidation of accidents during transportation of various classes of dangerous goods by rail is raised. Methods and methods of localization and elimination of spills of dangerous goods are discussed, the sorption method is described as the chosen method to solve the problem, a brief description of sorbents is given, various variants and modifications of materials for carbon sorbents are presented, materials will be used for universal sorption web, method of obtaining a universal sorption web, demonstrated a special installation for carbonization (Carbonizer), which was slightly modernized and made by the authors according to the design of the Engels University. The method of conducting experiments is described. The characteristics of the universal sorption web, its sorption properties are given, and also the technique of using the universal sorption web as a means for localization and / or liquidation of liquid hazardous substances of 3, 5, 8 hazard classes is proposed.

Keywords: *environmental technologies, dangerous goods, localization of accidents, liquidation of accidents, carbonization, universal sorption web.*

Юрій Дубравін^{1*}, Віктор Ткаченко², Олександр Снівак³

¹Доцент, 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>

²Професор, 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>

³Доцент, Кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2876-4067>

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

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ

В роботі проведено дослідження енергетичних характеристик активного тягового перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією в складі тягового електропривода електровоза змінного струму. Тяговий перетворювач забезпечує широтно-імпульсне регулювання напруги на колекторних тягових двигунах постійного струму і належить до базової схеми змінно-постійного струму (AC/DC).

Перехідний процес при комутації транзисторних ключів супроводжується значними стрибками напруги, що обумовлені реакцією індуктивності розсіяння тягового трансформатора. Дослідження показали, що діодні розрядні буферні контури на вході навантаження не забезпечують розрядку електромагнітної енергії, накопиченої в обмотках трансформатора. Для зниження комутаційних перенапруг необхідно використовувати конденсатори великої ємності.

Розроблено алгоритм роботи тягового перетворювача з використанням широтно-імпульсного та фазового регулювання випрямленої напруги. Комутація транзисторних ключів відбувається при наявності паралельного кола протікання струму. При цьому створюються умови для розрядки електромагнітної енергії, накопиченої в колі вторинної обмотки тягового трансформатора.

Розроблена математична модель дозволяє дослідити електромагнітні процеси, що відбуваються при комутації транзисторних ключів та оцінити енергетичну ефективність електровоза з активним тяговим перетворювачем. У процесі моделювання досліджено вплив параметрів тягового перетворювача та алгоритму роботи на коефіцієнт потужності електропривода, сумарні коефіцієнти спотворень THD по струму та напрузі і відносні значення випрямленої напруги.

Запропоновано заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності та зниження рівня емісії вищих гармонік струму в тягову мережу.

Ключові слова: математична модель, комутація, коефіцієнт потужності, активний тяговий перетворювач, алгоритм роботи.

Вступ. Електровози з колекторними тяговими двигунами (КТД) та діодними випрямлячами (ВЛ80^K, ВЛ80^T, ВЛ80^C) складають в даний час основу парку вантажних та пасажирських електровозів змінного струму «Укрзалізниця». Тільки незначна частина парку – електровози 2ЕЛ5 обладнані тиристорними випрямно-інверторними перетворювачами (ВІП). Загальними недоліками тягових електроприводів з КТД є низькі значення коефіцієнта потужності K_p , що не

перевищують в режимах тяги 0,84 і рекуперативного гальмування 0,65, а також спотворення форми напруги і струму в первинній обмотці тягового трансформатора, що негативно впливає на надійність роботи електрообладнання електрорухомого складу (ЕРС), систем управління та каналів зв'язку.

Сучасні тенденції розвитку ЕРС пов'язані з впровадженням найбільш перспективного асинхронного тягового електроприводу (АТЕП). основу якого складають 4QS-перетворювачі, автономні інвертори напруги (АІН) та асинхронні тягові двигуни (АТД) [1,2].

АТД найбільш ефективні при високих значеннях частоти обертання, тому їх доцільно застосовувати для високошвидкісного пасажирського ЕРС. Конструктивні особливості, а також висока вартість АТЕП дозволяють зробити висновок про доцільність подальшої експлуатації ЕРС з КТД у вантажному і приміському пасажирському русі зі швидкостями до 120 км/год.

Тяговий електропривод (ТЕП) з КТД постійного струму з двосторонньою тяговою передачею забезпечує більш сприятливі режими в порівнянні з односторонньою при реалізації великих тягових зусиль на ободі колісної пари. Крім того він має більшу динамічну стійкість при різких змінах обертового моменту на валу. Це особливо важливо для вантажних електровозів в умовах руху по коліям невисокої бальності. Враховуючи вказані вище фактори та неможливість швидкого масового переходу на безколекторний тяговий привід, дослідження систем управління ТЕП з КТД з метою підвищення K_p та зниження емісії високочастотних гармонік в контактну мережу є актуальною науково-практичною задачею.

Застосування IGBT-транзисторів дозволяє розв'язати десятиліттями існуючу проблему – забезпечення силових схем електровозів змінного струму напівпровідниковими приладами з повною керованістю. Завдяки розробці нових алгоритмів управління транзисторні АТП та ВІП створюють значні можливості для зниження енерговитрат на тягу потягів. Метою даної роботи є аналіз існуючих схемотехнічних заходів, направлених на покращення енергетичних характеристик ТЕП електровозів змінного струму з КТД та подальший пошук їх раціональних силових схем і алгоритмів управління.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питання покращення енергетичних характеристик ТЕП з КТД на ЕРС змінного струму розглянуті в багатьох публікаціях вітчизняних та зарубіжних спеціалістів. Значна увага приділена розгляду математичних моделей ТЕП та їх алгоритмів. Всі технічні рішення з підвищення енергетичних характеристик ЕРС змінного струму з КТП можна умовно об'єднати в чотири групи:

- 1) застосування на ЕРС АТП на базі IGBT-транзисторів;
- 2) застосування на ЕРС ВІП на базі IGBT-транзисторів;
- 3) удосконалені схеми тягових перетворювачів та їх алгоритмів управління;
- 4) вмикання в коло вторинної обмотки тягового трансформатора (ТТ) активних і пасивних компенсаторів реактивної потужності.

У роботах [3–4] запропоновано застосування АТП на ЕРС змінного струму для живлення КТП. При цьому знижується рівень споживання реактивної потужності та зменшується спотворення форми напруги. Коефіцієнт потужності ТЕП близький до одиниці в режимі тяги та рекуперації. Схема тягового перетворювача включає вхідний 4q-S перетворювач та імпульсний регулятор на базі IGBT-транзистора, ввімкненого послідовно в коло якоря КТД. Регулювання напруги здійснюється методом широтно-імпульсного регулювання (ШІР) за допомогою транзисторного ключа (ТК).

У роботі [5] запропоновано застосувати для ШІР електровоза постійного струму з КТД перетворювачі постійно-постійного струму (DC-DC).

Використання ШІР напруги на електровозах змінного струму, як засобу удосконалення систем регулювання ЕРС, розглядалось неодноразово. Можливість втілення цієї ідеї з'явилась завдяки застосуванню силових транзисторів – елементів з повною керованістю. В роботах [6–9] розглянуті математичні моделі тягового електроприводу та активного випрямляча струму (АВС), розроблені силові схеми і досліджена робота АВС з двозонним регулюванням напруги при кількох варіантах алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Результати

проведеного комп'ютерного моделювання згідно з [7] свідчать про можливість підвищення коефіцієнта потужності електровоза 2ЕЛ5 при застосуванні АВС.

З представлених осцилограм видно, що форма струму електровоза наближається до прямокутної та має високочастотні гармонічні складові, що знижує загальний коефіцієнт потужності перетворювача.

Подальше підвищення техніко-економічних показників ЕРС зі статичними перетворювачами йде шляхом удосконалення алгоритмів управління без принципової зміни силової схеми електровоза. Удосконалення системи зонно-фазового регулювання з заміною тиристорів на IGBT-транзистори та організація нових алгоритмів роботи ВПП з модифікованим фазовим регулюванням дозволяє зменшити питомі витрати електроенергії та збільшити коефіцієнт потужності [10].

У роботі [11-12] розглянуті питання побудови структури математичної моделі «тягова підстанція – контактна мережа – електровоз». Проведені результати імітаційного моделювання на 3,5 зонах регулювання при роботі ВПП на IGBT-транзисторах в режимі тяги.

Про актуальність питання підвищення коефіцієнта потужності електровозів змінного струму за рахунок використання сучасного ВПП, виконаного на базі повністю керованих IGBT, свідчить робота [13-14].

Значною проблемою електротягових систем залишається несинусоїдальна форма струмів, які споживає ЕРС та спотворення форми кривої напруги на струмоприймачах ЕРС, що погіршує енергетичні показники ЕРС.

Проведений аналіз свідчить, що досліджень режимів роботи АПТ при регулюванні КТД на сьогодні недостатньо. Тому подальші дослідження в цьому напрямі можна вважати актуальними.

Мета і завдання дослідження. Імпульсне регулювання випрямленої напруги пов'язане зі значними комутаційними перенапругами в колі вторинної обмотки ТТ та емісією широкого спектру високочастотних гармонік в контактну мережу. Високочастотні гармоніки є додатковим фактором зниження коефіцієнта потужності електровоза та потребують застосування вхідних фільтрів зі значною потужністю конденсаторів. Метою роботи є пошук можливостей покращення енергетичних характеристик електровоза змінного струму 2ЕЛ5 в тяговому режимі, зниження спотворення напруги на струмоприймачах ЕРС та пульсації випрямленої напруги на КТД.

Матеріали та методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувалися: класична теорія електричних кіл, методи математичного моделювання, чисельні методи рішення інтегральних і диференціальних рівнянь, теорія перетворювачів, схемотехніка силової електроніки на IGBT-транзисторах. Наукові дослідження проводилися на математичній моделі електровоза змінного струму в середовищі MatLab/Simulink.

Силова схема секції серійного електровоза 2ЕЛ5 включає дві трисекційні тягові обмотки. До кожної тягової обмотки підключений ВПП, укомплектований тиристорами, за допомогою якого здійснюється чотиризонне фазове регулювання випрямленої напруги. Від кожного ВПП отримують живлення два ТЕД. В коло кожного ТЕД включені індивідуальні згладжувальні реактори. Спрощена пропонується силова схема електровоза 2ЕЛ5 на один візок з транзисторним АПТ в режимі тяги приведена на рис.1. Схема включає такі елементи: виведення А,Х первинної обмотки ТТ для підключення до контактної мережі; тягові перетворювачі АПТ 1-2, за допомогою яких здійснюється три зонне імпульсне регулювання випрямленої напруги. Кожен АПТ має вісім плечей, плече складається з послідовно включеного IGBT-транзистора V_{Tn} та випрямного діода V_{Dn} (n – номер плеча). Випрямні діоди забезпечують випрямлення змінного струму в пульсуючий та запобігають протіканню зворотного струму по вторинній обмотці ТТ. Транзистори V_{Tn} реалізують заданий алгоритм управління випрямленою напругою. Діодні розрядні плечі V_{D0} включені паралельно кожному колу випрямленого струму і створюють буферний контур, через який під час комутації струму транзисторів розряджається електромагнітна енергія, яка накопичена в ланцозі випрямленого струму. Коло випрямленого струму складається зі згладжувального реактора (ЗР) типу РС-20 та ТЕД типу ДТК-820.

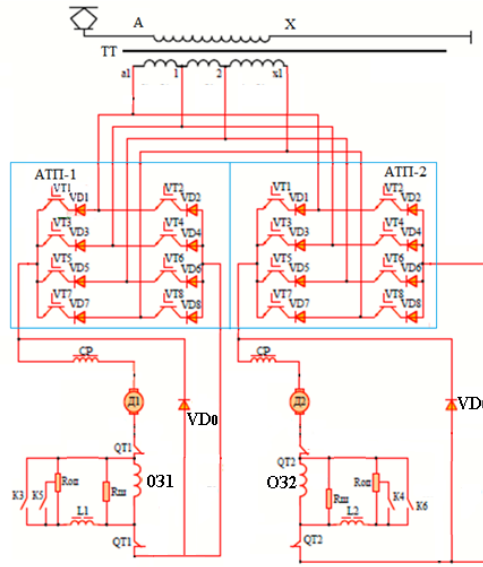


Рис. 1. Спрощена принципова силова схема електровоза на один візок з транзисторним АТП у режимі тяги

Наявність двох АТП дозволяє забезпечити їх роботу зі зсувом по фазі, що дає можливість отримати кращі енергетичні характеристики. Живлення кожного ТЕД здійснюється від індивідуального АТП, що дозволить здійснювати повільне регулювання сили тяги. Проведені попередні дослідження системи регулювання напруги на ТЕД за допомогою АТП показали, що при заміні ВП на АТП з транзисторними плечами та ШІР погіршуються енергетичні характеристики електровоза внаслідок багаторазового розмикання силового кола живлення ТЕД.

Математична модель електровоза в режимі тяги. При дослідженні енергетичних характеристик АТП електровоза розглянуто математичну модель (рис. 2) системи «тягова

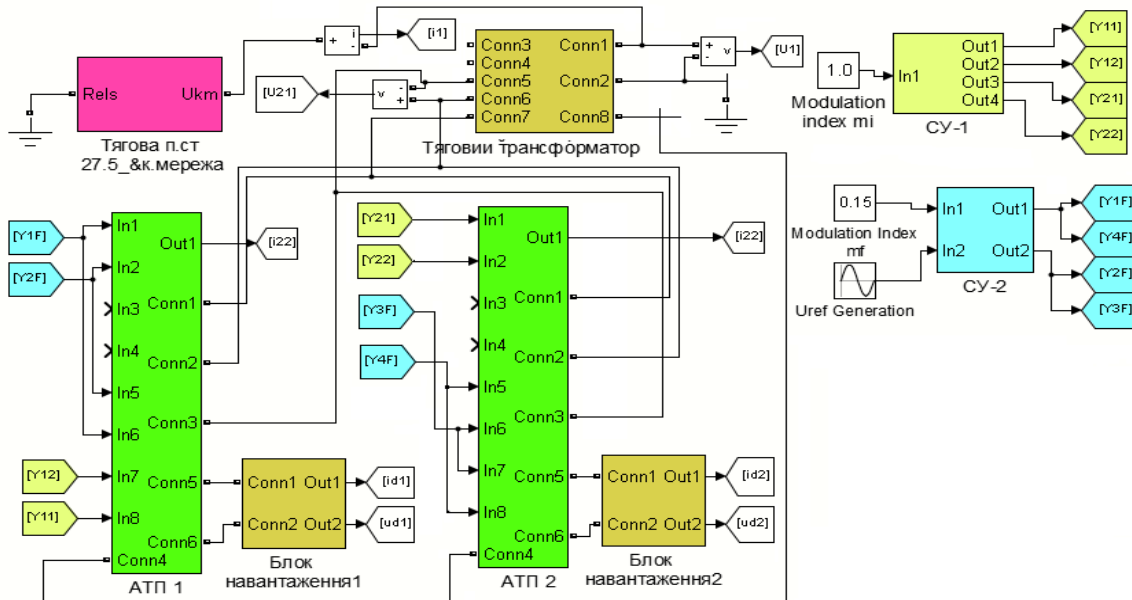


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі половини секції електровоза

мережа – електровоз» та алгоритм комутації плечей транзисторів АТП з широтно-імпульсним та фазовим регулюванням напруги на ТЕД постійного струму. За допомогою моделі досліджені електромагнітні процеси в силових електричних колах електровоза 2ЕЛ5 в режимі тяги. Математична модель є комплексною системою, яка включає в себе моделі тягової підстанції, контактної мережі та електровоза). Модель електровоза містить підсистеми тягового трансформатора, АТП, блоків навантаження з тяговими електродвигунами, ЗР та е.р.с. Система управління СУ-1 забезпечує формування сигналів ШПР, а СУ-2 – формує сигнали фазового управління в процесі реалізації алгоритму управління плечами АТП.

Модель ТТ. Математична модель трансформатора створена за допомогою його схеми заміщення (рис.3), яка має вигляд багато обмотувальних систем з магнітними зв'язками.

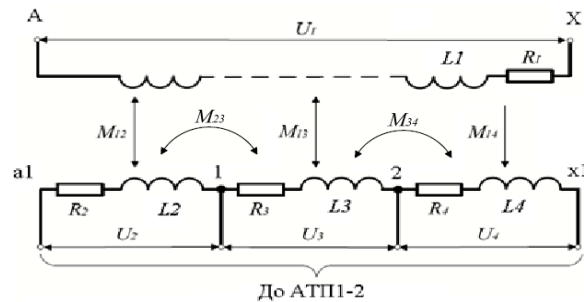


Рис. 3. Схема заміщення тягового трансформатор ОНДЦЭ-4350/25

На схемі заміщення позначені: U_1, L_1, R_1 – напруга, індуктивність і активний опір первинної обмотки ТТ; $U_2, L_2, R_2, U_3, L_3, R_3, U_4, L_4, R_4$ – напруги, індуктивності і активні опори секцій вторинних обмоток; $M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{23}, M_{34}$ – взаємні індуктивності між первинною обмоткою і секціями вторинних обмоток. При умові, що індуктивності обмоток мають постійні значення та не враховуючи ємності між секціями вторинної обмотки, можна записати такі рівняння зв'язку між параметрами тягового трансформатора:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt}; \\ u_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt}; \\ u_3 = M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt}; \\ u_4 = M_{14} \frac{di_1}{dt} + M_{24} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_3}{dt} + i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt}; \end{cases} \quad (1)$$

де u_1, u_2, u_3, u_4 – напруга первинної і вторинних обмоток трансформатора;

i_1, i_2, i_3, i_4 – струм первинної і вторинних обмоток трансформатора.

Запис системи рівнянь в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} & M_{24} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 & M_{34} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_4 \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Величини повних індуктивностей і активних опорів обмоток тягового трансформатора розташовані по діагоналі матриці (2). Величини взаємних індуктивностей між обмотками трансформатора розташовані зліва і праворуч від діагоналі матриці (2). Моделювання тягового трансформатора виконано за допомогою функціонального блоку бібліотеки Simulink- MultiWinding Transformer з урахуванням параметрів тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25.

Математична модель АТП. При математичному описі і моделюванні активного тягового перетворювача напруги використовується схема заміщення, яка представлена на рис.4.

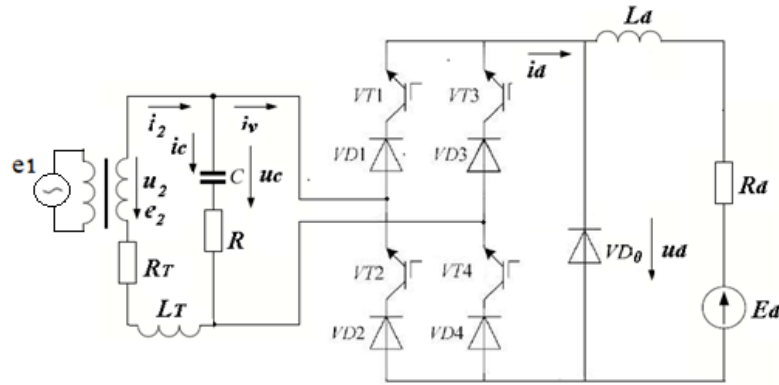


Рис. 4. Схема заміщення активного тягового перетворювача в режимі тяги

Схема містить вторинну обмотку ТТ з е.р.с. e_2 та приведеною індуктивністю L_T , активним опором R_T , буферний конденсатор C з опором R , IGBT-модулі $VT1-VT4$, діоди $VD1-VD4$, зворотний діод VD_0 , індуктивність і активний опір навантаження L_d, R_d та е.р.с. ТЕД E_d .

Алгоритм управління побудований на основі синусоїдної ШІМ. Стан транзисторних ключів описується комутаційними функціями S_1, S_2 , які приймають значення 0 або 1. Моделююча напруга $U_m(t) = \sin(\omega_m t + \psi)$ частотою $\omega_m = 2\pi f_m$ порівнюється з тактовою напругою

$$U_T(t) = \frac{2}{\pi} \arcsin\left[\sin\left(\omega_T t + \frac{\pi}{2}\right)\right], \quad (3)$$

де $\omega_T = 2\pi f_T$.

Відношення частот тактового і моделюючого сигналів оцінюється коефіцієнтом кратності $\varepsilon = \frac{f_T}{f_M}$. Глибина модуляції оцінюється відношенням амплітуд напруги моделюючого і тактового сигналів $\mu = U_M / U_T$.

Математичний опис формування сигналів управління

$$S_i = f_n(X) S[U_M(t) - U_T(t)], \quad (4)$$

де $f_n(X)$ – функція порівняння; S_i – логічна змінна.

Стан транзисторів протилежних плечей моста описуються однією комутаційною функцією: $VT1, VT4$ – функцією S_1 , а $VT2, VT3$ – функцією S_2 . При $U_M(t) > U_T(t)$ вмикаються транзистори $VT1, VT4$, при цьому $S_1=1$. Для транзисторів протилежної фази при $-U_M(t) > U_T(t)$ вмикаються $VT2, VT3$ і $S_2=1$, а $S_1=0$. Транзисторні ключі $VT1-VT4$ забезпечують імпульсне перетворення напруги вторинної обмотки ТТ.

Формування імпульсів фазового регулювання відбувається в моменти порівняння трикутного тактового сигналу $U_T(t)$ амплітудою 1В з рівнем, який задається глибиною модуляції μ_f . Тактова напруга має частоту $f_{TM} = 100 \text{ Гц}$. Стан транзисторів при фазовому

регулюванні описується комутаційною функцією S_f . Умовою вмикання транзисторів є залежність:

$$S_f = [(U_{Tf}(t) > \mu_f) \wedge u_2(t) > 0] = 1 \quad (5)$$

При аналізі цієї схеми передбачається, що транзистори і діоди є ідеальними ключами. У відкритому стані вони замикають накоротко ділянки електричних ланцюгів, в закритому стані розривають їх. При цьому стани транзисторів описуються функціями S_i .

Функція випрямленої напруги $u_v(t)$ являє собою криву, що складається з імпульсів напруги, ширина яких змінюється відповідно з модулюючим сигналом $U_M(t)$, а частота визначається частотою тактового сигналу $U_T(t)$. Миттєве значення випрямленої напруги $u_d(t)$ на виході АТП змінюється в залежності від комутаційної функції АТП

$$f_u(t) = \begin{cases} 1 \text{ при } S_1 = 1 \vee S_2 = 1 \vee S_f = 1 \\ 0 \text{ при } S_1 = 0 \wedge S_2 = 0 \wedge S_f = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Електромагнітні процеси в колі змінної і постійної напруги АТП характеризуються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} e_2 &= E_{2\max} \sin \omega t; \\ e_2 - [L_T + f_u(t)L_d] \frac{di_2}{dt} - i_2 R_T - (L_d \frac{di_v}{dt} + i_v R_T - E_d) &= 0; \\ u_2 &= e_2 - i_2 R_T - L_T \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= RC \frac{dU_c}{dt} + U_c; \\ i_2 - i_v - i_c &= 0; \\ u_d &= f_u(t)u_2 \\ L_d \frac{di_d}{dt} - i_d R_d - E_d &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Отримані вирази дають змогу знайти значення напруг і струмів ділянок електричного кола АТП в сталому режимі при замкнутому та розімкнутому станах транзисторів.

Алгоритм роботи АТП в режимі тяги. Для найбільш ефективного споживання електроенергії при роботі АТП послідовно використовується фазове та імпульсне регулювання напруги на ТЕД, яке складається з трьох зон регулювання.

В першій зоні при ШР напруги обмотки a1-1 (рис. 3) здійснюється пуск та розгін електровоза. Плавне підвищення напруги відбувається шляхом збільшення глибини модуляції μ сигналів управління α_i транзисторів плечей АТП-2, що з'єднані з виведеннями обмотки a1-1. При подальшому збільшенні напруги на ТЕД АТП-2 працюють по різним алгоритмам.

В другій зоні АТП-1 поступово додає шляхом імпульсного регулювання напругу обмотки 1-2 до напруги обмотки a1-1. При цьому на протязі кожного півперіоду напруги живлення мережі подаються імпульси управління α_f на два транзистори плеч АТП-1, що відповідають позитивній полярності обмотки a1-1, а імпульси ШР α_i подаються на транзистори, що з'єднані з виведенням 2 обмотки 1-2. АТП-2, навпаки, шляхом імпульсного регулювання додає напругу обмотки a1-1 до напруги обмотки 1-2, яка на протязі півперіоду включена в електричне коло.

В третій зоні регулювання АТП-1 додає шляхом ШР напругу обмотки 2-х1 до напруги обмоток a1-2. Обмотка a1-2 включається в роботу транзисторами, які з'єднані з виведеннями a1-2.

обмотки при подачі на них імпульсів управління α_f . ШПР напруги обмотки 2-х1 забезпечується подачею імпульсів керування α_i на транзистори, що з'єднані з виведенням х1 обмотки 2-х1. Одночасно АТП-2 до введеної в роботу напруги обмотки 2-х1 додає шляхом ШПР напругу обмотки а1-2 відповідно до алгоритму, наведеного в табл. 1. При пропонованому алгоритмі роботи комутація ТК відбувається в умовах наявності паралельного кола протікання струму і можливості розрядки електромагнітної енергії при розмиканні ТК. Це зменшує амплітуди комутаційних і післякомутаційних коливань, дозволяє підвищити показник використання напруги ТТ, знизити споживання реактивної енергії та спотворення напруги на струмоприймачах ЕРС.

Для найбільш ефективного споживання електроенергії упродовж роботи електровоза необхідно забезпечувати фазове регулювання випрямленої напруги АТП з випередженням по фазі відносно середини півперіода напруги. Це дасть змогу частково компенсувати індуктивний характер навантаження та збільшити коефіцієнт потужності. За допомогою блока Signal Builder пакету Simulink розроблена діаграма фазового управління транзисторами, що має різні кути нахилу. При цьому упродовж напівперіода регулювання напруги забезпечується непропорційна зміна випрямленої напруги як по передньому, так і по задньому фронтах.

Таблиця 1. Алгоритм роботи плеч АТП 1-2 електровоза в режимі тяги

Зона	U_2, B	Напрямок е.р.с.	АТП-1								АТП-2							
			VT 1	VT 2	VT 3	VT 4	VT 5	VT 6	VT 7	VT 8	VT 1	VT 2	VT 3	VT 4	VT 5	VT 6	VT 7	VT 8
1	315	→	α_i			α_i					α_i			α_i				
		←		α_i	α_i							α_i	α_i					
2	630	→	α_f			α_f		α_i			α_i		α_f			α_f		
		←		α_f	α_f		α_i				α_i		α_f	α_f				
3	1260	→	α_f					α_f		α_i	α_i				α_f			α_f
		←		α_f			α_f		α_i			α_i				α_f	α_f	

α_i – сигнали управління ШПР;

α_f – сигнал фазового управління транзистором.

Імітаційне моделювання електромагнітних процесів. Для вивчення енергетичних характеристик пропонованого АТП була розроблена математична модель системи «тягова мережа – електровоз з АТП» в середовищі імітаційного моделювання MatLab/Simulink.

Як критерії, які характеризують споживання реактивної потужності, а також несинусоїдальність напруги та струму, прийнято коефіцієнт потужності K_p , коефіцієнт спотворення форми кривої струму K_i та коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги K_u .

Модель тягового електропостачання. Для аналізу електромагнітних процесів ЕРС напруга на вихідних шинах тягової підстанції визначена за таким виразом:

$$U_{ТП} = e_{ТП} - r_{ТП} I - 2\pi f L_{ТП} \dot{I}, \quad (8)$$

де $r_{ТП}$ – активний опір; $L_{ТП}$ – індуктивність; $e_{ТП}$ – значення е.р.с. тягової підстанції.

Модель контактної мережі реалізована як ділянка з двосторонньою схемою живлення і виконана у вигляді схеми заміщення, що складається з каскадно сполучених Т-подібних чотириполосників (рис.5). На представленій схемі заміщення параметри ділянки контактної мережі визначають індуктивність L_l , активний опір R_l , ємність C і поперечну провідність g .

Розрахункові значення активного і реактивного опорів елементів схеми заміщення визначені за такими виразами [9]:

$$R_{км} = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 L_2^2}{L_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (9)$$

$$X_{км} = \omega \left[L_1 + L_2 \frac{R_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \right]. \quad (10)$$

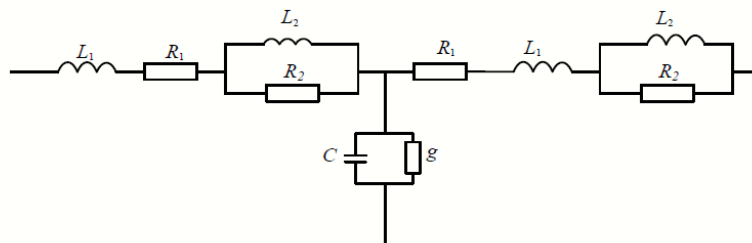


Рис.5. Схема заміщення ділянки контактної мережі завдовжки l

При розташуванні електровоза в середині фідерної зони ($L_\phi = 50$ км) при вказаній схемі заміщення контактної мережі отримаємо наступні параметри елементів схеми: $L_1 = 7,16$ мГн; $L_2 = 1,26$ мГн; $R_1 = 0,93$ Ом; $R_2 = 8,18$ Ом; $C = 0,435$ мкФ; $g = 15 \cdot 10^{-6}$ Ом $^{-1}$.

Модель тягового трансформатора реалізована за допомогою блоку Multi-Winding Transformer пакету Simulink. Блок Multi-Winding Transformer моделює однофазний багатообмоточний трансформатор з довільним числом обмоток як на первинній, так і на вторинній стороні. У блоці враховується нелінійність характеристики намагнічення матеріалу сердечника, магнітні характеристики сталі. Піктограма і електромагнітна схема трансформатора показана на рис.6. Моделі тягового трансформатора і тягового двигуна відповідають розроблені відповідно до параметрів обладнання вантажного електровоза 2ЕЛ5.

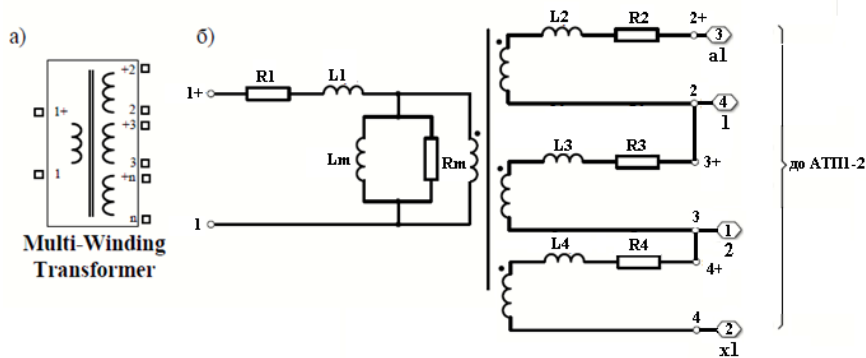


Рис. 6. Піктограма і схема тягового трансформатора

Блок-схема АТП виконана в редакторі Simulink і представлена на рис. 7. У пакеті MatLab плечі АТП моделюються за умови, що в схемі використані модулі CM1200HC-66H, 3300 В, 1200 А (IGBT-транзистори VT1-VT8) та RM1200DG-66S (діоди VD1-VD8). Схемні виведення 1-4 призначені для з'єднання з обмотками a1-1-2-x1 вторинної обмотки ТТ. На входи In1-In8 подаються сигнали управління від СУ-1, СУ-2 (рис. 2). Схемні виведення 5-6 призначені для з'єднання з блоком навантаження. Блок навантаження включає: ТЕД, е.р.с. обмотки якоря (кероване джерело напруги) та згладжуючий реактор. Тяговий електродвигун типу ДТК - 820

моделное блок DCMachine. Параметри кола ТЕД: активний опір ярірного кола з компенсаційними обмотками та котушками додаткових полюсів $R_{я} = 0,01652$ Ом; активний опір обмотки головних полюсів $R_{ос} = 0,0107$ Ом; активний опір згладжуючого реактора $R_{зп} = 0,014$ Ом; сумарна індуктивність ярірного кола з урахуванням обмотки збудження $L_{я} = 1,37$ мГн; індуктивність згладжуючого реактора $L_{зп} = 8,2$ мГн. Параметри індуктивностей обмоток ТЕД і згладжуючого реактора вважаємо постійними.

Результати досліджень активного тягового перетворювача електровоза змінного струму. В процесі моделювання електромагнітних процесів, що відображають роботу ТЕП електровоза, отримані осцилограми напруги u_1 і струму i_1 в первинній обмотці ТТ, напруги u_2 і струму i_2 у вторинній обмотці, а також середнє значення випрямленої напруги U_d та струму тягового електродвигуна i_d .

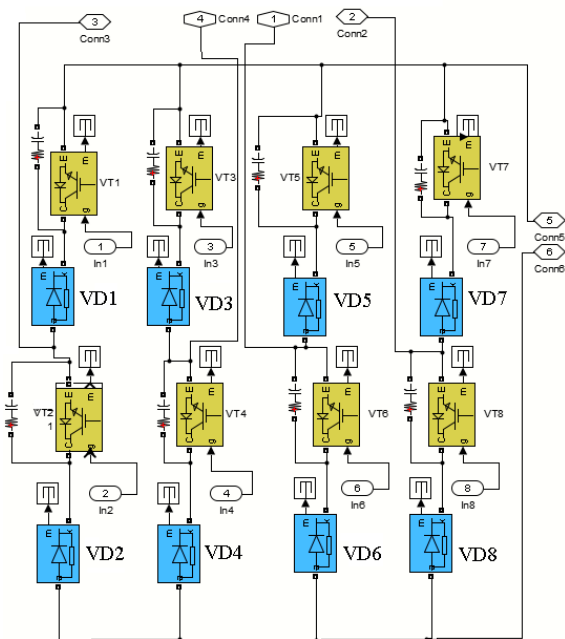


Рис. 7. Блок-схема АТП в редакторі Simulink

При моделюванні проведено дослідження впливу параметрів АТП та алгоритмів управління на такі енергетичні характеристики: значення коефіцієнта потужності K_p , виміряних на затискачах первинної обмотки ТТ; сумарні коефіцієнти спотворень по струму $THDi$ та напрузі $THDu$; відносні значення випрямленої напруги u_d/u_{d0} .

Визначення параметрів захисних RC-контурів моделі. Перехідний процес при комутації ТК супроводжується значними скачками напруги на елементах кола, що обумовлено реакцією індуктивності розсіяння ТТ, приведеної до вторинної обмотки ТТ. Для зменшення комутаційних перенапруг і коливань в колі вторинної обмотки ТТ встановлені індивідуальні снаберні RC-контури для кожного транзистора АТП та на виведеннях вторинних обмоток ТТ. На основі дослідження перехідного процесу в колі АТП та згідно рекомендацій [15] визначені параметри захисних RC-контурів моделі, які мають такі значення: на виведеннях вторинних обмоток ТТ- $R_{ТТ}=0.5$ Ом, $C_{ТТ} = 600$ мкФ; снаберні RC-контури транзисторів – $R_{СТ}=0.01$ Ом, $C_{СТ} = 10$ мкФ. Детальне дослідження перехідного процесу в колі АТП потребує окремого розгляду і виходить за межі даної статті.

Алгоритм фазового та імпульсного регулювання напруги. Алгоритм управління передбачає фазове регулювання та ШПР. При фазовому регулюванні коефіцієнт модуляції по амплітуді μ_f задає кути включення α та виключення β транзисторів. Зона роботи транзисторів розташована асиметрично відносно напівперіоду напруги живлення зі зміщенням в напрямку випередження. При зрушенні ЕРС з місця мінімальне значення випрямленої напруги забезпечується імпульсним регулюванням напруги вторинної обмотки ТТ $a1-1$ – перша зона регулювання. Для подальшого

підвищення випрямленої напруги здійснюється перехід на другу зону регулювання, де випрямлена напруга дорівнює сумі випрямлених напруг обмоток a1-1 та 1-2. При цьому випрямлена напруга обмотки a1-1 регулюється фазовим способом, а обмотка 1-2 – імпульсним (табл. 1). На третій зоні здійснюється фазове регулювання випрямленої напруги обмоток a1-1 і 1-2 та імпульсне регулювання напруги обмотки 2-х1. Для порівняння, в табл. 2 приведені результати моделювання роботи АТП електровоза 2ЕЛ5 при регулюванні напруги на ТЕД при використанні тільки системи ШПР та при алгоритмі спільного використання ШПР і фазового регулювання напруги. При цьому коефіцієнти модуляції мали значення: $\mu_i = 0,6-1,0$; $\mu_f = 0,15$. Отримані результати свідчать, що при алгоритмі спільного використання ШПР та фазового регулювання напруги зростає коефіцієнт потужності на 7–15% при зміні коефіцієнта модуляції μ_i в межах 0,6 – 0,8 та знижується сумарний коефіцієнти спотворень по струму $THDi$.

Таблиця 2. Порівняльна таблиця результатів імітаційного моделювання АТП при алгоритмі спільного використання ШПР та фазового регулювання напруги

Зона рег. ланцюга	μ_i	μ_f	K_p	$THDi$	$THDu$	U_d, B	u_d/u_{d0}
2	0,6	-	0,75	0,25	0,009	801	0,7
2	0,8	-	0,90	0,37	0,012	838	0,71
2	1,0	-	0,97	0,24	0,055	873	0,77
3	0,6	0,15	0,95	0,27	0,031	821	0,71
3	0,8	0,15	0,96	0,23	0,067	887	0,78
3	1,0	0,15	0,973	0,228	0,048	980	0,86

Результати свідчать, що відносно значення випрямленої напруги u_d/u_{d0} перевищує на 9% відповідний показник роботи АТП при використанні тільки алгоритму ШПР

З урахуванням зсуву по фазі опорних сигналів при паралельній роботі двох АТП. В типовій схемі електровоза живлення двох ТЕД здійснюється від одного ВП. В розглянутій моделі живлення кожного ТЕД здійснюється від окремого АТП. На рис. 8,б показані сигнали управління тиристорами АТП 1-2. Опорні напруги ШПР кожної пари АТП, що отримують живлення від однієї вторинної обмотки ТТ, взаємно зсунуті по фазі на кут 160 ел. град., (рис. 8, а, в); де $\varphi_1 = -80$ град. (рис. 8, а), $\varphi_2 = 80$ град. (рис. 8, в). Завдяки зсуву по фазі в більшій частині напівперіоду напруги живлення по вторинній обмотці ТТ протікають струми навантаження обох АТП. Для прикладу в табл. 3 приведені результати моделювання роботи АТП на першій зоні ШПР за відсутності та наявності зсуву по фазі опорних напруг. Результати моделювання свідчать, що завдяки зсуву по фазі опорних сигналів збільшується коефіцієнт потужності K_p та зменшуються коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги та струму.

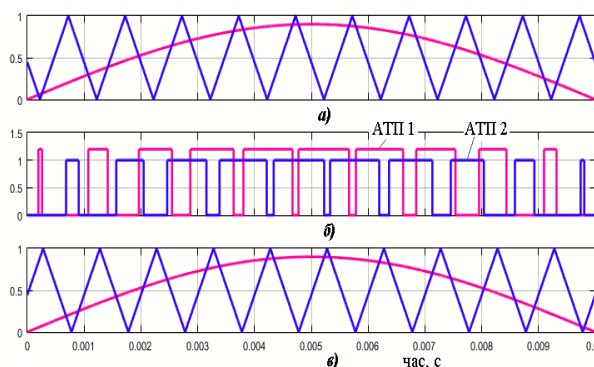


Рис. 8. Формування сигналів управління ШПР АТП 1-2

Таблиця 3. Параметри роботи АТП при зсуві по фазі опорних напруг

Частота опорного сигналу f_{on} , Гц	μ_i	Зсув по фазі		K_p	$THDi$	$THDu$	U_d , В	u_d/u_{d0}
		φ_1	φ_2					
600	0,8	0	0	0,77	0,79	0,05	170	0,59
600	0,8	-80	80	0,932	0,37	0,034	172	0,61
900	0,8	0	0	0,93	0,35	0,08	677	0,769
900	0,8	-80	80	0,96	0,28	0,073	679	0,77

Вплив частоти опорного сигналу ШІМ. З метою виявлення впливу на енергетичні характеристики електровоза частоти опорного сигналу ШІМ проведено дослідження роботи АТП при частотах 600, 900, 1000, 1200 Гц. Отримані результати на третій зоні регулювання при $\mu_i = 1.0$ та ємності конденсаторів $C_1 = C_2 = C_3 = 600$ мкФ приведені в табл.4.

Таблиця 4. Результати дослідження роботи АТП при різних значеннях частоти опорного сигналу

Частота опорного сигналу f_{on} , Гц	μ_i	K_p	$THDi$	$THDu$	U_d , В	u_d/u_{d0}
600	1,0	0,97	0,2	0,1	961	0,84
900	1.0	0.973	0.228	0.048	980	0.86
1000	1.0	0.971	0.256	0.065	846	0.87
1200	1.0	0.972	0.255	0.065	991	0.87

Отримані дані свідчать, що при збільшенні частоти перемикання транзисторних ключів досліджувані параметри практично мало змінюються. Разом з тим зі збільшенням частоти перемикання зростає кількість комутацій ключів та втрат в ключах. Виходячи з цього зроблено висновок про недоцільність підвищення частоти опорного сигналу і подальші дослідження характеристик виконувались при частоті опорного сигналу 900 Гц.

В результаті моделювання електромагнітних процесів в секції електровоза на третій зоні регулювання напруги, отримані осцилограми напруги і струму в первинній і вторинній обмотках ТТ, а також випрямленої напруги U_d і струму i_d кола ТЕД. Осцилограми напруги U_1 та струму i_1 первинної обмотки ТТ приведені на рис. 9, а. З приведених осцилограм видно, що струм обмотки ТТ повністю співпадає по фазі з напругою, що свідчить про високий рівень коефіцієнта потужності.

Зі спектрограми струму i_1 (рис. 9, б) видно, що найбільшу амплітуду серед вищих гармонік має 3-я гармоніка (13,2% від основної гармоніки) з частотою 150 Гц. Найбільш інтенсивні гармоніки з 7-ї по 17-у (3–6,8% від основної гармоніки) займають діапазон частот в межах 350–850 Гц. Підвищену інтенсивність (2,5–3,5%) мають гармоніки 31,35 і 41. Осцилограми напруги U_2 та струму i_2 вторинної обмотки ТТ приведені на рис.10. З приведених осцилограм видно, що струм вторинної обмотки ТТ повністю співпадає по фазі з напругою. Максимуми споживання струму та напруги розташовані симетрично відносно півперіода напруги

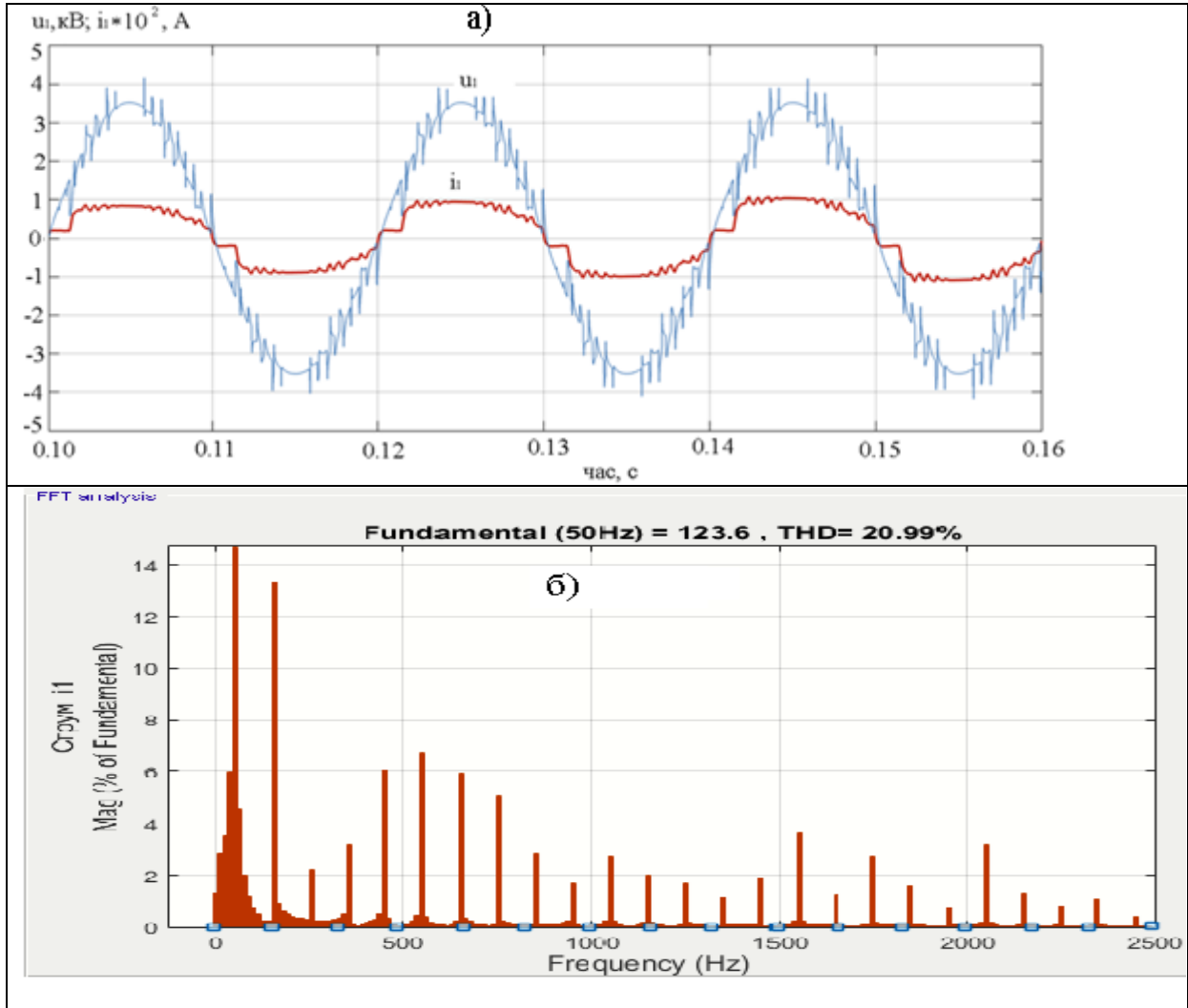


Рис. 9. Діаграми електромагнітних процесів при роботі електровоза в режимі тяги на 3-й зоні регулювання : а) осцилограма напруги U_1 і струму i_1 первинної обмотки ТТ, б) спектрограма струму i_1

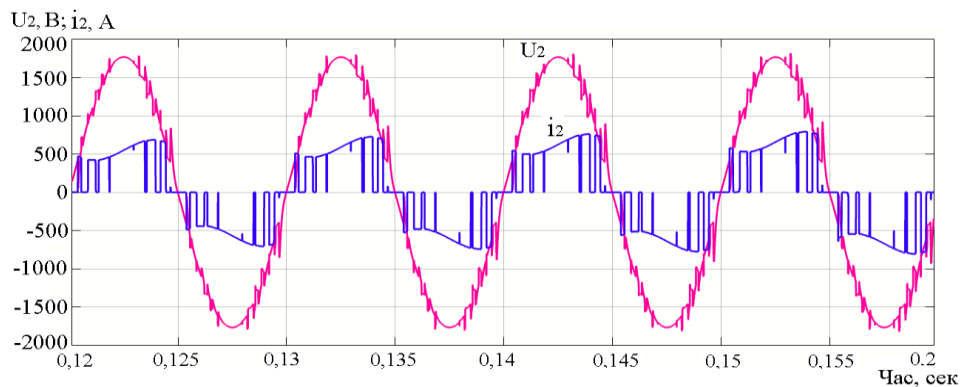


Рис. 10. Осцилограми напруги U_2 та струму i_2 вторинної обмотки ТТ

Осцилограми випрямленої напруги U_d і струму i_d приведені на рис.11.

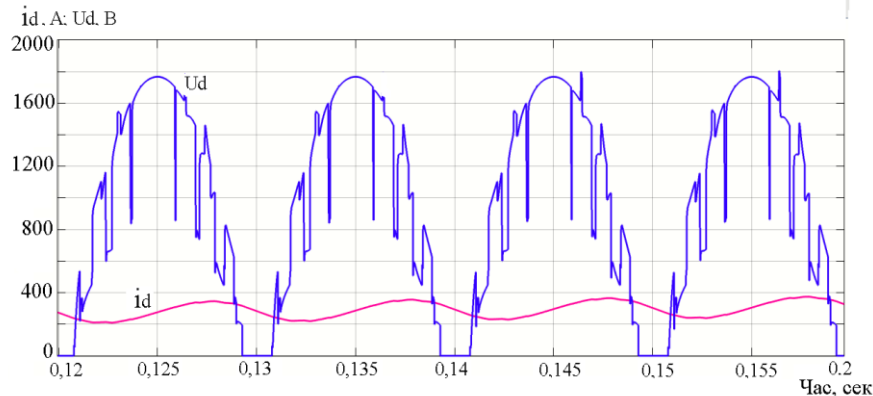


Рис. 11. Осцилограми випрямлених напруги U_d та струму i_d кола ТЕД

Випрямлена напруга U_d , завдяки спільному використанню алгоритма ШІР і фазового регулювання в кожному напівперіоді складається з постійної складової та регульованих по ширині імпульсів, що підвищує ефективність використання ТТ, підвищує коефіцієнт потужності K_p та сприяє зниженню спотворення синусоїдальності кривих напруги та струму.

Отримані результати моделювання свідчать про можливість використання моделі для подальших досліджень систем ЕРС з метою покращення їх енергетичних характеристик.

Висновки. 1. Розроблена математична модель системи «тягова підстанція – контактна мережа – електровоз» для електровоза 2ЕЛ5 із застосуванням АТП на IGBT-транзисторах. Модель дозволяє зробити оцінку електромагнітних процесів, що відбуваються при комутації транзисторних ключів та дослідити енергетичну ефективність електровоза з АТП.

2. Розроблено алгоритм одночасного використання широтно-імпульсного та фазового регулювання випрямленої напруги на трьох зонах регулювання. Пропонований алгоритм управління дає змогу підвищити до 0,86 відносно значення випрямленої напруги та показник використання тягового трансформатора (при широтно-імпульсному регулюванні показник має найвище значення 0,78).

3. Пропоновано мережеву комутацію плечей АТП електровоза зі зрушенням фаз опорних сигналів ШІМ та рекомендовано оптимальний варіант і частоти опорних сигналів при формуванні ШІМ.

За результатами проведеного моделювання можна зробити висновок, що за рахунок впровадження запропонованих способів управління АТП електровоза можливе збільшення значення коефіцієнта потужності до 0,90–0,97, тобто на 15% більше ніж у штатного тиристорного ВП на четвертій зоні регулювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иньков Ю.М., Литовченко В.В., Назаров Д.В. Особенности тягового электрооборудования перспективного электроподвижного состава. //Электротехника. 2016. № 9. С. 38-44. ISSN: 0013-5860.
2. Бурков А.Т., Валинский О.С., Евстафьев А.М., Мазнев А.С., Третьяков А.В. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов.//Электротехника. 2019. №.10. С. 33-36. ISSN: 0013-5860.
3. Arvind Kumar Verma, Tripathi V. Simulation and Controlling the Speed of Electric Locomotive through PWM Technique // International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering. 2016. № 4, P. 239-243.
4. Дубравін Ю.Ф. Підвищення коефіцієнта потужності електроозів однофазно-постійного струму.// Технології та інфраструктура транспорту: зб.тез доп. між нар. наук.-техн. конф., м. Харків, 14-16 травня 2018 р. Харків: «УкрДУЗТ», 2018. С.113-114.
5. Мазнев, А. С., Киселев А.А. Улучшение регулировочных свойств электрического подвижного состава постоянного тока // Известия Транссиба. Омский гос. ун-т путей сообщения. 2019. Вып. № 1 (37). С. 17 – 27.
6. Краснов О. О. Математичне моделювання електровоза змінного струму з активним перетворювачем в режимі тяги // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 179. С. 40-51.

7. Ягуп В. Г., Краснов А. А., Божко В. В. Энергетические характеристики однофазного активного выпрямителя тока при синусоидальной и трапецеидальной широтно-импульсной модуляции // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2018. № 2. С. 3-11. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.130527>.
8. Краснов О. О., Ягуп В. Г., Божко В. В. Активный тяговый перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2018. № 4. С. 11-20.
9. Ягуп В. Г., Краснов А. А. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2017. Вип. 170. С. 20-31.
10. Газизов Ю., Мельниченко О. «Ермак» должен стать лучшим в мире электровозом // Локомотив. 2017. № 2. С. 21-23.
11. Яговкин Д.А. Разработка математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока и его блока управления в режиме тяги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 197-202.
12. Яговкин Д.А., Портной А.Ю., Мельниченко О.В., Линьков А.О., Шрамко С.Г., Селдцов К.П. Структура математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока в режиме тяги. Электропривод на транспорте и в промышленности. Труды II Всероссийской научно-практической конференц. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. С. 121-129.
13. Богинский С. А., Мельниченко О. В., Линьков А. О. Повышение коэффициента мощности электровозов переменного тока за счет новой организации сетевой коммутации плеч выпрямительно-инверторного преобразователя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2 (62). С. 166–177. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177.
14. Томилов В. С., Мельниченко О. В., Шрамко С. Г., Богинский С. А. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. Т. 65 № 1. С. 172–182. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).172-182.
15. Сосков А.Г., Сабалаева Н.О., Глебова М.Л., Форкун Я.Б. Розробка удосконалених методик розрахунку комутаційних перенапруг в напівпровідникових апаратах змінного струму. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 8 (80). С. 14-22. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.63765.

REFERENCES

1. Yu.M. Inkov, V.V. Litovchenko, D.V. Nazarov. (2016). Osobennosti tiahovoho elektrooborudovaniya perspektivnogo elektropodvizhnoho sostava [Features of traction electrical equipment of promising electric rolling stock]. *Russ.Electr.Engin.*, 9, 38-44 [in Russian]. ISSN: 0013-5860.
2. A.T. Burkov, O.S. Valinsky, A.M. Evstafiev, A.S. Maznev, A.V. Tretyakov.. (2019). Sistemy upravleniya tyagovym privodom sovremennykh lokomotivov [Traction control systems for modern locomotives]. *Russ.Electr.Engin.*, 10, 33-36 [in Russian]. ISSN: 0013-5860.
3. Arvind Kumar Verma, V. Tripathi. (2016). Simulation and Controlling the Speed of Electric Locomotive through PWM Technique. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 4, 239-243.
4. Yu.F. Dubravin. (2018). Pidvyshchennia koefitsiienta potuzhnosti elektrovoziv odnofazno-postiinoho strumu. [Increasing the power factor of single-phase DC electric locomotives]. *Proceedings from MIIM '12: Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia «Tekhnologii ta infrastruktura transportu» – International Scientific and Technical Conference «Transport Technologies and Infrastructure»*. (pp 113-114). Kharkiv: «UKrDUZT» [in Ukrainian]
5. A.S. Maznev, A.A. Kiselev. (2019). Uluchshenie regulirovochnykh svoystv ehlektricheskogo podvizhnoho sostava postoyannogo toka [Improvement of regulating properties of electric rolling stock of direct current]. *Izvestiya Transsiba. Omskiy gosudarstvennyi unyversytet putei soobshcheniya*, 1 (37), 17 – 27 (2019) [in Russian]
6. O.O. Krasnov. (2018). Matematychni modeliuvannya elektrovoza zminnoho strumu z aktyvnym peretvoriuvachem v rezhymy tiahvy [Mathematical modeling of an alternating current electric locomotive with an active converter in traction mode]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 179, 40-51 [in Ukrainian]
7. V.G. Yagup, O.O. Krasnov, V.V. Bozhko. (2018). Ehnergeticheskie kharakteristiki odnofaznogo aktivnogo vypryamitelya toka pri sinusoidal'noy i trapeceidal'noy shirotno-impulsnoy modulyacii [Energy characteristics of single-phase active current rectifier with sinusoidal and trapezoidal pulse-width modulation]. *Information and control systems in railway transport*, 2, 3–11 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.130527>
8. O.O. Krasnov, V.G. Yagup, V.V. Bozhko. (2018). Aktyvnyi tiahovyi peretvoriuvach z shyrotno-impulsnoiu modulyatsiieiu dlia elektrovoza zminnoho strumu z kolektornymy tiahovymy dvyhunamy [Active traction converter with pulse-width modulation for AC electric locomotive with collector traction engines] *Information and control systems in railway transport*, 4, 11–20 [in Ukrainian]
9. V.G. Yagup, A.A. Krasnov. (2017). Matematicheskoe modelirovaniye ehleketroprivoda ehleketrovoza 2EHL5 v rezhime tyagi [Mathematical modeling of the electric drive of the electric locomotive 2EL5 in traction mode] *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 170, 20-31 [in Ukrainian]
10. Yu.V. Gazizov, O.V. Melnichenko. (2017). «Ermak» dolzhen stat' luchshim v mire ehleketrovozom [«Yermak» should become the best electric locomotive in the world] *Locomotive*, 2, 21–23 [in Russian]

11. D.A. Yagovkin. (2015). Razrabotka matematicheskoy modeli vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh dlya ehlektrovoza peremennogo toka i ego bloka upravleniya v rezhime tyagi [Development of a mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an alternating current electric locomotive and its control unit in traction mode] *Sovremennye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie*,3(47), 197-202 [in Russian]

12. D.A. Yagovkin, A.Yu. Portnoy, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov, S.G. Shramko, K.P. Seledtsov. (2018). Struktura matematicheskoy modeli vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh dlya ehlektrovoza peremennogo toka v rezhime tyagi [The structure of a mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an electric locomotive AC in traction mode] *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti. Trudy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Khabarovskogo Dalnevostochnogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia - Electric drive in transport and industry. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference of the Khabarovsk Far Eastern State University of Railways*, 121-129 [in Russian]

13. S.A. Boginsky, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov. (2019). Povyshenie koefitsienta moshchnosti ehlektrovozov peremennogo toka za schet novoj organizatsii setevoy kommutatsii plech vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya [Increasing the power factor of alternating current electric locomotives due to the new organization of network switching of the rectifier-inverter converter arms] *Sovremennye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie*,2(62), 166-177 [in Russian] DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166-177

14. V.S. Tomilov, O.V. Melnichenko, S.G. Shramko, S.A. Boginsky. (2020). Povyshenie ehnergeticheskoy ehffektivnosti raboty ehlektrovozov peremennogo toka [Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives] *Sovremennye tekhnologii. Systemnyi analiz. Modelirovanie*, 1(65), 172-182 [in Russian] DOI: 10.26731 / 1813-9108.2020.1 (65) .172-182.

15. A.G. Soskov, N.O. Sabalaeva, M.L. Glebova, Ya.B. Forkun. (2016). Rozrobka udoskonalenykh metodyk rozrakhunku komutatsiinykh perenapruih v napivprovodnykovykh aparatakh zminnoho strumu [Development of advanced methods for calculating switching overvoltages in semiconductor AC devices] *Vostochno-Yevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 8(80),14-22 [in Ukrainian] (ISSN 1729-3774 2/8 (80) 2016 - DOI: 10.15587 / 1729-4061.2016.63765.

Yuri Dubravin¹, Viktor Tkachenko², Oleksandr Spivak³

¹ Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

² Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

³ Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE AC ELECTRIC LOKOMOTIVE TRACTION DRIVE

The study of the energy characteristics of the active traction converter with pulse-width modulation as part of the traction electric drive of an AC electric locomotive was held during the research. Active traction converter provides pulse-width control of the collector DC traction motors voltage and belongs to the basic AC / DC circuit.

The transient process when switching transistor switches is accompanied by significant voltage surge, due to the scattering inductance reaction of the traction transformer. Studies have shown that the diode discharge buffer circuits do not provide discharge of the electromagnetic energy accumulated in the winding of the transformer.

An active traction converter control algorithm has been developed, which implies the use of pulse-width and phase regulation of rectified voltage. Switching of transistor switches occurs in the presence of a parallel current circuit. This creates the conditions for the discharge of electromagnetic energy accumulated in the secondary winding circuit of the traction transformer.

The developed mathematical model allows to investigate the electromagnetic processes that occur during the switching of transistor switches and to evaluate the energy efficiency of the electric locomotive with active traction converter. In the simulation process, the influence of active traction converter parameters and control algorithms on the power rate of the converter, the total THD distortion rate of current and voltage and the relative values of the rectified voltage were investigated.

Measures to increase the power rate and to reduce the emission level of higher current harmonics into the traction network were proposed.

Keywords: mathematical model, switching, power factor, active traction converter, algorithm.

Andrii Sulym^{1}, Oleksandr Safronov², Inna Gladkykh³, Nadiia Lupitko⁴*

¹ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8144-8971>

² State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5865-7756>

³ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8674-2659>

⁴ State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33, I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3387-2000>

*Corresponding author: innagladkih59@gmail.com

STUDY OF PERFORMANCE INDICATORS OF TRANSPORT MACHINE-BUILDING AND RAILWAY INDUSTRY ENTERPRISES IN A PANDEMIC CONDITION COVID-19

The article analyzes the impact of the consequences of the quarantine measures introduction to counter the pandemic COVID-19 on the economy of Ukraine in general and the domestic transport machine-building sector in particular. It has been established that one of the most affected sectors of the economy is transport and mechanical engineering, in particular the railway transport sector. It is determined that at present a very relevant issue for the further development of domestic enterprises of transport machine-building and railway industry is the assessment of the impact of the COVID-19 pandemic on the activities and financial and economic performance of these enterprises. The financial and economic indicators of such domestic enterprises of transport machine-building and railway industry, such as JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", SE "UkrNDIV", LLC "LEMTRANS" and LLC "KERNEL-TRADE", TDV "Popasnyansky Car Repair Plant" are analyzed. It was determined that the most affected of the studied domestic enterprises under the conditions of quarantine measures were JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", TDV "Popasnyansky Car Repair Plant". The main reasons for the decrease in technical and economic indicators at domestic enterprises of transport machine-building and the railway industry are studied by the method of expert evaluation. According to the analysis of expert evaluation data, the most important reason for the deterioration of technical and economic indicators of enterprises is the lack of state support and incentives for the development of transport machine-building and the railway industry in the country (19.6%). Experts estimate the impact of the consequences of the introduction of quarantine measures to counter the COVID-19 pandemic at 8.1%. Measures are proposed to improve the technical and economic performance of the most affected domestic enterprises of the transport machine-building and railway industries in the context of the COVID-19 pandemic.

Keywords: domestic enterprise, railway industry, COVID-19 pandemic, resource-saving technologies, technical and economic indicators, transport machine-building.

Introduction and problem statement. Throughout its historical existence, mankind has faced many crises, which later became the driving force for the development of society as a whole. At the end of 2019, humanity faced a fundamentally new catastrophe - the COVID-19 coronavirus pandemic, which spread rapidly around the world. As a result, in order to slow down the spread of the disease caused by COVID-19, governments have introduced quarantine measures at the legislative level. Quarantines, closing of borders, restriction on human mobility, creation of numerous problems practically for all states, all these are realities of today. The COVID-19 pandemic has changed not only the lives of many people, but also the situation in global and local markets. There has been a

significant reduction in production capacity around the world due to the closure of borders between countries and the introduction of a regime of self-isolation. The spread of the epidemic disrupted the usual trade relations between producers and consumers, made serious changes in the activities of enterprises and companies. Many businesses around the world began to close, which resulted into that during the quarantine there was no one and nothing to transport due to unclear rules of the game.

Analysis of recent research. This issue was widely presented at the meeting of the United Nations General Assembly. Many heads of state expressed their opinion on the need for global renewal of all areas of human life. According to the World Health Organization and research, it is known that the effects of the COVID-19 pandemic will be remedied for decades.

The opinions of scientists around the world on this global issue have already been published and the impact of the effects of the COVID-19 pandemic depending on the sector of the economy has been partially revealed. These are primarily studies of D.V. Dolbnieva [1], M.F. Mizintseva [2], A. Flahault [3], H. Legido-Quigley, J.T. Mateos-Garcia, A. Campos [4], S. Kannan, Ali P. Shaik Syad, A. Sheeza, Hemalatha [5], S.I. Dolgova, Y.A. Savinova, E.V. Taranovskaia [6], L.H. Taylor, S.M. Latham, Woolhouse [7], Puriwat W., Tripopsakul S. [8], Giones F., Brem A., Pollack J.M., Michaelis T.L. M.E. 9], J. Zhan [10] and others.

However, the impact of quarantine measures to counter the COVID-19 pandemic on the activities of the domestic transport sector, in particular enterprises and companies in the transport machine-building and railway industries, has only been partially addressed. This is due to the fact that not enough time has passed to analyze and assess the impact on the domestic transport sector caused by the effects of the COVID-19 pandemic. Some of the domestic scientists have already begun to deal with this issue in their papers.

In the study [11] the state of the global economic situation in the field of maritime transport during the pandemic COVID-19 was examined, the relationship and impact of factors on the state of the world economy were analyzed; the ways to overcome the effects of the pandemic in the field of maritime transport were identified.

The study [12] deals with the problem of providing the protectionism of entrepreneurship in the framework of financial investment in a pandemic COVID-19. The conditions for classifying the sectors of the economy among the most affected by the pandemic in the context of state protectionism are proposed. According to the results of the rating, the energy, agricultural industry and transport need the largest financial allocations according to the COVID-19 impact index.

In papers [13, 14] the issue of the impact of the COVID-19 pandemic on the world economy, freight and passenger rail transportation is considered. In paper [13] the activities of all types of transport and railways of Ukraine, i.e., transit, import, export, domestic, are analyzed according to the indicators of traffic volumes and freight turnover. Factors influencing the state and change of these indicators for JSC "Ukrzaliznytsia" are singled out. Measures to reduce the negative impact of various factors on the state and development of the rail freight market are proposed. The study [14] found that one of the most affected industries is machine –building industry (there was a reduction in production by an average of 18.5%). At the same time, the largest reduction was recorded in the production of vehicles, in particular in railcar- building.

According to the analysis of the latest research, one of the most affected sectors of the economy is transport and engineering, in particular domestic enterprises whose activities are related to the railway industry. At the same time, an important and relevant issue for the further development of the railway transport industry is the assessment of the impact of the COVID-19 pandemic on the activities and financial and economic performance of enterprises whose activities are related to the railway industry. It should be noted that this issue is poorly studied and remains open. Therefore, in order to develop ways and effective mechanisms for overcoming the crisis of domestic enterprises of transport machine-building and the railway industry, later in this article it is proposed to consider the scale and consequences of the COVID-19 pandemic on the work of these enterprises and their financial and economic indicators.

The aim is to investigate the impact of the COVID-19 pandemic on domestic enterprises whose activities are related to the railway industry by analyzing their financial and economic indicators and applying the

method of expert evaluation; to identify possible ways to overcome the effects of the pandemic at these enterprises.

Material and research results. The first cases of acute respiratory disease COVID-19, caused by the coronavirus SARS-CoV-2, were recorded in late 2019 in the Chinese city of Wuhan. In early 2020, governments began quarantine measures to slow the spread of the COVID-19 pandemic. In Ukraine, quarantine measures were introduced in accordance with the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On prevention of the spread of coronavirus COVID-19 in Ukraine" dated March 11, 2020 No. 211 (hereinafter referred as the Resolution). As of today, this Resolution is in force with numerous changes. In general, from the beginning of the implementation of quarantine measures until today (as of October 18, 2021) 27 amendments were made to the Laws of Ukraine, 2 decrees of the President of Ukraine, 217 Resolutions and 40 Orders of the Cabinet of Ministers of Ukraine aimed at overcoming the consequences of the COVID-19 pandemic-19 were issued. Thus, from the beginning of 2020, the economy of Ukraine and the enterprises of transport engineering and the railway industry in particular, began to feel the impact of anti-epidemic measures. Therefore, in this paper it is proposed to consider the impact of quarantine measures on the work of these enterprises by comparing their financial and economic indicators based on the results of activities in 2019 and 2020.

It is proposed to study the impact of the COVID-19 pandemic on the example of such domestic enterprises of transport engineering and railway industry as JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", SE "UkrNDIV", LLC "LEMTRANS", LLC "KERNELPA-TRADE" car repair plant "(hereinafter - TDV" PVRZ"). The main activity of these enterprises is aimed at production, maintenance and repair, operation, as well as performing scientific and experimental research of railway equipment. Thus, JSC "Ukrzaliznytsia" is a national carrier of goods and passengers, which is the largest operator (owner) of rolling stock in the country. PJSC "KVBZ" is the only domestic machine-building enterprise with a full production cycle, which specializes in the manufacture of railway transport for social purposes and is the leader in the number of production of freight rolling stock in the country. SE "UkrNDIV" is a research institution that deals with the problems and development of the whole range of the rail rolling stock, and includes the Testing Center, Inspection and Certification Body for railcar-building products. LEMTRANS LLC and KERNEL-TRADE LLC are the leading private operators of railway rolling stock in Ukraine. LEMTRANS LLC is the largest private owner of the freight car fleet primarily consisting of open-top wagons. KERNEL-TRADE LLC is the largest domestic private owner (operator) of grain wagons. TDV "PVRZ" is an enterprise engaged in the production and repair of freight railway rolling stock, also involved in the manufacture of spare parts for the railway vehicles.

To analyze the activities of the above-mentioned domestic enterprises, the following main technical and economic indicators were selected: net income from sales of products (goods, works, services); cost of goods sold (goods, works, services); gross profit (loss); other operating income; other operating expenses, including administrative; pre-tax financial result; net financial result. The results of the analysis of technical and economic indicators of the above enterprises in 2019 and 2020 are given in Table 1.

The dynamics of growth (reduction) of technical and economic indicators of enterprises to the corresponding period last year are given in Table 2.

Table 1. The results of the analysis of technical and economic indicators of JSC «Ukrzaliznytsia», PJSC «KVBZ», SE «UkrNDIV», LLC «LEMTRANS», LLC «KERNEL-TRADE», TDV «PVRZ» in 2019 and 2020 years [15-20]

Name of indicators	2019					
	JSC "Ukrzaliznytsia"	PJSC "KVBZ"	SE "UkrNDIV"	LLC "LEMTRANS"	LLC "KERNEL-TRADE"	TDV "PVRZ"
Net income from sales of products (goods, works, services)	90352319	8310455	36058	14159825	51482928	2147380
Cost of goods sold (goods, works, services) *	83568776	(6955615)	(29680)	(10895947)	(45932765)	(2008020)

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Continuation of the table 1

Gross profit (loss) *	6783543	1354840	6378	3263878	5550163	139360
Other operating income*	5888538	260401	6000	213171	777043	8997
Other operating expenses*	7808734	(588981)	(11811)	(488296)	(5956052)	(51802)
Pre-tax financial result *	4863347	1043757	567	183705	608977	97673
Net financial result *	2988247	828869	436	0	355787	78823
2020						
Net income from sales of products (goods, works, services) *	75291560	3337075	34269	14391017	67395769	750403
Cost of goods sold (goods, works, services) *	75930411	(3088254)	(28561)	(12375384)	(58114495)	(702954)
Gross profit (loss) *	(638851)	248821	5708	2015633	9281274	47449
Other operating income*	1185203	306055	6860	201948	1666006	10035
Other operating expenses*	(12480659)	(459817)	(9647)	(434307)	(5345080)	(45398)
Pre-tax financial result *	(11934307)	87210	2931	492255	2022738	9641
Net financial result *	(11899687)	71810	2335	440391	1648945	6227

* Note: all technical and economic indicators in Table. 1. are given in thousands of hryvnias.

Table 2. Dynamics of growth (reduction) of technical and economic indicators of enterprises

	JSC "Ukrzaliznytsia"	PJSC "KVBZ"	SE "UkrNDIV"	LLC "LEMTRANS"	LLC "KERNEL-TRADE"	TDV "PVRZ"
Net income from sales of products (goods, works, services)	↓ 16,7%	↓ 59,8%	↓ 5,0%	↑ 1,6%	↑ 30,9%	↓ 65,1%
Cost of goods sold (goods, works, services) *	↓ 9,1%	↓ 55,6%	↓ 3,8%	↑ 1,1%	↑ 26,5%	↓ 65,0%
Gross profit (loss) *	↓7422394	↓ 1106019	↓ 670	↓ 1248245	↑ 3731111	↓ 91911
Other operating income*	↓ 79,9%	↑ 17,5%	↑ 14,3%	↓ 5,3%	↑ 114%	↑ 11,5%
Other operating expenses*	↑ 59,8%	↓ 21,9%	↓ 18,3%	↓ 11,1%	↓ 10,3%	↓ 12,4%
Pre-tax financial result *	↓ 16797654	↓ 956547	↑ 2364	↑ 308550	↑ 1413761	↓ 88032
Net financial result *	↓ 14887934	↓ 757059	↑ 1899	↑ 440391	↑ 1293158	↓ 72596

According to the results of data analysis (Table 1-2) the following is established:

net income from sales of products (goods, works, services) in 2020 compared to 2019 in JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", SE "UkrNDIV", TDV "PVRZ" decreased by 5.0-65.1%, while for LLC "LEMTRANS" and LLC "KERNEL-TRADE" this figure increased by 1.6% and 30.9% respectively;

the cost of goods sold (goods, works, services) in 2020 compared to 2019 had a dynamic reduction in JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", SE "UkrNDIV", TDV "PVRZ" at the level of 3.8-65.0 % and the dynamics of increase in LLC "LEMTRANS" and LLC "KERNEL-TRADE" by 1.1% and 65.0% respectively;

almost proportional increase or decrease in net income from sales of products (goods, works, services) and cost of goods sold (goods, works, services) at domestic enterprises indicates that the unit

cost of production has not changed significantly (the spread of values is recorded at 0.1-7.6%). The maximum scatter of values, comparing these indicators, is observed in JSC "Ukrzaliznytsia";

gross profit following the results of work in 2019 was observed in all the above-mentioned domestic enterprises, while in 2020 JSC "Ukrzaliznytsia" received gross loss, all other enterprises received gross profit;

other operating income in 2020 had the dynamics of increase in PJSC "KVBZ", SE "UkrNDIV", LLC "KERNEL-TRADE", TDV "PVRZ" at 11.5-114%, while JSC "Ukrzaliznytsia" and LEMTRANS LLC showed the dynamics of decrease by 79.9% and 5.3%, respectively;

other operating expenses in 2020 had an increase in dynamics only for JSC "Ukrzaliznytsia" and amounted to 59.8%, in other enterprises a dynamics of decrease at 10.3-21.9% is observed;

financial result before tax and the net financial result in 2020 had a positive dynamics in SE "UkrNDIV", LLC "LEMTRANS", LLC "KERNEL-TRADE" and, accordingly, negative dynamics in JSC "Ukrzaliznytsia", PJSC "KVBZ", TDV "PVRZ". Moreover, following the results of work in 2020 JSC "Ukrzaliznytsia" showed a loss of 11899687 thousand UAH.

Thus, it was established that the national railway operator, railcar-building and car-repair enterprises were mostly affected financially in 2020 following the introduction of quarantine measures. The research institution should be categorized as less affected enterprises. In the conditions of the COVID-19 pandemic, private operators of railway rolling stock of Ukraine were even able to increase sales volumes and increase the net financial result compared to last year.

From the analysis of the given data it is noticeable that there was a significant reduction in the performance of domestic enterprises of transport engineering and the railway industry, with the exception of private operators of railway rolling stock. However, it is difficult to unambiguously define the root causes of such decrease, despite the coincidence in time with the introduction of quarantine measures in the country. Therefore, in the future it is proposed to conduct a detailed analysis of possible causes of reduction in technical and economic indicators of domestic railway enterprises, primarily the national railway operator, car-building and car-repair enterprises.

To find out the most important reasons for the reduction in technical and economic indicators at the relocated enterprises of the transport engineering and railway industries, as well as to study the impact of the COVID-19 pandemic on these indicators, an expert evaluation study was performed. The method of expert evaluation involves the definition of the object of study, proposed to experts for the evaluation of objects (criteria), the selection of experts and their rank of competence.

The object of the study is domestic enterprises of transport engineering and railway industry, which have degraded technical and economic performance of their activities in 2020. To assess the experts proposed ten criteria (factors), which characterize the main reasons for the significant reduction in technical and economic performance of enterprises. It is proposed to determine the most important reasons for degradation of indicators and the impact of the consequences of the COVID-19 pandemic on these indicators by setting expert weighting factors for each proposed criterion (factor). The following main reasons were accepted as criteria (factors):

- 1) the impact of quarantine measures to prevent the spread of the COVID-19 pandemic (IM1);
- 2) the lack of a state program to support and promote the development of transport engineering and the railway industry in the country (IM2); competition from other modes of transport (road, water, air) due to rising costs, deteriorating quality and service of railway products (goods, works, services) (IM3);
- 4) stronger competition from foreign enterprises (IM4);
- 5) reduction of production in related sectors of the economy (IM5);
- 6) aging and physical wear and tear of property complexes, lack of implementation of efficient equipment and resource-saving technologies in transport engineering and railway industry resulting in deteriorating quality of goods and services (IM6);
- 7) decrease in the purchasing power of consumers in transport machine-building and the railway industry (IM7);
- 8) lack of protection of the interests of domestic enterprises during the tender procedure at the level of legislation (IM8);

9) closure of markets for railway products abroad due to the introduction of restrictions at the legislative level and increasing the tax burden (IM9);

10) increasing the cost of energy, fuel and lubricants, heat, etc. (IM10).

The group of experts includes specialists from domestic enterprises and research institutions whose activities are related to the railway industry. During the research it was accepted that the competence level of experts is constant.

Each of the experts determines the weight of a particular criterion so that the total sum of the weights is equal to one hundred points. According to each of the j experts, a certain factor i has an impact of varying degrees on the object of study. According to the degree of influence determined by the expert, the criteria (factors) are ranked, the results of which are presented in the form of a matrix.

The consistency of experts' opinions is determined by the concordance correlation coefficient, which is determined by the expression [21, 22]:

$$K_{\text{коп}} = \frac{\sum_{j=1}^n d_j^2}{\frac{1}{12} \cdot \left[m^2(n^3 - n) - m \sum_{i=1}^m T_i \right]}, \quad (1)$$

$$\text{where } d_j = S_j - \frac{\sum_{j=1}^n S_j}{n}; \quad S_j = \sum_{i=1}^m R_{ij}; \quad T_i = \sum_{i=1}^L (t_e^3 - t_e)$$

L is a number of groups of related (identical) ranks; t_e is the number of related ranks in each group;

n is the number of options offered to experts; m is the number of experts participating in the survey;

S_j is the sum of ranks; d_j is the deviation of the rank sum from the average rank sum.

After making sure that the opinions of experts are consistent, a chart of ranks is built. The degree of influence of criteria (factors) on the object of study is assessed by the rank sum: the greater the rank sum of a factor, the greater the impact of this factor on the object of study.

Next, the values of such important indicators as weight of the criterion (factor), variation scale, standard deviation, coefficient of variation are calculated. These indicators are calculated in order to analyze the variance and consistency of expert assessments.

The weight of the criterion (factor), calculated according to all experts (w_i), is equal to [21, 22]:

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^m w_{ij}}{m}, \quad i = \overline{1, n} \quad (2)$$

Where w_{ij} is the weight of the i -th object, determined by the estimates of the j -th expert, is equal to:

$$w_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m} \quad (3)$$

Where x_{ij} is the estimate of the i -th criterion (factor) given by the expert.

The variation range is calculated by the well-known expression [21]:

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (4)$$

Where,

x_{\max} is the maximum score of the criterion (factor); x_{\min} is the minimum score of the criterion (factor).

The standard deviation is calculated by the known formula [22]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x}_j)^2}{m-1}}, \quad (5)$$

Where, \bar{x}_j is the average value of the evaluation of the criterion (factor) based on the results of the survey of all experts. The coefficient of variation is calculated by the expression [21]:

$$V = \frac{\sigma}{x_j} \cdot 100. \quad (6)$$

In our case, when determining the weighting factors $n = 10$, $m = 10$.

The results of expert evaluation of the weights of the criteria (factors) in the form of a matrix are given in Table. 3. The results of the analysis of the determination of weighting factors by experts are given in Table. 4.

Table 3. The results of expert evaluation of weighting factors

No. of the expert	Expert criterion (factor) of influence									
	IM1	IM2	IM3	IM4	IM5	IM6	IM7	IM8	IM9	IM10
1	3	10	10	5	7	7	3	20	20	15
2	5	25	5	10	10	15	5	5	10	10
3	0	15	15	5	10	5	10	10	25	5
4	5	30	5	5	5	10	20	5	5	10
5	15	15	10	5	10	15	10	10	5	5
6	15	20	10	5	10	10	10	10	5	5
7	10	30	5	0	5	5	10	5	20	10
8	5	20	10	20	5	10	10	10	5	5
9	15	15	20	2	5	10	13	10	5	5
10	8	16	6	7	8	15	7	14	5	14

Table 4. Results of statistical analysis of expert evaluation of weights coefficients

Name of the indicator	Criterion (factor) of influence									
	IM1	IM2	IM3	IM4	IM5	IM6	IM7	IM8	IM9	IM10
Average value	8,1	19,6	9,6	6,4	7,5	10,2	9,8	9,9	10,5	8,4
Weighting factor	0,081	0,196	0,096	0,064	0,075	0,102	0,098	0,099	0,105	0,084
Variation scope	15	20	15	20	5	10	17	15	20	10
RMSD	16,3	20,1	14,2	16,4	7,1	10,6	13,6	13,3	23,4	10,6
Coefficient of variation	202	102	148	256	95	104	139	134	222	126
Concordance coefficient	0,54									

The obtained values (Table 4) demonstrate the satisfactory consistency of the expert evaluation. The analysis of the received data showed that the absence of the state program of support and development promotion of the railway industry in the country (the rank of this factor makes 0,196) has the greatest weight. Also important reasons, according to experts, are the closure of markets for railway products abroad due to other legislative restrictions and increased tax burden (rank 0.105) and aging and physical wear and tear of property complexes, lack of effective equipment and resource-

saving technologies in transport engineering and railway industry (rank 0.102). The rank of the impact of the consequences of the introduction of quarantine measures to counter the pandemic COVID-19 experts estimate at 0.081.

The data results given in Table 1-4 indicate the need and relevance of identifying possible ways to overcome the effects of the COVID-19 pandemic in domestic transport engineering and railway enterprises. Among the possible ways or measures that would allow in the near future to improve the technical and economic performance of the most affected domestic enterprises of transport engineering and the railway industry, the following should be noted:

- introduction of gradual decommissioning of worn-out rolling stock with expired service life and simultaneous renewal of the rolling stock;

- development and approval of a comprehensive rolling stock renewal program in Ukraine with effective mechanisms for monitoring its implementation;

- development and approval of the State target program of support and development of the railway engineering industry with effective mechanisms for monitoring its implementation;

- improvement of the legal field in the field of instruments of trade protection of railway products (goods, works, services) of domestic enterprises, including protection against increased protectionism of other states;

- the need to introduce a mechanism for lending for the purchase of modern efficient equipment and energy-saving technologies under state guarantees;

- increasing the availability of credit resources for the introduction of modern efficient equipment and resource-saving technologies;

- stimulating the attraction of investments in the development of transport engineering and railway industry at the state level;

- reduction in tax burden on the import of innovative equipment for the needs of transport engineering enterprises and the railway industry, which is not manufactured in Ukraine;

 - acceleration of the adoption of a new version of the Law of Ukraine "On Railway Transport";

 - implementation of effective measures to prevent the loss of qualified personnel;

- development of necessary conditions for support and encouragement of acquisition of modern innovative rolling stock of domestic production;

- development of a fundamentally new credit and leasing policy for domestic buyers of railway rolling stock of Ukrainian producers;

- creation of conditions for a full cycle of service by domestic enterprises on the territory of Ukraine of previously purchased high-tech railway products of foreign production;

 - import substitution of high-tech railway equipment and its components;

- establishment of the minimum level of localization of production of complex high-tech railway products in the country during the implementation of tender procurement at the legislative level;

- approval of the branch methodology for determining the degree of localization of production of high-tech products (railway equipment) and the methodology for determining the life cycle costs;

- introduction of new approaches in the implementation of freight and passenger transportation, which would meet modern world trends in railway development and improve the quality and service of services;

- making changes to technical documents and instructions for the repair of rolling stock, aimed at improving the quality and frequency of scheduled work for cars with extended service life;

- introduction of a recycling fee when importing into the customs territory of Ukraine rolling stock that was in use depending on the terms of its operation and type.

Comprehensive implementation of the above measures will not only improve the financial and economic performance of domestic enterprises, but also solve a range of strategic objectives that will contribute to the development of Ukraine's economy. Among which are the following:

 - filling the budgets of all levels with taxes;

 - creation of additional jobs, removal of social tensions related to unemployment;

increase in the financing of the budget sphere due to additional tax revenues and prevention of additional unemployment expenses;

increasing the safety of transportation and defense capabilities of the state;

meeting the needs of railways and industrial enterprises of Ukraine with rolling stock used for passenger and freight transportation, as well as for the maintenance and development of railway infrastructure;

assistance in scientific and technical development of the domestic railway industry and raising the professional training of specialized specialists of Ukraine to a higher level;

reduction in immigration of highly qualified personnel abroad;

increase in economic and social indicators of development of related sectors of the economy;

improvement of the quality of transport services provided by rail;

reduction in import dependence of the state, reduction of trade balance and strengthening of export opportunities;

introduction of advanced design, technological and scientific and technical solutions;

increasing the level of energy saving and indicators of use of other available resources;

reduction of negative impact on the environment (increasing the level of environmental friendliness);

attraction of additional investments in the domestic railway industry;

creation of competitive innovative rolling stock with improved technical and economic indicators;

reduction of operating costs for maintenance and repair of rolling stock, as well as reduction of unit costs for the provision of transport services;

reduction of depreciation of fixed assets of domestic enterprises of the railway industry.

Conclusions

1. The results of the analysis of these technical and economic indicators of domestic enterprises of transport machine-building and railway industry allowed establishing that the conditions of quarantine measures mostly affected the national railway operator, railcar-building and car-repair enterprises. Net income from sales of products (goods, works, services) at these enterprises decreased by 16.7-65.1%. At the same time, the net financial result had a negative dynamics (in JSC "Ukrzaliznytsia" following the results of 2020 there was a loss of almost 12 billion UAH). In the conditions of the COVID-19 pandemic, private operators of freight rolling stock in Ukraine LLC "LEMTRANS" and LLC "KERNEL-TRADE" were able to increase sales of products (goods, works, services) by 1.6% and 30.9% respectively, and also to improve the net financial result by over UAH 440 million and UAH 1293 million, respectively, compared to the previous year.

2. The results of the analysis of expert evaluation data allowed determining that the most important reason for the reduction in technical and economic indicators at domestic enterprises is the lack of a state program to support and stimulate the development of transport engineering and railway industry in the country). Also important reasons for the impact of experts are the closure of markets for railway products abroad due to the introduction of restrictions by other countries at the legislative level and increase the tax burden (10.5%) and aging and physical wear and tear of property complexes, lack of efficient equipment and energy-saving technologies (10,2%). Experts estimate the impact of the consequences of the introduction of quarantine measures to counter the COVID-19 pandemic at 8.1%.

3. Measures have been proposed that would allow in the near future to improve the technical and economic performance of the most affected domestic enterprises of transport machine-building and the railway industries and to promote the development of Ukraine's economy as a whole.

REFERENCES

1. Dolbnieva D.V., (2020). Vliianiie COVID-19 na ekonomiku stran mira. [The impact of COVID-19 on the world economy]. Problemy ekonomiki - Problems of the economy, p. 20–26. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2020-1-20-26> [in Russian]

2. Pandemiia COVID-19. Bioloģiia i ekonomika [The COVID-19 pandemic. Biology and economics]. (2020). Spetsialnyi vypusk: informatsionno-analytycheskii sbornyk - Special issue: information-analytical collection. M.F. Mizintseva (Ed.). VINITI RAN. Moscow: Izdatelstvo Pero [Text] [in Russian]
3. Flahault A. *Lancet*. (2020). *COVID - 19 cacophony: is there any orchestra conductor?*, 395, No. 10229, p. 1037-1038. Eng. DOI: 10.1016 / S0140-6736 (20) 30675-9
4. Legido-Quigley H., Mateos-Garcia J.T., Campos V.R., Gea-Sanchez M., Muntaner C. & McKee M. (2020, March 18). The resilience of the Spanish health system against the COVID-19 pandemic. *Lancet Pub. Health*. Published online., p. 1-2. Eng. DOI: 10.1016 / S2468-2667 (20) 30060-8
5. Kannan S., Shaik Syed Ali P., Sheeza A. & Hemalatha K. (2020). Novel Coronavirus 2019 - recent trends / *Eur. Rev. Med. and Pharmacol. Sci.*. 24, No. 4, p. 2006-2011. Eng. DOI: 10.26355 / eurrev_202002_20378.
6. Dolhov S. Y., Savinov Yu. A., & Taranovskaia E. V., (2020). Vliianiie vspyshki novoho koronavirusa na mezhdunarodnuiu torhovliu [The impact of a new coronavirus outbreak on international trade]. *Rosiiskii vneshniekonomicheskii vestnik – Russian Foreign Economic Journal*, 2, p. 7-18 [in Russian]
7. Taylor L.H., Latham S.M., Woolhouse M.E. (2001). Risk factors for human disease emergence. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B Biol. Sci.*, №. 356, pp. 983–989.
8. Puriwat, W., Tripopsakul, S. (2021). Customer Engagement with Digital Social Responsibility in Social Media: A Case Study of COVID-19 Situation in Thailand. *Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 8 (2), 475–483. doi: <http://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no2.0475>
9. Giones, F., Brem, A., Pollack, J. M., Michaelis, T. L., Klyver, K., Brinckmann, J. (2020). Revising entrepreneurial action in response to exogenous shocks: Considering the COVID-19 pandemic. *Journal of Business Venturing Insights*, 14, e00186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2020.e00186>
10. Zhan, J. (2020). Covid-19 and investment – an UNCTAD research round-up of the international pandemic’s effect on FDI flows and policy. *Transnational Corporations*, 27 (1), 1–2. doi: <https://doi.org/10.18356/42625ea1-en>
11. Kruhlyi D.H., (2020). Doslidzhennia stanu morskikh perevezen pid chas pandemii. *Transportni systemy i tekhnologii [Study of the state of maritime transport during a pandemic. Transportni systemy i tekhnologii Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo universytetu infrastruktury ta tekhnologii - Transport systems and technologies. Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 36. pp. 143-149. doi: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-15> [in Ukrainian]
12. Vodovozov Ye. N., Rudachenko O. O., (2021). Rozrobka metodyky zabezpechennia proteksionizmu pidpriemnytstva v konteksti finansovykh kapitalovkladen z metoiu reabilitatsii transportnoho sektoru [Development of methods for ensuring the protectionism of entrepreneurship in the context of financial investments to rehabilitate the transport sector]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Volume 4, 13 (112), pp. 34–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238414> [in Ukrainian]
13. Dvulit Z. P., Danyiuk I. A. Vplyv COVID-19 na rynek vantazhnykh zaliznychnykh perevezen [Influence of COVID-19 on the market of freight railway transportation]. URL: <http://science.lpnu.ua/uk/smeu/vsi-vypusky/vypusk-2-nomer-2-2020/vplyv-sovid-19-na-rynek-vantazhnykh-zaliznychnykh-perevezen> (Accessed: October 28, 2021).
14. Hladkykh I.V., Lupitko N.V. (2021). Doslidzhennia naslidkiv vplyvu pandemii COVID-19 na diialnist pidpriemstv zaliznychnoho transport [Study of the consequences of the COVID-19 pandemic on the activities of railway transport enterprises]. *Reikovi rukhomyi sklad. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo pidpriemstva «Ukrainskyi Naukovo-Doslidnyi Instytut Vahonobuduvannia» - “Railbound rolling stock”*. Collection of scientific works of the State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 22. pp. 18-31. doi: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-22-18-31> [in Ukrainian]
15. DERZHAVNE PIDPRYEMSTVO "UKRAINSKYI NAUKOVODOSLIDNYI INSTYTUT VAHONOBUDUVANNIA". Zvit pro finansovi rezultaty (Zvit pro sukupnyi dokhid) za rik 2020 - STATE ENTERPRISE "UKRAINIAN RESEARCH INSTITUTE". Report on financial results (Statement of comprehensive income) for the year 2020. URL: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2021/05/F2.-Zvit-pro-finansovi-rezultaty-v-tysyachah-.pdf> (Accesses October 28, 2021) [in Ukrainian]
16. Publichne aktsionerne tovarystvo «Kriukivskiy vahonobudivnyi zavod». Okrema finansova zvitnist u vidpovidnosti do MSFZ za rik, shcho zakinchyvsia 31 hrudnia 2020 roku – Public Joint Stock Company "Kryukiv Railway Car Building Plant". Separate financial statements in accordance with IFRS for the year ended 31 December 2020. URL: https://www.kvsz.com/images/stories/doc/FIN_ZVIT_2020.pdf (Accessed 28.10.2021) [in Ukrainian]
17. RAKHUNKOVA PALATA. ZVIT pro rezultaty audytu efektyvnosti aktsionernoho tovarystva “Ukrainska zaliznytsia” z pytan vykorystannia i rozporiadzhennia derzhavnym mainom rehionalnoiu filiiu “Pivdenno-Zakhidna zaliznytsia”, shcho maiut finansovi naslidky dlia derzhavnogo biudzhetu. Zatverdzheno rishennia Rakhunkovoi palaty vid 13.10.2020 № 27-3 - ACCOUNTING CHAMBER. REPORT on the results of the audit of the effectiveness of the joint-stock company "Ukrainian Railways" on the use and disposal of state property by the regional branch of the "South-Western Railway", which have financial implications for the state budget. Approved decision of the Accounting Chamber dated 13.10.2020 No. 27-3. URL: https://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2020/27-3_2020/Zvit_27-3_2020.pdf (Application date 28.10.2021) [in Ukrainian]
18. Tovarystvo z obmezhenoiu vidpovidalnistiu «LEMTRANS» Okrema finansova zvitnist za MSFZ ta zvit nezalezhnogo audytora 31 hrudnia 2020 r. LEMTRANS - Limited Liability Company. Separate financial statements in accordance with IFRS and the report of the independent auditor on December 31, 2020. URL: <https://www.lemtrans.com.ua/uploads/files/60b484c4970d0492340670.pdf> (Date of application 28.10.2021) [in Ukrainian]

19. Tovarystvo z obmezhenoiu vidpovidalnistiu "KERNEL-TREID". Zvit pro finansovi rezultaty (Zvit pro sukupnyi dokhid) za 2020 rik KERNEL-TRADE Limited Liability Company. Report on financial results (Report on total income) for 2020. URL: http://kerneltrade.prat.in.ua/files/builders/81958/documents/461282/doc_84363.pdf (Accessed: October 28, 2021) [in Ukrainian]

20. Tovarystvo z dodatkovoiu vidpovidalnistiu "Popasnyanskyi vahonoremontnyi zavod". Zvit pro finansovi rezultaty (Zvit pro sukupnyi dokhid) za 2020 rik –Popasnyansky Car Repair Plant Additional Liability Company. Report on financial results (Statement of comprehensive income) for 2020. URL: <http://www.pvrz.org.ua/company/public-information/financial-report-2020.pdf> (Accessed: October 28, 2021) [in Ukrainian]

21. Horbunov M.I. (2018). Vyznachennia perspektyvnykh metodiv pidvyshchennia efektyvnosti halmuvannia z vykorystanniam ekspertnoho otsiniuvannia [Identification of promising methods to increase the efficiency of braking using expert evaluation]. Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific works of DUIT. Transport Systems and Technologies series, 31, (p. 93–101). Kyiv: DUIT [in Ukrainian]

22. Hrabovetskyi, B.Ie. (2010). Metody ekspertnykh otsinok: teoriia, metodolohiia, napriamky vykorystannia [Methods of expert evaluations: theory, methodology, directions of use]. Monograph. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].

Андрій Сулим^{1}, Олександр Сафронів¹, Інна Гладких¹, Надія Лупітько¹*

¹ Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ЗАЛІЗНИЧНОЇ ГАЛУЗІ В УМОВАХ ПАНДЕМІЇ COVID-19

В статті проаналізовано питання впливу наслідків від запровадження карантинних заходів протидії пандемії COVID-19 на діяльність економіки України в цілому та вітчизняного транспортного машинобудівного сектора зокрема. Встановлено, що одними з найбільш постраждалих секторів економіки є транспорт та машинобудування, зокрема галузь залізничного транспорту. Визначено, що на даний час досить актуальним питанням для подальшого розвитку вітчизняних підприємств транспортного машинобудування та залізничної галузі, є оцінка впливу пандемії COVID-19 на діяльність та фінансово-господарські показники цих підприємств. Проаналізовано та досліджено фінансово-господарські показники таких вітчизняних підприємств транспортного машинобудування та залізничної галузі як АТ «Укрзалізниця», ПАТ «КВБЗ», ДП «УкрНДІВ», ТОВ «ЛЕМТРАНС» та ТОВ «КЕРНЕЛ-ТРЕЙД», ТДВ «Попаснянський вагоноремонтний завод». Визначено, що з досліджуваних вітчизняних підприємств за умов введення карантинних заходів найбільш постраждалими виявились АТ «Укрзалізниця», ПАТ «КВБЗ», ТДВ «Попаснянський вагоноремонтний завод». Досліджено основні причини погіршення техніко-економічних показників на вітчизняних підприємствах транспортного машинобудування та залізничної галузі методом експертного оцінювання. За результатами аналізу даних експертного оцінювання встановлено, що найвагомішою причиною погіршення техніко-економічних показників підприємств є відсутність державної підтримки та стимулювання розвитку транспортного машинобудування і залізничної галузі в країні (19,6 %). Вплив наслідків введення карантинних заходів протидії пандемії COVID-19 експерти оцінюють на рівні 8,1 %. Запропоновано заходи для покращення техніко-економічних показників найбільш постраждалих вітчизняних підприємств транспортного машинобудування та залізничної галузі в умовах пандемії COVID-19.

Ключові слова: вітчизняне підприємство, залізнична галузь, пандемія COVID-19, ресурсоенергозберіючі технології, техніко-економічні показники, транспортне машинобудування.

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

²Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

* Автор, відповідальний за листування: pavlo.khozia@gmail.com

КОНЦЕПЦІЇ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ЕЛЕКТРОРУХОМОМУ СКЛАДІ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

В статті розглянуто основні існуючі концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Під час розгляду концепцій прийнято, що бортовий ємнісний накопичувач енергії має незначну потужність та енергоємність. Тому цей накопичувач не здатний прийняти повний об'єм енергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу. Мета – розглянути та проаналізувати концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії; сформулювати переваги і недоліки кожної із існуючих концепцій для здійснення керування енергетичними процесами на електрорухомому складі. Представлено блок-схему електрорухомого складу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії, яку використано для аналізу концепції керування енергетичними процесами. Описано режими роботи електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Визначено п'ять основних концепцій керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Сформульовано переваги і недоліки кожної концепції з урахуванням заданих умов (характеристик електрорухомого складу, умов руху складу, осцилограм тощо). Встановлено загальні переваги і недоліки кожної із розглянутих концепцій, що дозволило сформулювати принципово нову адаптивну концепцію керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Основна ідея сформульованої концепції керування полягає у здійсненні ефективного енергообміну між тяговим обладнанням, бортовим ємнісним накопичувачем енергії, контактною мережею, як в штатних, так і аварійних режимах роботи системи тягового енергозабезпечення, за умов врахування динаміки енергетичних процесів в контактній мережі, що в цілому дозволить підвищити безпеку та енергоефективність перевізного процесу. Отримані результати досліджень сприятимуть розробці та впровадженню ефективних концепцій керування енергетичними процесами на електрорухомому складі.

Ключові слова: бортовий ємнісний накопичувач енергії, електрорухомий склад, керування, концепція, енергетичні процеси.

Вступ та постановка проблеми. На разі особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на подолання енергетичної кризи, викликані викидами вуглеводневого палива, забрудненням навколишнього середовища та глобальним потеплінням. Саме з цієї причини активно проводиться низка досліджень щодо джерел відновлювальної енергії, таких як енергія вітру, сонця, фотоелектричних джерел тощо. Перевага цих типів джерел полягає в тому, що вони не використовують корисні копалини як джерело енергії та не виділяють парниковий газ [1–4]. Інші напрямки цих досліджень, направлені на подолання енергетичної кризи, полягають у зниженні енергоспоживання і стосуються, головним чином, способів підвищення енергоефективності

використання енергії [5–12]. Як один із способів підвищення енергоефективності розглядаються застосування різних пристроїв акумулювання енергії, а дослідження їх прикладного значення проводяться у широкому діапазоні енергосистем [6, 9, 10]. Саме підвищення енергоефективності на електрорухомому складі за рахунок використання пристроїв акумулювання енергії або накопичувачів енергії запропоновано розглянути у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень. Останні розробки пристроїв акумулювання енергії зробили накопичення енергії реалістичною технологією, яку можливо застосовувати на залізничному транспорті, в тому числі на електрорухомому складі. Існує багато пристроїв акумулювання енергії, які розроблено та використовуються у енергосистемах на залізничному транспорті, зокрема на електрорухомому складі. Ці пристрої являють собою електрохімічні (акумуляторні батареї), електромеханічні або механічні (електродвигуни, маховики), ємнісні (електричні двошарові конденсатори), індуктивні (котушки) та гібридні накопичувачі енергії, які представляють собою комбінацію технологій накопичення енергії. Впровадження пристроїв накопичення енергії в енергосистеми на залізничному транспорті сприяють підвищенню ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування його транспортних засобів. Дослідженнями щодо функціонування накопичувачів енергії в енергосистемах залізничного транспорту, зокрема на електрорухомому складі, присвячено чимало робіт як вітчизняних, так і закордонних вчених.

Серед основних слід виділити роботи Дибріна С.В., Костіна М.О., Любарського Б.Г., Шевлюгіна М.В., Черемісіна В.Т., Khodaparastan M., Lee H., Ratniyom-chai T., Tricoli P., Wiczorek M. [5–12]. В представлених роботах достатньо повно розглянуто і проаналізовано питання можливих місць розміщення накопичувачів енергії в системах енергозабезпечення залізничного транспорту та вибору раціонального типу накопичувача для цих систем. За результатами аналізу цих досліджень встановлено, що найбільш раціональним є використання бортових накопичувачів енергії ємнісного типу. При цьому одним з актуальних та недостатньо вивчених питань у цьому напрямку, яке потребує детальних досліджень, залишається розробка ефективних систем керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з ємнісними накопичувачами енергії. В цій роботі для досягнення поставленої мети щодо розробки ефективної системи керування запропоновано проаналізувати вже існуючі та реалізовані технічні рішення.

Мета – виконати порівняльний аналіз концепцій керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з ємнісними накопичувачами енергії.

Матеріал та результати досліджень. В цій роботі перед аналізом існуючих концепцій керування енергетичними процесами спочатку запропоновано розглянути блок-схему електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії, а також основні режими роботи як бортових ємнісних накопичувачів енергії, так і електрорухомого складу з цими накопичувачами.

Блок-схему електрорухомого складу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії, яку використано для аналізу існуючих концепцій керування енергетичними процесами, зображено на рис. 1.

На зазначеній блок-схемі (рис. 1) прийнято такі позначення: 1 – струмоприймач; 2 – датчик напруги контактної мережі; 3 – керований комутатор контактної мережі; 4 – блок перетворення електроенергії; 5 – тяговий електродвигун; 6 – датчик струму тягового електродвигуна; 7 – датчик напруги електродвигуна; 8 – реверсивний перетворювач; 9 – бортовий ємнісний накопичувач; 10 – датчик струму накопичувача; 11 – датчик напруги накопичувача; 12 – блок керування; 13 – гальмівний резистор; 14 – керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора; 15 – контактна мережа; 16 – приводні колеса електрорухомого складу; 17 – рейка; 18 – електрорухомий склад.

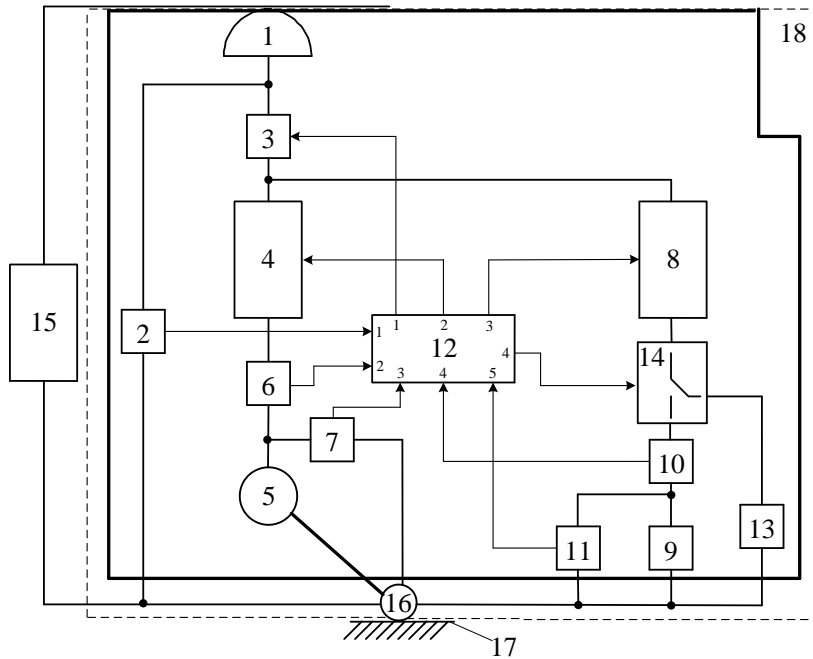


Рис. 1. Блок-схема електрорухомого складу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії

Струмоприймач 1 виконаний з можливістю з'єднання з контактною мережею 15 і послідовно з'єднаний з тяговим електродвигуном 5 через керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4 і датчик струму тягового електродвигуна 6. Вихід струмоприймача 1 з'єднаний з датчиком напруги контактної мережі 2. Датчик напруги тягового електродвигуна 7 паралельно підключений до тягового електродвигуна 5. Тяговий електродвигун 5 виконаний з можливістю механічного з'єднання з приводними колесами електрорухомого складу 16 і рейкою 17. Вхід реверсивного перетворювача 8 з'єднаний з виходом керованого комутатора контактної мережі 3, а його вихід з'єднаний з накопичувачем 9 та гальмівним резистором 13 через керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Бортовий ємнісний накопичувач 9 виконаний у вигляді конденсаторних модулів, підключений до реверсивного перетворювача 8 та з'єднаний з датчиком струму накопичувача 10 і датчиком напруги накопичувача 11 відповідно послідовно і паралельно.

Гальмівний резистор 13 призначений для поглинання надлишкової енергії рекуперації і з'єднаний з бортовим ємнісним накопичувачем 9 паралельно.

Блок керування 12 виконаний у вигляді мікропроцесора і призначений для здійснення в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами між контактною мережею 15, тяговим електродвигуном 5 та бортовим ємнісним накопичувачем 9. Входи 1-5 блоку керування 12 з'єднані з датчиками 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а його виходи 1-4 з'єднані з керованим комутатором контактної мережі 3, блоком перетворення електроенергії 4, реверсивним перетворювачем 8 та керованим перемикачем накопичувача і гальмівного резистора 14 відповідно.

Блок керування 12 під час будь-якого режиму ведення (тяги, вибігу, рекуперативного гальмування) на входи 1-5 отримує сигнали з датчиків 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а через виходи 1-4 здійснює керування енергообмінними процесами.

Датчик 2 контролює напругу контактної мережі 15, датчик 6 – струм тягового електродвигуна 5, датчик 7 – напругу тягового електродвигуна 5, датчик 10 – струм накопичувача 9, датчик 11 – напругу бортового ємнісного накопичувача 9.

Основними режимами роботи бортових ємнісних накопичувачів енергії є:

режим, за якого накопичувач енергії не заряджається енергією рекуперативного гальмування та не розряджається на тягові електродвигуни або контактну мережу;

режим заряду або накопичування енергії;

режим розряду або живлення тягових споживачів енергії.

Основні режими роботи електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії описано нижче:

початковий або «нульовий» штатний режим, за якого електрорухомий склад зупинено і відключено від системи зовнішнього енергопостачання; бортовий ЄНЕ має мінімально допустимий рівень заряду;

штатний режим, за якого електрорухомий склад зупинено і підключено до системи зовнішнього енергопостачання; бортовий ЄНЕ має мінімально допустимий рівень заряду;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі тяги; бортовий ЄНЕ розряджається;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі тяги; бортовий ЄНЕ розряджений до мінімального значення, тому його заряд та розряд не виконуються;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі вибігу; заряд або розряд бортового ЄНЕ не здійснюється;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі рекуперативного гальмування; бортовий ЄНЕ заряджається;

штатний режим, за якого електрорухомий склад підключений до системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі рекуперативного гальмування; бортовий ЄНЕ заряджений до максимального значення енергоємності, тому його заряд та розряд не виконуються;

аварійний режим, за якого електрорухомий склад відключений від системи зовнішнього енергопостачання; бортовий ЄНЕ має заряд не нижче мінімально допустимого рівня;

аварійний режим, за якого електрорухомий склад відключений від системи зовнішнього енергопостачання і рухається в режимі тяги; бортовий ЄНЕ розряджається.

Режими роботи електрорухомого складу з бортовими ємнісними накопичувачами енергії описано за умов живлення нетягових споживачів тільки від контактної мережі. Роботу електрорухомого складу з бортовими ЄНЕ в вищенаведених режимах розглянуто в праці [13]. Тому відсутня необхідність детально зупинятись на цьому питанні і в подальшому переходимо безпосередньо до аналізу існуючих концепцій керування енергетичними процесами.

Існуючі концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії та алгоритми їх роботи проаналізовано шляхом огляду ряду досліджень [8, 13–20]. Існуючі концепції керування енергетичними процесами умовно можна поділити на п'ять окремих груп:

1) обмеження струму споживання з контактної мережі (бортовий накопичувач енергії підключається тільки в момент максимального енергообміну при досягненні певного граничного значення струму або потужності);

2) обмеження струму споживання з бортового ЄНЕ (бортовий накопичувач енергії відключається за умов досягнення граничного значення струму або потужності);

3) максимальне використання енергії від бортового накопичувача енергії;

4) залежно від швидкості руху складу;

5) використання бортового накопичувача енергії тільки для живлення тягових споживачів під час аварійного зняття напруги в контактній мережі.

Переваги і недоліки кожної із вищенаведених концепцій за штатних режимів роботи запропоновано розглянути на прикладі тягових і гальмівних характеристик, струму споживання і рекуперації електрорухомого складу (рис. 2), а також осцилограм струму, напруги на струмоприймачі, швидкості руху, які наведено на рис. 3. Ці осцилограми отримано

експериментальним шляхом, під час реальних умов експлуатації електрорухомого складу з означеними характеристиками між декількома станціями.

Під час аналізу концепцій прийнято, що бортовий ЄНЕ має незначну потужність та енергоємність, і не може прийняти повний об'єм рекуперованої енергії електрорухомим складом. Процеси рекуперації (заряду бортового ЄНЕ) розглянуто за критерієм максимального енергообміну, тобто першочергово електроенергія рекуперативного гальмування направлена на заряд бортового ЄНЕ. За умов повного заряду бортового ЄНЕ до заданої величини, енергія рекуперативного гальмування електрорухомого складу віддається до контактної мережі. Якщо в контактній мережі відсутній споживач енергії, тоді надлишкова енергія рекуперативного гальмування гаситься на гальмівному резисторі. Бортовий ЄНЕ живиться від ідеального джерела з постійним струмом на швидкостях руху 50-70 км/год та з лінійно спадаючим струмом на швидкостях руху 0-50 км/год (рис. 2, б). В початковий момент руху бортовий ЄНЕ повністю заряджений (рис. 3). Контроль рівня заряду та розряду бортового ЄНЕ виконується за допомогою датчика напруги та струму в колі накопичувача.

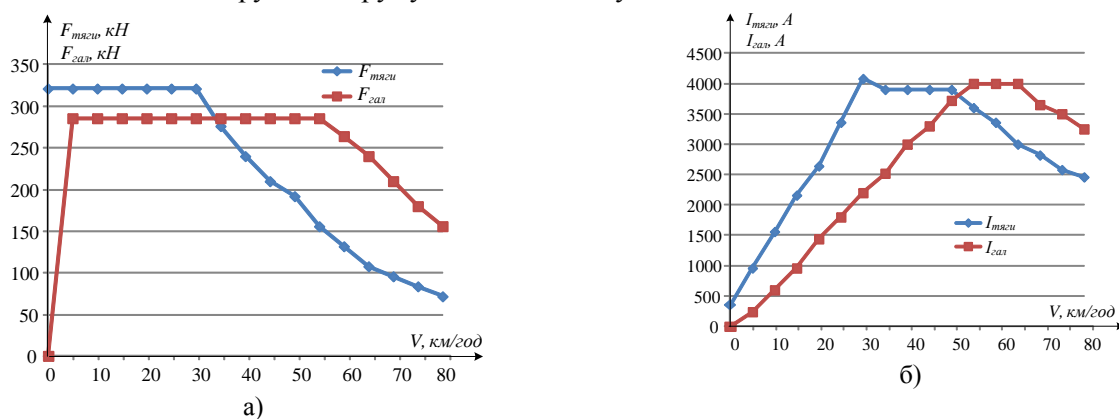


Рис. 2. Характеристики:

а – сила тяги і гальмування; б – споживання та рекуперації струму

Концепція обмеження струму або потужності споживання з контактної мережі (перша концепція) [8, 14, 15, 20, 21]. Ця концепція системи керування енергетичними процесами головним чином направлена на зниження рівня споживання електроенергії з контактної мережі. За умов перевищення заданого граничного значення струму або потужності живлення тягового приводу виконується одночасно від контактної мережі та бортового ЄНЕ, в іншому випадку – тільки від контактної мережі. Як правило, задане граничне значення струму або потужності обирається на рівні номінального, однак не виключено інші варіанти обрання цього значення. Концепція системи керування енергетичними процесами, за якої обмежується струм або потужність споживання з контактної мережі, пояснюється графіками струмів на рис. 4, 5.

На графіках рис. 4, 5 прийнято такі припущення: граничне значення струму дорівнює 2000 А, обраний бортовий ЄНЕ з заданою величиною енергоємності дозволяє повністю компенсувати споживання електроенергії з мережі за умов обраного граничного значення струму 2000 А.

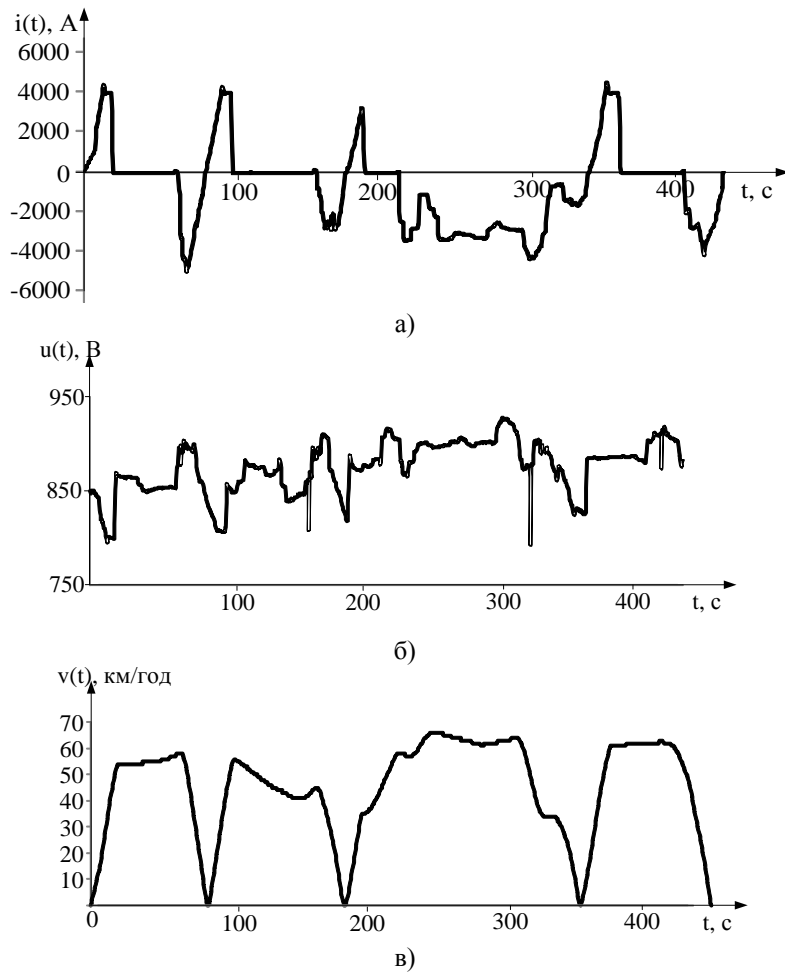


Рис. 3. Осцилограми під час експлуатації рухомого складу між станціями: а – струм рухомого складу в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; б – напруга на струмоприймачі $u(t)$; в – швидкість руху $v(t)$

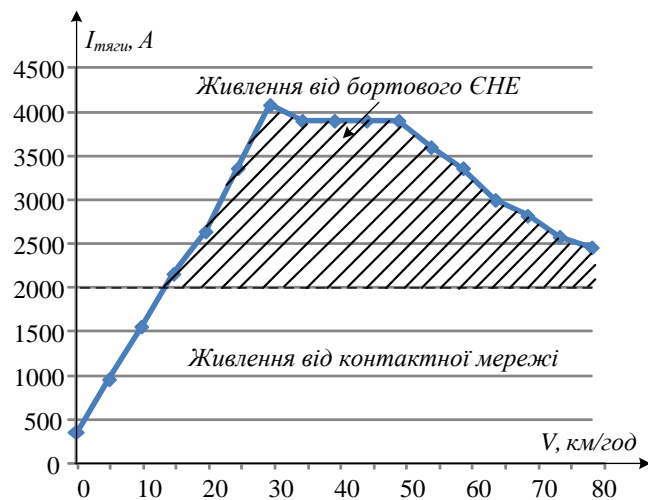


Рис. 4. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням першої концепції

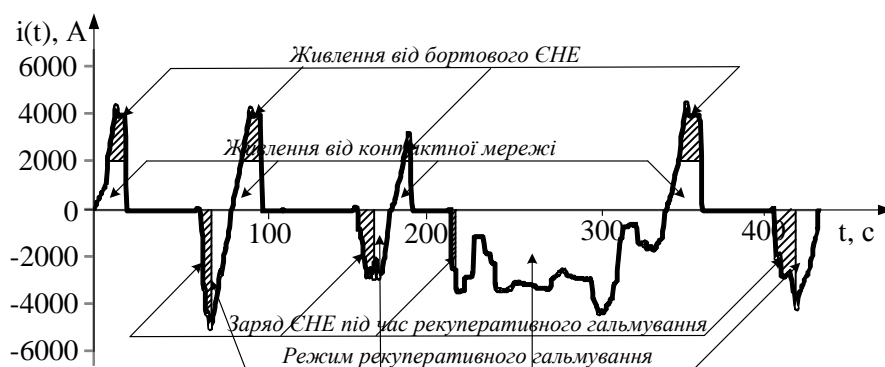


Рис. 5. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування першої концепції

Переваги застосування першої концепції:

- простий варіант реалізації системи керування;
- зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу;
- високий коефіцієнт корисної дії енергообмінних процесів внаслідок відсутності роботи бортового ЄНЕ в глибоких зарядно-розрядних режимах;
- зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;
- підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу.

Недоліки застосування першої концепції:

- імовірність виникнення енергообмінних процесів незначна порівняно з іншими концепціями, як наслідок, низька ефективність енергетичних процесів та частість використання бортового ЄНЕ;
- залежність використання енергії рекуперативного гальмування від інтенсивності розгону складу;
- ефективність енергетичних процесів значною мірою залежить від режиму руху електрорухомого складу (інтенсивності розгону), профілю колії та обраних граничних значень струму або потужності, а також обраної енергоемності бортового ЄНЕ, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;
- концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);
- концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.
- Концепція обмеження струму або потужності споживання з бортового ЄНЕ (друга концепція) [8, 18, 19]. Ця концепція системи керування, як і попередня, направлена на зниження рівня споживання електроенергії з контактної мережі та стабільне протікання енергетичних процесів. Однак принцип дії цієї концепції діаметрально протилежний попередній: спочатку до досягнення граничного струму або потужності тяговий привід отримує живлення від бортового ЄНЕ, потім за умов досягнення граничної величини живлення тягового приводу виконується одночасно від контактної мережі та бортового ЄНЕ. Під час падіння рівня напруги на бортовому ЄНЕ до мінімально заданої величини живлення тягового приводу відбувається тільки від контактної мережі.

Концепція системи керування енергетичними процесами, за якої обмежується струм або потужність споживання з бортового ЄНЕ, пояснюється графіками струмів на рис. 6, 7.

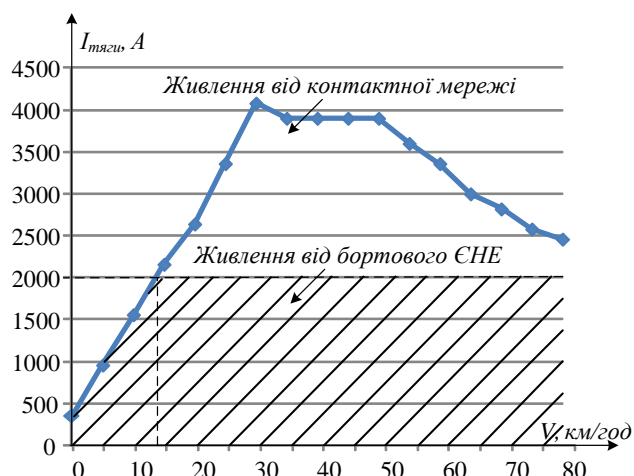


Рис. 6. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням другої концепції

На графіках рис. 6, 7 прийнято наступні припущення: граничне значення струму дорівнює 2000 А, обраний бортовий ЄНЕ заданої величини енергоємності дозволяє повністю компенсувати споживання електроенергії з мережі за умов граничного значення струму 2000 А.

Переваги застосування другої концепції:

- простий варіант реалізації системи керування;
- зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу;
- частіше використання бортового ЄНЕ та його робота в глибоких зарядно-розрядних режимах, що в цілому дозволяє досягти значного техніко-економічного ефекту;
- зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;
- підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу;
- пріоритет надається живленню тягового приводу від бортового ЄНЕ, що дозволяє ефективно використовувати електроенергію рекуперативного гальмування.

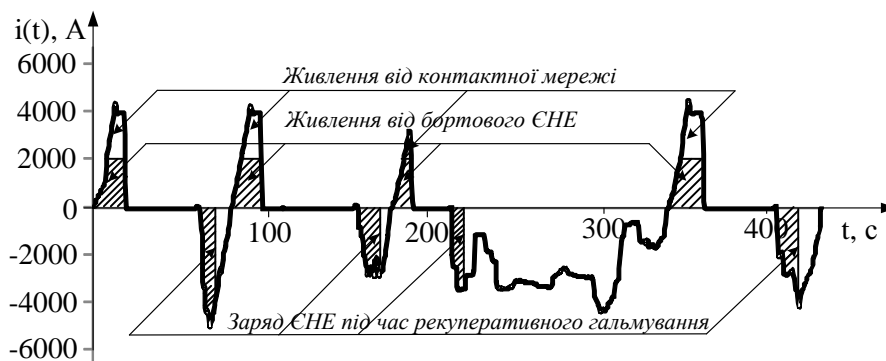


Рис. 7. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування другої концепції

Недоліки застосування другої концепції:

низький коефіцієнт корисної дії енергетичних процесів за умов роботи бортового ЄНЕ при глибокому розряді;

необхідність обґрунтування обраних значень струму або потужності, а також енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від їх правильного вибору буде залежати ефективність енергетичних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;

концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);

концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.

Концепція керування за критерієм максимального використання накопиченої енергії (третья концепція) [8, 14, 16, 22]. Ця концепція направлена на максимальне використання накопиченої електроенергії рекуперативного гальмування в бортовому ЄНЕ під час розгону електрорухомого складу. Концепція передбачає живлення тягового приводу, в першу чергу, від бортового ЄНЕ, а потім за умови його розряду до мінімально допустимого значення напруги, від контактної мережі. Концепція, за якої передбачається максимальне використання накопиченої енергії бортовим ЄНЕ, пояснюється графіками струмів на рис. 8, 9.



Рис. 8. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням третьої концепції

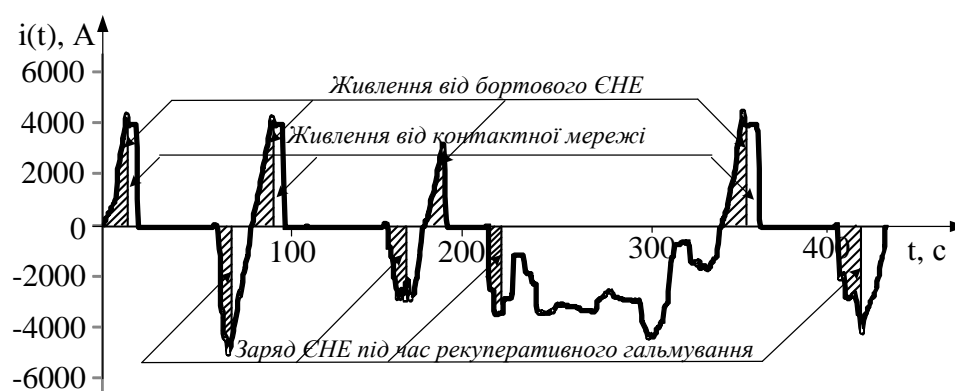


Рис. 9. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування третьої концепції

На графіках рис. 8, 9 прийнято припущення, що обраний бортовий ЄНЕ заданої енергоємності повністю забезпечує живлення тягового обладнання в режимі пуску.

Переваги застосування третьої концепції:

простий варіант реалізації системи керування;

максимальне досягнення техніко-економічного ефекту порівняно з іншими концепціями завдяки пріоритету використання енергії з бортового ЄНЕ;

максимальне використання накопиченої електроенергії рекуперативного гальмування складу;

здійснення максимального енергообміну та прогнозована стабільність протікання енергетичних процесів;

зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;

підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу;

Недоліки застосування третьої концепції:

незначний ресурс використання бортового ЄНЕ внаслідок його роботи в «глибоких» зарядно-розрядних режимах порівняно з іншими концепціями;

необхідність обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від її правильного вибору буде залежати ефективність енергообмінних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;

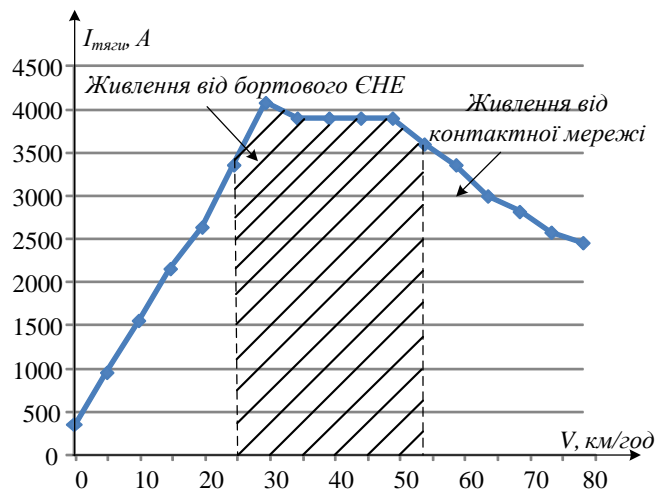
використання енергії бортового ЄНЕ на етапі початкового розгону, як наслідок, відсутні обмеження споживання струму з контактної мережі на високих швидкостях руху складу в режимі тяги та можливість зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення;

концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);

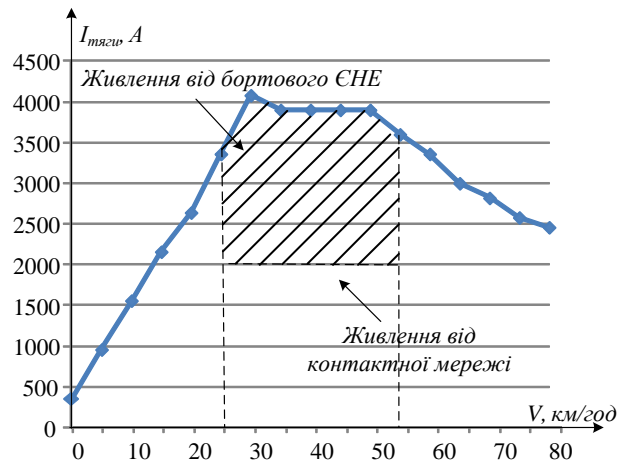
концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.

Концепція споживання енергії від бортового ЄНЕ залежно від швидкості руху (четверта концепція) [8, 23]. Ця концепція направлена на зменшення споживання електроенергії з контактної мережі за рахунок використання накопиченої енергії рекуперативного гальмування при заданих швидкостях руху. Як правило, живлення від бортового ЄНЕ здійснюється на швидкостях, при яких струм споживання максимальний. На заданих швидкостях руху можливе здійснення живлення тягового обладнання як тільки від бортового ЄНЕ, так і передбачити сумісне живлення від бортового ЄНЕ та контактної мережі. Концепцію споживання енергії від бортового ЄНЕ залежно від швидкості руху складу проілюстровано за допомогою графіків, які зображено на рис. 10, 11.

На графіках рис. 10, 11 прийнято умову, що діапазон швидкостей руху, за яких тягове обладнання отримує живлення від бортового ЄНЕ, становить 25-53 км/год. Осцилограми струму електрорухомого складу на рис. 11 наведено з урахуванням живлення тягового обладнання на зазначених швидкостях тільки від бортового ЄНЕ.



а)



б)

Рис. 10. Струм споживання електрорухомим складом в режимі тяги з використанням четвертої концепції: а – живлення тільки від бортового ЄНЕ; б – сумісне живлення тягового обладнання від бортового ЄНЕ та контактної мережі

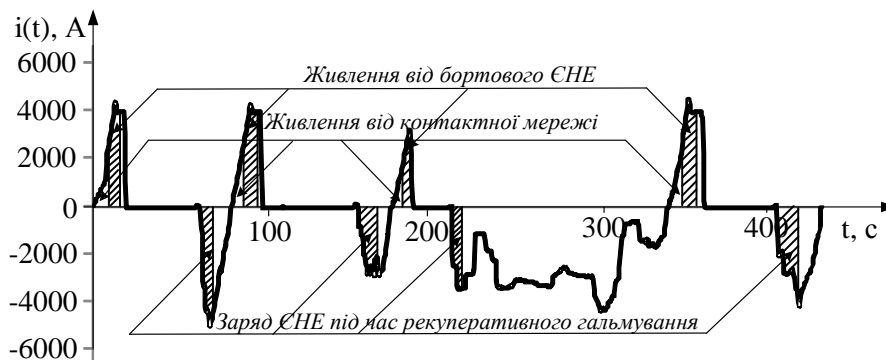


Рис. 11. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов застосування четвертої концепції

Переваги застосування четвертої концепції:

простий варіант реалізації системи керування;

зменшення встановленої потужності силового обладнання системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу;

зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання;

підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу;

використання бортового ЄНЕ не залежить від інтенсивності розгону, що в цілому дозволяє досягти значного техніко-економічного ефекту та досягати стабільного протікання енергетичних процесів.

Недоліки застосування четвертої концепції:

низький коефіцієнт корисної дії енергетичних процесів за умов роботи бортового ЄНЕ при глибокому розряді;

необхідність обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від її правильного вибору буде залежати ефективність енергетичних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень;

залежність використання енергії рекуперативного гальмування від інтенсивності розгону;

концепція не враховує динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі (наявність споживачів електроенергії, режимів їх руху тощо);

концепція не забезпечує можливість виведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда.

Концепція використання бортового ЄНЕ під час аварійного зняття напруги в контактній мережі (п'ята концепція) [24, 25]. Ця концепція направлена на підвищення безпеки перевізного процесу та можливості автономного ходу електрорухомого складу під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення. Концепція передбачає живлення тягового приводу від бортового ЄНЕ під час руху електрорухомого складу до найближчої станції. Концепцію використання бортового ЄНЕ під час аварійного зняття напруги в контактній мережі описано за допомогою графіків, які зображено на рис. 12, 13.

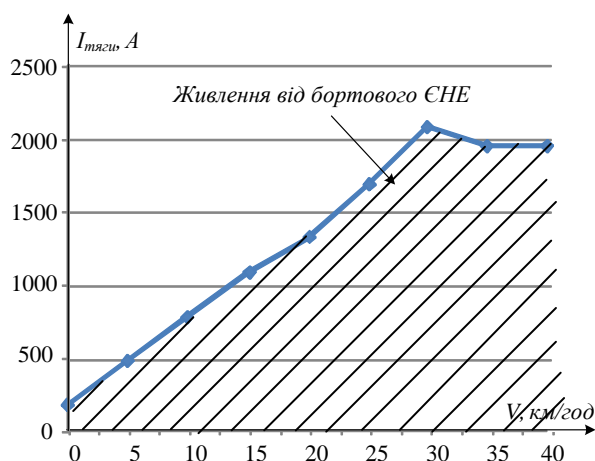


Рис. 12 . Струм споживання електрорухомим складом під час аварійного зняття живлення в контактній мережі

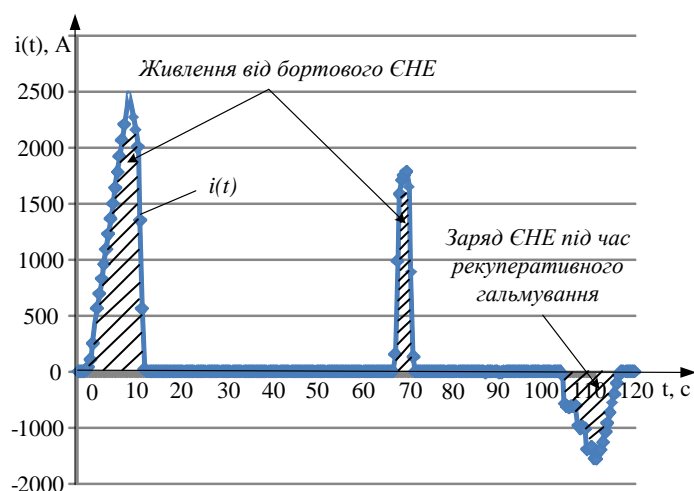


Рис. 13. Осцилограма струму $i(t)$ електрорухомого складу за умов його автономного ходу під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення

Головний недолік цієї концепції полягає у тому, що живлення тягових споживачів від бортового ЄНЕ забезпечуються тільки під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення. В штатному режимі роботи системи тягового енергозабезпечення електрорухомого складу живлення тягових споживачів забезпечується від контактної мережі. При цьому, як і для вищезазначених концепцій керування енергетичними процесами в штатних режимах роботи системи енергозабезпечення, необхідне обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ.

Таким чином, кожній із розглянутих концепцій керування енергообмінних процесів притаманні свої переваги і недоліки. Загальними перевагами кожної із розглянутих концепцій є простий варіант реалізації системи керування; зменшення споживання електроенергії з контактної мережі; зменшення витрат, пов'язаних з транспортуванням електроенергії в мережі зовнішнього постачання; підвищення рівня та стабільності напруги контактної мережі під час руху складу в режимі тяги, що в цілому дозволить підвищити пропускну здатність на перегоні та безпеку перевізного процесу. Простий варіант реалізації системи керування полягає в тому, що підключення бортового ЄНЕ як джерела живлення виконується за одним показником (граничним струмом, швидкістю). Загальними недоліками кожної концепції є відсутня можливість врахування динаміки енергетичних процесів, що відбувається в тяговій мережі, а також відсутня можливість одночасного функціонування бортового ЄНЕ як в штатних режимах роботи, так і аварійних, за умов зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення поїзда. Незалежно від обраної концепції необхідно виконувати окремі дослідження щодо вибору величини енергоємності бортового ЄНЕ, а також граничних величин струму для першої і другої концепцій та діапазону швидкості руху для четвертої концепції.

Висновки. Узагальнений порівняльний аналіз існуючих концепцій керування енергообмінними процесами дозволив встановити таке:

концепції з обмеженням струму або потужності споживання з контактної мережі дозволяють зменшити споживання електроенергії та встановлену потужність силового обладнання системи тягового енергозабезпечення, підвищити стабільність напруги контактної мережі, що в цілому підвищить пропускну здатність та підвищить ефективність перевізного процесу. При цьому темою окремих досліджень за умов застосування цих концепцій є визначення граничних значень струму або потужності, за яких відбувається живлення від бортового ЄНЕ та здійснюється ефективний енергообмін. Ці концепції не забезпечують автономне ведення електрорухомого складу під час аварійного відключення живлення контактної мережі;

концепція керування за критерієм максимального використання накопиченої енергії дозволяє максимально підвищити ефективність використання електроенергії рекуперативного

гальмування, обмежити споживання електроенергії під час розгону електрорухомого складу, підвищити пропускну здатність перегону та стабілізувати напругу в контактній мережі під час розгону. Однак дана концепція передбачає використання енергії бортового ЄНЕ на етапі початкового розгону та не дозволяє зменшити струм споживання з контактної мережі на високих швидкостях руху. Ця концепція також не враховує динаміку енергетичних процесів в контактній мережі та не забезпечує можливість автономного ведення електрорухомого складу до найближчої станції під час аварійного відключення живлення контактної мережі;

концепція споживання енергії від бортового ЄНЕ залежно від швидкості руху дозволяє зменшити споживання електроенергії з контактної мережі, підвищити пропускну здатність перегону, стабілізувати напругу в контактній мережі під час заданих швидкостей руху, за яких відбувається живлення від бортового ЄНЕ. Енергія, накопичена в бортовому ЄНЕ використовується на заданих швидкостях руху, незалежно від інтенсивності розгону. При цьому необхідне обґрунтування обраної величини енергоємності бортового ЄНЕ, оскільки від її правильного вибору буде залежати ефективність енергетичних процесів та техніко-економічний ефект в цілому, що є предметом проведення окремих комплексних досліджень. Ефективність використання енергії рекуперативного гальмування залежить від інтенсивності розгону.

концепція використання бортового ЄНЕ під час аварійного зняття напруги в контактній мережі направлена на підвищення безпеки перевізного процесу та можливості автономного ходу електрорухомого складу під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення. Концепція передбачає живлення тягового приводу від бортового ЄНЕ під час аварійного зняття живлення в системі тягового енергозабезпечення, тобто відсутня можливість його використання за штатної роботи системи живлення.

В подальшому необхідно розробити адаптивну концепцію керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Основна ідея цієї концепції керування має полягати у здійсненні ефективного енергообміну між тяговим обладнанням, бортовим ємнісним накопичувачем енергії, контактною мережею, як в штатних, так і аварійних режимах роботи системи тягового енергозабезпечення, за умов врахування динаміки енергетичних процесів в контактній мережі, що в цілому дозволить підвищити безпеку та енергоефективність перевізного процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Skea J., Anderson D., Green R., Gross R., Hep-tonstall P., Leach M. Intermittent renewable generation and maintaining power system reliability. IET Gener. Transm. Distrib., 2008, Vol. 2, No. 1, P.82-89.
2. Шевлюгин М.В., Жуматова А.А. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных до-рог. НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. № 4. С. 25–28.
3. Lee H., Song J., Lee H., Lee Ch., Jang G., Kim G. Capacity optimization of the supercapacitor energy storages on DC railway system using a railway powerflow algorithm. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, No. 5(B), P.2739–2753.
4. The Future of Rail Opportunities for energy and the environment. IEA Publications. France, 2019. 175 p.
5. Petrenko O., Liubarskiy B., Pliugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Електротехніка і електромеханіка. 2017. № 6. P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
6. Sulym, A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of On-board capacitive energy storage of the rolling stock. Naukovi Visnyk NHU. Dnipro, 2018. Iss. 5. P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
7. Муха А.М., Костін М.О., Куриленко О.Я., Ципля Г.В. Підвищення ефективності роботи електро-приводу постійного струму на основі використання суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. 2017. № 5 (71). С. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>
8. Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. ET Electr. Syst. Transp. 2014, Vol. 4, № 1, P. 9–20.
9. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. TTS Technika Transportu szynowego. 2018. № 10. P. 39–43.
10. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for Electric Rail Transit Systems. Inventions. 2019, 4, 62, P. 1–15.

11. Дибрін С.В. Вибір ємнісного накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів шахтного транспорту з індукційною передачею енергії. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2018. № 54. С. 300–310.
12. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. № 1. С. 15–20.
13. Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О. Застосування бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену. Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. 2020. № 4(260). С. 87–92. doi: 10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92.
14. Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 6 (1115). С. 132–137
15. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyu-barskiy B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. International journal of renewable energy research. Vol. 9. No. 2. P. 848–858.
16. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Sta-matin V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Iss. 3 (102). – P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
17. Kondo K. Recent energy saving technologies on railway traction systems. IEEJ Trans. 2010. № 5. P. 298–303.
18. Szênásy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. Acta Technica Jaurinensis. 2009. Vol. 2. № 1. P. 117–131.
19. Iannuzzi D., Tricoli P. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. IEEE Trans. Power Electron. 2012. № 27 (3-4). P. 2129–2140.
20. Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. Computational problems of electrical engineering. 2019, Vol. 9, No. 1, P.44-52.
21. Рыбалко А.Я., Дибрин С.В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 356–361.
22. Волков В.А. Оптимизация электропотребления троллейбуса с тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2019. Вип. 1 (45). С. 8–24. doi: 10.30929/2072-2052.2019.1.45.8-24.
23. Мазнев А.С., Степанская О.А., Шатнев О.И. Системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на городском транспорте Санкт-Петербурга. Известия ПГУПС. 2017. Вып. 1. С. 63–72.
24. Шевлюгин М.В. Система накопления энергии на вагоне метро для аварийного вывода поезда из туннеля. НТТ – Наука и техника транспорта. 2006. № 3. С. 29–32.
25. Донченко А.В., Сулим А.А. Определение энергоёмкости накопителя при возникновении аварийных ситуаций в системе энергообеспечения метрополитена. Educatio. Технические науки. 2014. Вып. 7. С. 79–83.

REFERENCES

1. Skea J., Anderson D., Green R., Gross R., Heptonstall P., Leach M. (2008). Intermittent renewable generation and maintaining power system reliability. IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 2, № 1, pp.82-89.
2. Shevliugin M.V., Zhumatova A.A. (2008). Vozmozhnost ispolzovaniia vozobnovliaemykh istochnikov enerhii v sistemie tiahovoho elektrosnabzheniia zheleznnykh doroh [The possibility of using renewable energy sources in the traction power supply system of railways]. NTT – Nauka i tehnika transporta – NTT - Science and Transport Technik, No. 4, pp. 25–28. [in Russian].
3. Lee H., Song J., Lee H., Lee Ch., Jang G., Kim G. Capacity optimization of the supercapacitor energy storages on DC railway system using a railway powerflow algorithm. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, № 5(B), pp. 2739–2753.
4. The Future of Rail Opportunities for energy and the environment. IEA Publications. France, 2019. 175 p.
5. Petrenko O., Liubarskiy B., Pliugin V. (2017). Determination of optimal motion modes of the railway rolling stock. *Elektrotehnika i Electromechanika – Elektrotechnology and Elektromechanics*, №6, pp. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
6. Sulym, A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of onboard energy storage capacitors of the rolling stock. Naukovyi Visnyk NHU. Dnipro, Iss.5, pp. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
7. Mukha A.M., Kostin M.O., Kurylenko O.Ya., Tsyplia G.V. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty elektropryvodu postiinoho strumu na osnovi vykorystannia superkondensatornykh nakopychuvachiv elektroenerhii [Improving the efficiency of the DC electric drive based on the use of supercapacitor energy storage]. *Nauka ta prohres transport - Science and transport progress*. Bulletin of DNUZT V. Lazarian, 5 (71), pp. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624> [in Ukrainian].
8. Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. (2014). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. ET Electr. Syst. Transp., Vol. 4, № 1, p. 9–20.
9. N Wieczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. TTS Technika Transportu szynowego. 2018. № 10, pp.39–43.

10. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for Electric Rail Transit Systems. *Inventions*. 2019, 4, 62, P. 1–15.
11. Dybrin S.V. (2018). Vybir iemnisnogo nakopychuvacha enerhii dlia zabezpechennia zbilshennia chysla eksploatovanykh na horyzonti elektrovoziv shakhtnoho transportu z induktsiinoiu peredacheiu enerhii [Selection of capacitive energy storage to increase the number of electric locomotives operated on the horizon of mine transport with induction energy transfer]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu - Collection of scientific works of the National Mining University*, 54, pp. 300–310. [in Ukrainian].
12. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S. (2008). Snizheniie raskhoda eliektronerhii na dvizhienie poezdov v Moskovskom metropolitene pry yspolzovanny emkostnykh nakopytelei enerhyi. Reduction of electricity consumption for train movement in the Moscow metro by the use of capacitive energy storages. *NTT – Nauka i tehnika transporta - NTT - Science and technology of transport*, 1, pp. 15–20 [in Russian].
13. Sulym A.O., Khozya P.O., Melnyk O.O. (2020) Snyzhenye raskhoda elektroenerhyi na dvyzhenye poezdov v Moskovskom metropolitene pry yspolzovanny emkostnykh nakopytelei enerhyi. Application of on-board capacitive storages of low power and capacitance on the metro rolling stock. *Bulletin of the East Ukrainian. Nat. Vladimir Dahl University*, №. 4 (260), pp. 87–92. doi: 10.33216 / 1998-7927-2020-260-4-87-92. [in Ukrainian].
14. Ryabov E.C. Determination of energy storage parameters for electric rolling stock with asynchronous traction drive in current limiting mode of the traction network. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". H. : NTU "KhPI"*, 2015. №6 (1115), pp. 132–137 [in Russian].
15. 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*, Vol. 9, № 2, pp. 848–858.
16. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Iss. 3 (102), pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
17. Kondo K. Recent energy saving technologies on railway traction systems. *IEEE J Trans*. 2010. № 5, pp. 298–303.
18. Szênâsy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Acta Technica Jaurinensis*. 2009. Vol. 2. № 1, pp. 117–131.
16. Iannuzzi D., Tricoli P. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. *IEEE Trans. Power Electron*. 2012. № 27 (3-4), pp. 2129–2140.
20. N Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational problems of electrical engineering*. 2019, Vol. 9, № 1, pp. 44–52.
21. Rybalko A. Ya., Dybrin S.V. (2008). Vybór yemkosti nakopyteliia enerhii dlia obespecheniia snyzheniia maksimuma potrebliaemoi moshchnosti [Selection of energy storage capacity to reduce the maximum power consumption]. *Hornyi informatsiino-analiticheskiy bulleten - Mining informational and analytical bulletin*, 8, pp. 356–361 [in Russian]
22. Volkov V.A. (2019). Optimizatsiia elektropotrebleniia trolleibusa s tiahovym chastotno-rehuliruiemym asynkhronnym dvigatelem i superkondensatornym nakopitelem heneriruiemoi enerhii [Optimization of trolley bus power consumption with traction frequency-regulated induction motor and supercapacitor storage of generated energy]. *Elektromekhanichni i erhozberihaiuchi systemy - Electromechanical and energy saving systems*, Issue 1 (45), pp. 8–24. doi: 10.30929 / 2072-2052.2019.1.45.8-24 [in Russian].
23. Maznev A.S., Stepanskai O.A., Shatnev O.I. (2017). Sistemy rekuperatsii enerhii tormozheniia eliektrpodvizhnoho sostava na horodskom transporte Sankt-Peterburha [Braking energy recovery systems for electric rolling stock in mass transit in St. Petersburg]. *Izvestia PGUPS [Bulletin PGUPS]*, Issue. 1, pp. 63–72 [in Russian].
24. Shevlyugin M.V. (2006). Sistiema nakopleniia enerhii na vahone metro dlia avariinoho vyvoda poiezda iz tunnelia. [Energy storage system on a metro car for emergency train withdrawal from the tunnel]. *NTT – Nauka i tehnika transporta [NTT - Science and technology of transport]*, 3, pp. 29–32 [in Russian].
25. Donchenko A.V., Sulym A.A. (2014). Opriedieleniie enerhoemkosti nakopiteliia pri vozniknovenii avariinykh sytuatsii v sistemie enerhoobespecheniia met-ropolytenu [Determination of energy consumption of energy storage in case of emergencies in the metro power supply system]. *Education. Technicheskie nauki - Technical sciences*, Issue 7, pp. 79–83 [in Russian].

Andrii Sulym¹, Pavlo Khozia^{1*}

¹ State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute», 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

MANAGEMENT STRATEGIES FOR ENERGY PROCESSES IN ELECTRIC ROLLING STOCK WITH ON-BOARD ENERGY STORAGE DEVICES

The article deals with the main existing strategies for management strategy of energy exchange processes in the electric rolling stock with onboard capacitive energy storage devices. When considering strategies, it is assumed that the onboard capacitive storage has low power and capacitance. Therefore,

this capacitor storage is not able to accept the full amount of regenerative braking energy of the electric rolling stock. The purpose of the paper is to consider and analyze management strategies for energy exchange processes in the electric rolling stock with onboard capacitive energy storages; to define the advantages and disadvantages of each of the existing strategies and propose a concept for the effective management of energy exchange processes in the electric rolling stock. The block diagram of electric rolling stock with the onboard capacitive energy storage which is used for the analysis of management strategies for energy exchange processes is presented. The modes of operation of electric rolling stock with onboard capacitive energy storages are described. Five main strategies for management of energy exchange processes on the electric rolling stock with onboard capacitive energy storages are determined. The advantages and disadvantages of each strategy are set out taking into account the given conditions (characteristics of the electric rolling stock, conditions of the rolling stock motion, oscillograph charts, etc.). The general advantages and shortcomings of each strategy are defined, which allowed to propose the concept of creating an adaptive strategy for managing energy exchange processes in electric rolling stock with onboard capacitive energy storages. The main concept of this management strategy is to implement efficient energy exchange between the traction equipment, the onboard capacitive energy storage, the overhead contact system, both in normal and emergency modes of traction power supply, taking into account the dynamics of energy exchange processes in the overhead contact system, which will generally allow safety and energy efficiency of the transportation process. The obtained research results will contribute to the development and implementation of effective strategies for managing energy exchange processes in the electric rolling stock.

Keywords: *onboard capacitive energy storage, electric rolling stock, management, energy processes.*

Микола Радкевич¹, Світлана Сапронова², Надія Брайковська³, Віктор Ткаченко⁴

¹ Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9598-5022>

² Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

³ Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

⁴ 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: doc.sapronova@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Існуюча методика технічного діагностування пасажирських вагонів не дає можливості повною мірою оцінити ймовірність продовження терміну служби вагона, тому як не враховує особливостей пошкодження елементів конструкції у період експлуатації. В статті розглянуто послідовність дослідження напружень в елементах рами кузова пасажирського вагону побудови КВЗ на основі типових випробувань. Завданням дослідження є визначення послідовності розрахунку напружень в елементах рами кузова пасажирського вагону побудови КВЗ (Крюківського вагонобудівного заводу) із строком служби, що перетнув 41 рік від дати виготовлення для оцінки показників міцності та опору втомі методами технічного діагностування та типових випробувань. Зроблено висновок про те, що стан несучих металевих конструкцій вагонів після тривалої експлуатації не наближається до граничного. Залишковий ресурс встановлювався по одному з мінімальних розрахункових значень. Якщо за результатами розрахунків виявляється, що ресурс вичерпаний, то залишковий термін служби визначається за результатами стендових випробувань на втому. Отримані практичні та теоретичні результати дають змогу продовжити термін служби вагонів понад встановлений заводом-виробником.

Ключові слова: пасажирський вагон, діагностування, термін служби, напруження, момент інерції.

Вступ. У зв'язку зі скороченням інвентарного парку пасажирських вагонів після досягнення нормативного терміну служби, закупівлею в недостатній кількості нових вагонів, був викликаний дефіцит парку пасажирських вагонів. Комплекс робіт з продовження терміну служби передбачений методикою технічного діагностування пасажирських вагонів [1], що виступили призначений термін, та нормативними документами. Але існуюча методика не враховує деяких особливостей пошкодження елементів конструкції у період експлуатації. У таких випадках звичайні засоби технічного діагностування згідно з [1] не дають змогу повною мірою оцінити ймовірність продовження терміну служби вагона. Граничний термін експлуатації пасажирських вагонів та візків (41 рік з дати побудови), встановлений відповідними розпорядчими документами АТ «Українська залізниця», є необґрунтованим.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Продовження терміну служби конкретного пасажирського вагона можна вважати повністю обґрунтованим лише у тому випадку, коли обґрунтованим є визначений за результатами науково-експериментальних досліджень та затверджений відповідними розпорядчими документами Укрзалізниці граничний термін експлуатації для вагонів даного типу. Зазначені науково-експериментальні дослідження для кожного типу кузова

вагона та візка, що знаходяться в експлуатації і граничний термін якого потрібно визначити, повинні складатися з наступних етапів: аналіз пошкоджень механічного та корозійного характеру з виявленням найбільш характерних для даного типу кузовів або візків за результатами обстеження вагонів, що виступили призначений термін, за останні 5 років; ресурсні випробування зразків (не менше трьох) металоконструкції кузова, рами та надресорної балки візка до початку руйнування основних несучих елементів; аналіз та оцінка результатів досліджень з встановленням граничного терміну експлуатації кожного типу кузова вагона та візка [13].

В роботах [12, 14] для оцінки ударостійкості за допомогою методів скінченних елементів моделюється зіткнення пасажирського вагона з твердою стіною. У аналізі використовується повнорозмірна детальна модель пасажирського вагону. Для підтвердження результатів моделювання, проводяться порівняння з експериментальними вимірюваннями перед проведенням аналізу зіткнення пасажирського вагона. В результаті моделювання дослідники отримують конструкцію пасажирського вагону з кращими властивостями ударостійкості. В роботах [5, 6, 7] досліджувались проблеми та особливості технічного діагностування пасажирських вагонів. А в [8, 9], виконувались числові розрахунки на базі скінченно-елементної моделі з оцінкою міцності по I та III розрахункових режимах. Далі з урахуванням попередніх результатів виконувались розрахунки втомної пошкодженості елементів конструкції для оцінки залишкового терміну служби. Крім того, в [8] були виконані розрахунки для нових вагонів і вагонів з мінімальними товщинами елементів (внаслідок корозії) та розрахунковим шляхом був встановлений суттєвий вплив механічних або зварних пошкоджень (підрізів), залежно від розмірів останніх, на термін служби вагонів. Обґрунтування необхідності уточнення терміну продовження корисної експлуатації пасажирських вагонів розглядалися як в Україні так і в закордонних публікаціях [2, 7, 14]. В більшості перерахованих наукових публікаціях досліджується збільшення строку експлуатації різних типів пасажирських вагонів шляхом удосконалення їх конструктивних властивостей [12].

Дослідження залишкового ресурсу та продовження термінів служби пасажирських вагонів в Укрзалізниці проводиться філією «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» (НДКП) публічного акціонерного товариства «Українська залізниця» та Українським науково-дослідним інститутом вагонобудування (УкрНДВ) з розробкою нових методик його продовження та діагностування [9].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є визначення напружень в елементах рами кузова некупеїного пасажирського вагона побудови КВЗ із строком служби, що перетнув 41 рік від дати виготовлення. Завданням дослідження є визначення послідовності розрахунку напружень в елементах рами кузова пасажирського вагону для оцінки показників міцності та опору втомі методами технічного діагностування та типових випробувань.

Матеріали та методи дослідження. Найбільш поширеними вагонами, які використовуються в пасажирських перевезеннях є вагони відкритого типу побудови КВЗ (рис. 1).

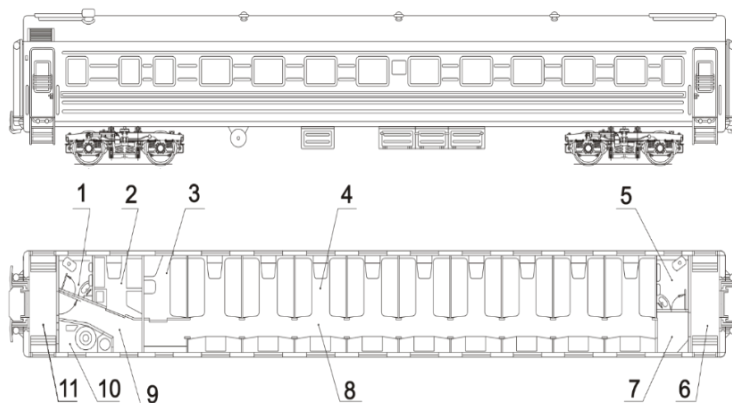


Рис. 1. Пасажирський некупеїний вагон:

1, 5 – туалетні відділення; 2 – службове приміщення; 3 – купе для провідників; 4 – дев'ять шестимісних пасажирських відділень; 6, 11 – два тамбури; 7, 9 – два малі коридори; 8 – коридор вздовж вагона

Рама складається з хребтової балки, що проходить по всій довжині кузова, двох шворневих, трьох поперечних і двох кінцевих балок. Хребтова балка складається з трьох частин: середня полегшена зроблена з швелера №30 (ГОСТ 8240-72), а кінцеві посилені - з швелера № 30 В-1 (ГОСТ 5267-63). Стики частин хребтової балки розташовані між шворневою і встановленими поблизу них поперечними балками. Стики косі і виконані в різних поперечних площинах рами. Шворневі балки зварені з вертикальних стінок, перекритих верхніми і нижніми листами товщиною 10 мм. Спільно вони утворюють закрите коробчатий змінний перетин. Всі поперечні балки штамповані з листа товщиною 6 мм. Для кінцевих балок застосований швелер, частини якого знизу і зверху підсилюють листами, підкріплені косинцями і ребрами жорсткості. Настил підлоги покладений над рамою і приварений до неї електродуговим зварюванням. Настил включає три металевих листа, один з яких, має товщину 2 мм і для збільшення жорсткості має поздовжні гофри. Кінцеві листи гладкі, їх товщина 3 мм. Бічними обв'язками рами служать гарячекатаний зет-подібний профіль (100x75x75x6,5 мм) [9-11].

В науковому дослідженні [3] виконувалось визначення залишкового ресурсу спеціальних вагонів. Визначення залишкового ресурсу методом типових випробувань розглянуто в роботі [4, 5].

Для визначення напружень в елементах рами кузова пасажирського вагона розглянемо розрахунковий переріз кузова (рис. 2). Зведений розрахунок моменту інерції поперечного перерізу пасажирського вагона відобразимо в табл. 1.

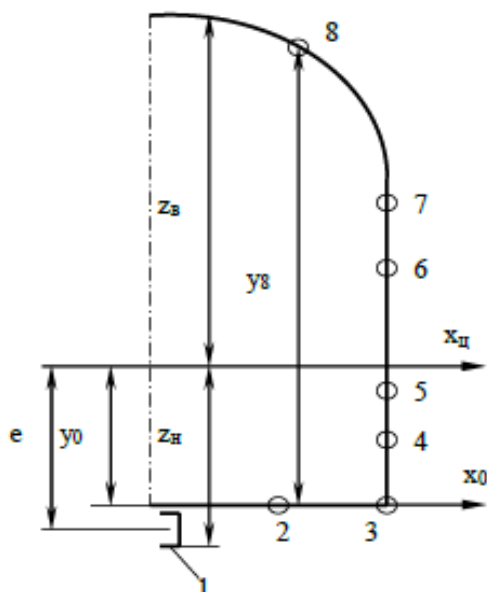


Рис. 2. Розрахунковий переріз пасажирського вагона:

- 1 – хребтова балка, 2 – гофр обшивки пола, нижня обв'язка кузова, 4 – гофр нижньої панелі, 5 – підвіконний пояс, 6 – надвіконний пояс, 7 – гофр верхньої панелі, 8 – гофр даху

Таблиця 1. Розрахунок моменту інерції поперечного перерізу пасажирського вагона

№№	F_i	J_i	y_i	a_i	S_i	J_2	J_3
1,00	87,28	12948,89	-14,11	76,46	-1231,83	510218,04	523166,93
2,00	3,90	6,00	0,00	62,34	0,00	15158,45	15164,45
3,00	3,90	6,00	0,00	62,34	0,00	15158,45	15164,45
4,00	3,90	6,00	0,00	62,34	0,00	15158,45	15164,45
5,00	3,90	6,00	0,00	62,34	0,00	15158,45	15164,45
6,00	3,90	6,00	0,00	62,34	0,00	15158,45	15164,45
7,00	3,90	6,00	0,00	62,34	0,00	15158,45	15164,45
8,00	19,80	331,00	4,00	58,34	79,20	67399,78	67730,78
9,00	3,90	58,60	26,00	36,34	101,40	5151,47	5210,07

Закінчення таблиці 1

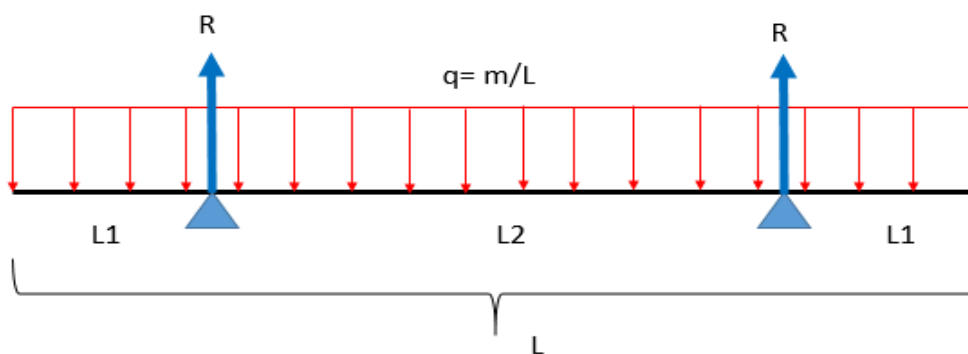
10,00	3,90	58,60	46,00	16,34	179,40	1041,80	1100,40
11,00	3,90	58,60	64,00	1,66	249,60	10,69	69,29
12,00	3,90	58,60	80,00	17,66	312,00	1215,76	1274,36
13,00	3,90	58,60	94,00	31,66	366,60	3908,18	3966,78
14,00	10,98	91,80	108,00	45,66	1185,84	22887,43	22979,23
15,00	13,02	167,00	210,00	147,66	2734,20	283865,65	284032,65
16,00	3,90	6,00	230,00	167,66	897,00	109623,21	109629,21
17,00	3,90	6,00	320,00	257,66	1248,00	258907,68	258913,68
18,00	3,90	6,00	324,00	261,66	1263,60	267008,94	267014,94
19,00	3,90	6,00	328,00	265,66	1279,20	275235,01	275241,01
20,00	3,90	6,00	330,00	267,66	1287,00	279394,84	279400,84
21,00	3,90	6,00	332,00	269,66	1294,80	283585,88	283591,88
22,00	3,90	6,00	334,00	271,66	1302,60	287808,11	287814,11

В табл. 1: F_i – площа поперечного перетину елемента; J_i – власний момент інерції елемента; y_i – це координати центрів ваги елементів перерізу по осі y ; S_i – момент інерції по всій площі поперечного перерізу; a_i – відстань до осі x_c (центру мас); J_2 – додатковий момент інерції; J_3 – повний момент інерції; J_4 – повний момент інерції хребтової балки. Сумарні результати надані в табл. 2.

Таблиця 2. Сумарні значення

F	S	Y	J1	J2	J3	J4
201,2 8	12548,61 2	62,3440580 3	13909,6949 8	2748213,15 4	2762122,84 9	5524245,69

Розрахункова схема кузова зводиться до розрахунку балки на двох опорах (рис. 3):



Найбільші напруження виникнуть в перетині А-А або Б-Б (рис. 4).

Реакції розрахункової схеми:

$$R = \frac{q(L2+2L1)}{2} \quad (1)$$

Момент в перетині А-А

$$M_{A-A} = -\frac{qL1^2}{2}. \quad (2)$$

Момент в перетині Б-Б

$$M_{B-B} = -\frac{q(L2^2-4L1^2)}{8}. \quad (3)$$

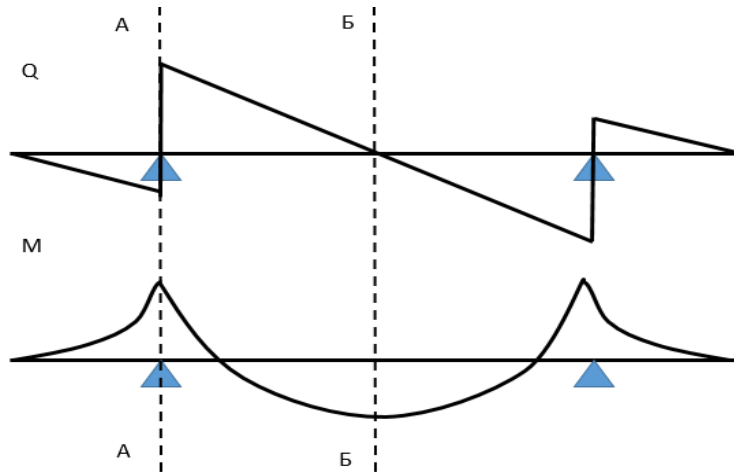


Рис. 4. Епюри перетинаючих сил і моментів

Для виконання розрахунків, використаємо параметри пасажирського вагона (табл. 3).

Таблиця 3. Параметри пасажирського вагона

Маса візка, кг	Маса вагона бруто, кг	База вагона, м	Довжина вагона, м	Розподілене навантаження, Н	Реакція сил, Н	Тара вагона, кг	Статичний прогин, мм	Момент Б-Б, Нм	Момент А-А, Нм
7200	63800	19	25	19385	242307	58800	209	-787498	87230

Оцінимо напруження в хребтовій балці і нижній обв'язці кузова в перерізі Б-Б. Навантаження по цих балках розподіляється пропорційно їх жорсткостям [15].

Таким чином:

J_i всього кузова = 5524245,69 – сприймає 100% навантаження;

J_4 хребтової балки = $J_3 \cdot 2 = 523166,93 \cdot 2 = 1046334$ – сприймає 18,9% всього навантаження;

J_3 однієї нижньої обв'язки = 67730,78 – сприймає 1,2% всього навантаження.

Відповідно згинальні моменти будуть рівні:

для хребтової балки, $M_{xp} = 149158$ Нм;

для нижньої бічної обв'язки, $M_{нбо} = 9655$ Нм.

Напруження в елементах

$$\sigma = \frac{M}{J_i} \cdot a_i \quad (4)$$

де a_i – відстань до осі x_c (центру мас).

Максимальні напруження в хребтовій балці:

$$\sigma_{xp} = \frac{M_{xp}}{J_4} \cdot a_i.$$

Максимальні напруження в нижній боковій обв'язці:

$$\sigma_{\text{нбо}} = \frac{M_{\text{нбо}}}{J_3} \cdot a_i.$$

Максимальні напруження в хребтовій балці та максимальні напруження в нижній боковій обв'язці, які виникають від власних сил тягіння, сил що виникають під час руху вагона, сили взаємодії між вагонами, вагоном та локомотивом, гальмуванням, співударом, дають змогу в подальшому проводити розрахунки показників міцності та опору втомі для визначення залишкового ресурсу вагону.

Висновки. За результатами проведених досліджень, в елементах рами кузова пасажирського вагона показники міцності вагону та опору втомі, відповідають вимогам подальшої експлуатації. Таким чином, отримані практичні та теоретичні результати дають можливість продовжувати строк служби пасажирських вагонів побудови КВЗ понад 41 рік від побудови з виконанням періодичного технічного діагностування несучих конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методика технічного діагностування пасажирських вагонів, що виступили призначений термін, з метою його продовження: ЦЛ-0070. Київ: Нескінчене джерело, 2008. 60 с.
2. 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 Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*. Київ: ДУІТ, 2020. Вип.35. С.14-23. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-2>.
3. Радкевич, М.М., Сапронова, С.Ю., Ткаченко, В.П. Дослідження залишкового ресурсу спеціальних вагонів. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*, 2021. Вип. 37. С. 49-57. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-6>.
4. Радкевич, М.М., Сапронова, С.Ю., Ткаченко, В.П. Дослідження залишкового ресурсу та встановлення граничного терміну експлуатації некупейних пасажирських вагонів побудови КВЗ. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. Вип.36. С. 54-62. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-6>.
5. Мямлин, С.В., Рейдемейстер, О.Г., Пулария А.Л. Диагностирование подвижного состава с целью продления срока службы. *Матеріали LXVI Міжнародної науково-практичної конференції: Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта (11.05–12.05. 2006 г.)*, ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2006. С. 108–109.
6. Мямлин, С.В., Пулария А.Л. Проблемы технического диагностирования пассажирских вагонов. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції: Розвиток наукової школи транспортної механіки. ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2013. С. 65–67.
7. Шикун, О.А., Рейдемейстер, О.Г., Анофрієв, В.Г. Дослідження граничного стану пасажирських вагонів. *Вагонный парк*. 2012. № 12. С. 4–6.
8. Мямлин, С.В., Горобець, В.Л. Научные методы оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава. *Вісник сертифікації залізничного транспорту*. Дніпропетровськ, 2011. № 8. С. 12–17.
9. НДКТИ/НВЦ УІ 005-19 «Дослідження залишкового ресурсу та встановлення граничного терміну експлуатації некупейних пасажирських вагонів побудови КВЗ». Київ: НДКТИ, 2020.
10. ДСТУ (Державний Стандарт України) 7774:2015 Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахування та проектування механічної частини вагонів. Державний Український науково-дослідний інститут вагонобудування (УкрНДІВ), 22.06.2015.
11. Радкевич, М.М., Сапронова, С.Ю., Ткаченко, В.П. Аналіз технічного діагностування пасажирських вагонів з вичерпаним терміном служби. *Збірник наукових праць науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», 14-16 листопада 2019р.* Северодонецьк-Київ: Вид-во СЧУ ім.В.Даля, 2019.
12. Cengiz Baykasoğlu, Emin Sünbuloğlu, Sureyya E. Bozdağ, Fatih Aruk, Tuncer Toprak & Ata Mugan (2011). Railroad passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*. Volume 16, Issue 3, 319-329. <https://doi.org/10.1080/13588265.2011.566475>
13. Политехнический словарь: редкол.: А.Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ПИО Большая Российская Энциклопедия, 2000. 656 с.
14. Baykasoğlu, C., Sunbuloglu, E., Bozdag, E. [et al.]. (2012). Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *Intern. Iron & Steel Symposium (02.04–04.04.2012). Karabük University*. Istanbul. 19. 579-586.

15. Програма і методика проведення ударних ресурсних випробувань пасажирських вагонів, що виступили призначений термін служби: узгодж. ЦІ, ЦРБ, ЦТехУкрзалізниці та УкрНДІВ: ПМ 01-13/ВЛІВ. Дн-ськ, 2013. 16 с.

16. Єжов, Ю.В., Павленко, Ю.С., Войтенко О.І. Удосконалення діючої системи продовження терміну експлуатації пасажирських вагонів. *Рейковий рухомий склад*, 2018. Вип. 17. С. 46-50. URL.: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/7.pdf>.

REFERENCES

1. Metodyka tekhnichnoho diahnostuvannya pasazhyr'skykh vahoniv, shcho vysluzhyly pryznachenyy termin, z metoyu yoho prodovzhennya: TSL-0070. [Methods of technical diagnostics of passenger cars that have served the appointed period, in order to extend it: CL-0070]. Kyiv: Neskinchene dzherelo, [Kyiv: Infinite Source], 2008. 60. [in Ukrainian].

2. Koshel, O.O., Saponova, S.Yu., Bulich, D.I. & Tkachenko, V.P. (2020). Vyznachennya zalyshkovoho resursu nesuchykh metalevykh konstruktsiy vahoniv khoper-dozatoriv ta dumpkariv (samoskydiv) na osnovi rezul'tativ tekhnichnoho diahnostuvannya ta typovykh vyprobuvan'. [Determination of the residual life of load-bearing metal structures of hopper-dumping cars and dump trucks (dump trucks) based on the results of technical diagnostics and standard tests.] *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi»*. [Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series «Transport systems and technologies»]. Kyiv: DUIT, 35. 14-23. [in Ukrainian]. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-2>.

3. Radkevich, M.M., Saponova, S.Yu. & Tkachenko V.P. (2021). Doslidzhennya zalyshkovoho resursu spetsial'nykh zaliznychnykh vahoniv. [Study of the residual life of special railway cars]. *Zbirnyk naukovykh prats' DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi»*. [Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series «Transport systems and technologies»]. Kyiv: DUIT, 37. 49-57. [in Ukrainian]. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-6>.

4. Radkevich, M.M., Saponova, S.Yu. & Tkachenko V.P. (2020). Doslidzhennya zalyshkovoho resursu ta vstanovlennya hranychnoho terminu ekspluatatsiyi nekupeynykh pasazhyr'skykh vahoniv pobudovy KVZ. [Research of residual resource and establishment of the term of operation of non-compartment passenger cars of construction of KCBP]. [Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series «Transport systems and technologies»]. *Zbirnyk naukovykh prats' DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi»*. [Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. Series «Transport systems and technologies»]. Kyiv: DUIT, 35. 54-62. [in Ukrainian]. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-6>.

5. Myamlin, S.V., Anofriev, V.G. & Pularia, A.L. (2006). Diagnostirovaniye podvizhnogo sostava s tsel'yu prodleniya sroka sluzhby. Materialy LXVI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi: Problemy y perspektyvy razvytyya zheleznodorozhnoho transporta (11.05–12.05. 2006 r.), DNUZT im. akademika V. Lazaryana. [Diagnosis of rolling stock for the purpose of prolonging the service life]. Problems and Prospects for the Development of Railways transp.: thesis. LXVI International scientific-practical conf. (11.05–12.05 2006), Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnepropetrovsk, 108–109. [in Russian].

6. Myamlyn, S.V. & Pularyya A.L. (2013). Problemy tekhnicheskoho dyahnostyrovannya passazhyr'skykh vahonov. [Problems of technical diagnostics of passenger railway cars] Materialy mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi: Rozvytok naukovoyi shkoly transportnoyi mekhpnyky. DNUZT im. akademika V. Lazaryana. [Proceedings of the international scientific and technical conference: Development of the scientific school of transport mechanics. DNUZT them. Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, 65–67. [in Russian].

7. Shygunov, O.A., Reydemeyster, O.H. & Anofriyev, V.H. (2012). Doslidzhennya hranychnoho stanu pasazhyr'skykh vahoniv. [Research of a limiting condition of passenger cars]. *Vahonnyy park. [Wagon fleet]*, 12. 4–6. [in Ukrainian].

8. Myamlyn, S.V. & Horobets, V.L. (2011). Nauchnye metody otsenky resursa nesushchykh konstruktsiyi podvizhnogo sostava. [Scientific methods for estimating the service life of bearing structures of rolling stock]. *Visnyk sertyfikatsiyi zaliznychnoho transportu. [Bulletin of railway transport certification]*. Dnipropetrovsk, 8. 12–17. [in Russian].

9. NDKTI/NVTS UI 005-19 «Doslidzhennya zalyshkovoho resursu ta vstanovlennya hranychnoho terminu ekspluatatsiyi nekupeynykh pasazhyr'skykh vahoniv pobudovy KVZ».[NDCTI/SIC UI 005-19 «Research of residual resource and establishment of the limit life of non-purchaser passenger cars of construction of KCBP»]. NDCTI, Kyiv, 2020. [in Ukrainian].

10. DSTU (Derzhavnyy Standart Ukrayiny) 7774:2015 Vahony pasazhyr'ski mahistral'ni lokomotyvnoyi tyahy. Zahal'notekhnichni normy dlya rozrakhuvannya ta proektuvannya mekhanichnoyi chastyny vahoniv. [DSTU 7774:2015 Carriages passenger main locomotive traction. General technical norms for the calculated and design of the mechanical part of the wagons]. Derzhavnyy Ukrayins'kyy naukovo-doslidnyy instytut vahonobuduvannya (UkrNDIV) [State Ukrainian Research Institute of Carriage Construction (UkrNDIV)], 22.06.2015. [in Ukrainian].

11. Radkevych, M.M., Saponova, S.YU. & Tkachenko, V.P. (2019). Analiz tekhnichnoho diahnostuvannya pasazhyr'skykh vahoniv z vycherpanym terminom sluzhby. [Analysis of technical diagnostics of passenger railway cars with exhausted service life.]. *Zbirnyk naukovykh prats' naukovo-praktychnoyi konferentsiyi zdobuvachiv vyshchoyi osvity ta molodykh vchenykh «Lohistychno upravlinnya ta bezpeka rukhu na transporti»*, 14-16 lystopada 2019r. [Collection of scientific works of the scientific-practical conference of applicants for higher education and young scientists "Logistics management and traffic safety", November 14-16, 2019]. Syevyerodons'k-Kyiv: ENU im.V.Dalya, 2019. [in Ukrainian].

12. Cengiz Baykasoglu, Emin Sunbuloglu, Sureyya E. Bozdağ, Fatih Aruk, Tuncer Toprak & Ata Mugan (2011). Railroad passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*. Volume 16, Issue 3, 319-329. <https://doi.org/10.1080/13588265.2011.566475>

13. Yezhov, YU.V., Pavlenko, Yu.S. & Voytenko O.I. (2018). Udoskonalennya diyuchoyi systemy prodovzhennya terminu ekspluatatsiyi pasazhyrs'kykh vahoniv. [Improving the current system of extending the service life of passenger railway cars]. Reykovyy rukhomyy sklad [Rail rolling stock], 2018. 17. 46-50. URL.: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/7.pdf>.

14. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., Bozdog, E. [et al.]. (2012). Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *Intern. Iron & Steel Symposium (02.04–04.04.2012)*. Karabük University. Istanbul. 19. 579-586.

15. Prohrama i metodyka provedennya udarnykh resursnykh vyprobuvan' pasazhyrs'kykh vahoniv, shcho vysluzhyly pryznachenny termin sluzhby: uz·hodzh. TSL, TSRB, TSTekhUkrzaliznytsi ta UkrNDIV: PM 01-13/VLV. [The program and a technique of carrying out shock resource tests of the passenger cars which have served the appointed service life: coordination. CL, CRH, TTechUkrzaliznytsia and UkrNDIV: PM 01-13 / VLV]. Dnipropetrovsk, 2013. 16 p.

16. Yezhov, Yu.V., Pavlenko, Yu.S., Voitenko O.I. (2018). Udoskonalennya diyuchoyi systemy prodovzhennya terminu ekspluatatsiyi pasazhyrs'kykh vahoniv. [Improving the current system of extending the service life of passenger cars]. Reykovyy rukhomyy sklad. [Rail rolling stock]. 17. 46-50. [in Ukrainian]. URL.: <https://ukrndiv.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/7.pdf>.

Mykola Radkevych¹, Svitlana Sapronova¹, Nadiya Braikovska¹, Viktor Tkachenko²

¹Department Railway carriage and Railway carriage property, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

²Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

IMPROVEMENT OF METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSIS OF PASSENGER RAILWAY CARS

Extension of the service life of a particular passenger railway car can be considered fully justified only if it is justified by the results of scientific and experimental research and approved by the relevant administrative documents of Ukrzaliznytsia the service life limit for wagons of this type. The existing method of technical diagnostics of passenger railway cars does not allow to fully assess the probability of extension of the service life of the car, because it does not take into account the peculiarities of damage to structural elements during operation. In the article the sequence of research of stresses in elements of a frame of a body of the passenger car of construction of KVN on the basis of standard tests is considered. The task of the study is to determine the sequence of calculation of stresses in the frame elements of the passenger car body of KCP (Kryukiv Carriage Plant) with a service life exceeding 41 years from the date of manufacture to assess strength and fatigue resistance by technical diagnostics and standard tests. It is concluded that the condition of the load-bearing metal structures of cars after long operation does not approach the limit. The residual resource was set at one of the minimum calculated values. If the results of calculations show that the resource is exhausted, the residual service life is determined by the results of bench tests for fatigue. The obtained practical and theoretical results make it possible to extend the service life of cars beyond that set by the manufacturer.

Keywords: passenger railway car, diagnostics, service life, tension, moment of inertia

УДК 629.3.027.2

Агарков Іван Валентинович^{1*}

¹ Аспірант, Кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17 м. Харків, 61002, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-8766>

*Автор, відповідальний за листування: ivan.aharkov@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ТРОЛЕЙБУСА З ПІДСИЛЮВАЧЕМ РУЛЬОВОГО ПРИВОДУ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ

Проведено аналіз підсилювачів рульового приводу, які використовуються на сучасному рухомому складі. Визначено їх основні недоліки. Враховуючи вимоги щодо рульового керування троллейбусів запропоновано рішення його підвищення ефективності.

Грунтуючись на розробленій математичній моделі та функціональних схемах системи рульового керування троллейбусу з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором, що котиться, створено імітаційну модель рульового керування троллейбуса з використанням пакету Matlab Simulink. Особливістю імітаційної моделі є врахування масогабаритних характеристик рухомого складу, параметрів підвіски керованої осі, впливу дорожнього покриття та швидкості руху троллейбуса, зміни параметрів магнітної системи ДПК під час роботи. Розраховано параметри двигуна з ротором, що котиться, який пропонується до використання як електронпідсилювач рульового приводу троллейбуса ЛАЗ Е183Д1.

Проведено розрахунок магнітної системи двигуна методом кінцевих елементів з подальшою апроксимацією отриманих результатів. За допомогою розробленої імітаційної моделі проведено моделювання роботи системи рульового керування троллейбуса з підсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором, що котиться при повороті керованих коліс на місці з максимально-допустимим навантаженням на керовану вісь. Отримано часові діаграми перехідних процесів у системі рульового керування троллейбуса та проведено їх обробку та аналіз.

Ключові слова: рульове керування, електронпідсилювач, імітаційне моделювання, троллейбус, двигун з ротором, що котиться, магніторушійна сила.

Вступ. Міський електричний транспорт відіграє важливу роль у житті сучасних мегаполісів. Необхідність забезпечення населення мобільністю в рамках швидкого розширення території міст та приміських зон, а також зростання норм щодо екологічності та енергоефективності обумовлюють підвищення вимог як до рухомого складу в цілому, так і його окремих вузлів та агрегатів.

Наукові дослідження в Україні та світі спрямовані на розробку та впровадження технологій підвищення ресурсозбереження, для ефективної модернізації елементів і систем електричного транспорту, сьогодні є найбільш актуальними. Це сприяє підвищенню надійності, екологічності, енергоефективності та подовженню ресурсу роботи рухомого складу. Результатами такого підходу є зменшення енергетичних і технологічних витрат на виробництво рухомого складу, експлуатацію і ремонт його складових елементів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Одним із науково-технічних напрямків є удосконалення системи рульового керування троллейбуса. Від його конструкції залежать компонувальні рішення та експлуатаційні властивості рухомого складу: стійкість і керованість коліс під час руху, оптимальне розміщення обладнання у підкузовному просторі троллейбуса, висока ремонтпридатність, енергоефективність, безпека та комфортабельність руху тощо.

На сучасних тролейбусах використовуються підсилювачі рульового приводу (РП) гідравлічного типу. Проведений аналіз [1] виявив їх основні недоліки:

неможливість тримати рульове колесо в крайньому положенні більше п'яти секунд, інакше відбудеться перегрів масла в системі, що призводить до її поломки;

необхідність частішого обслуговування: заміна рідини, слідкування за рівнем масла в системі, перевірка стану приводів, цілісність шлангів і насоса підсилювача;

робота насоса гідропідсилювача безпосередньо пов'язана з двигуном. Під час роботи таких елементів насос постійно відбирає у мотора частину потужності, яка при прямолінійному русі (гідропідсилювач не задіяний) витрачається даремно;

неможливість налаштувати режими роботи механізму залежно від умов руху.

З урахуванням недоліків існуючих підсилювачів РП, а також вимог щодо рульового керування тролейбусів, запропоновано рішення підвищення енергоефективності та ресурсозбереження підсилювачів РП тролейбусів за рахунок використання електропідсилювача керма на базі електродвигуна з ротором, що котиться (ДРК).

Мета роботи. Дослідження роботи підсилювача РП тролейбуса на базі електродвигуна з ротором, що котиться, у системі рульового керування тролейбуса ЛАЗ Е183D1.

Задачі дослідження:

створити імітаційну модель системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК;

провести розрахунок ДРК для системи рульового керування тролейбуса, визначити його електромагнітні та механічні характеристики;

провести дослідження роботи системи рульового керування тролейбуса з електропідсилювачем РП на базі ДРК за різних умов повороту рульового колеса шляхом цифрового моделювання.

Реалізація імітаційної моделі системи рульового керування тролейбуса

Розробка та модернізація нових елементів конструкції рухомого складу вимагає глибокого вивчення динамічних процесів. Вони відбуваються в електричних та механічних вузлах і системах та мають вплив на поведінку один одного.

Дослідження, які пов'язані з натурними експериментами, збільшують фінансові витрати, терміни розробки, а інколи не дозволяють провести всебічний аналіз процесів системи, що досліджується. В таких випадках доцільним є використання методів імітаційного моделювання. Особливо це актуально під час дослідження параметрів нетрадиційних елементів конструкції рухомого складу. Такі методи використовуються у роботі для дослідження параметрів двигуна з ротором, що котиться, у системі рульового керування тролейбуса. Як середовище для створення імітаційної моделі обрано програмне забезпечення блочного візуально-орієнтованого моделювання Simulink, який разом з математичним пакетом Matlab забезпечує широкий набір можливостей для дослідження та аналізу системи.

Конструкція системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК має у своєму складі елементи, які функціонально незалежні один від одного. Структурна схема такої системи зображена на рис. 1.

Структурна схема (рис.1) характеризує взаємодію елементів системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК. Система керування СК отримує живлення від джерела напруги $U_{дж}$. Проводячи опитування датчиків швидкості руху транспортного засобу $v_{ТЗ}$, наповненості салону $G_{ТЗ}$, кутової швидкості обертання ДРК $\omega_{ДРК}$, струмів фаз ДРК $i_{ДРК}$, моменту прикладеного до рульового колеса $M_{РК}$, частоти обертання рульового колеса $\omega_{РК}$, кута повороту керованих коліс $\theta_{КК}$ система керування СК у режимі реального часу формує керуючі імпульси напругу $U_{СК}$ для кожного полюсу ДРК за заданим законом керування. Електричний двигун ДРК механічно пов'язаний з рульовим приводом РП та рульовим механізмом РМ. Через передаточне відношення рульового механізму РМ частота обертання рульового колеса та момент, що прикладений водієм передаються на вихідний вал ДРК. Сума моментів ДРК та РМ утворюють результуючий момент $M_{ДРК+РМ}$, який передається на РП. Долаючи момент опору $M_{оп}$, відбувається поворот керованих коліс КК. Основний вплив на момент опору $M_{оп}$

керованих коліс КК мають навантаження на керовану вісь тролейбуса G_{KB} (для більшості тролейбусів $G_{KB} = 0,36 G_{T3}$ [2]), а також лінійна швидкість руху транспортного засобу v_{T3} .

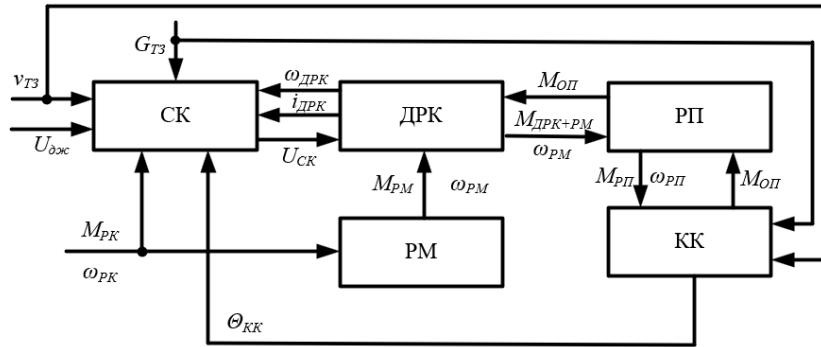


Рис. 1. Структурна схема системи рульового керування тролейбуса з електропідсилювачем рульового приводу на базі двигуна з ротором, що котиться:

СК – системи керування електричним підсилювачем; ДРК – двигун з ротором, що котиться;
РП – рульовий привід; РМ – рульовий механізм; КК – керовані колеса

Запропонована у роботі система рульового керування складається з електричної частини представленої системою керування з силовим перетворювачем, електромеханічного перетворювача – ДРК, а також механічної частини – рульового приводу РП та рульового механізму РМ.

Основою імітаційної моделі є математична модель системи рульового керування з підсилювачем РП на базі ДРК. Математична модель складається з системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які характеризують електромеханічні перетворення ДРК, його механічну взаємодію з елементами РМ та РП, а також вплив моменту опору повороту керованих коліс [3-7].

Математична модель, яка характеризує електромеханічні перетворення ДРК складається з такої системи рівнянь [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_n = i_n R_n + \frac{di_n}{dt} \cdot L_{\partial n} + K_{En} \cdot \omega_p \\
 J_p \frac{d\omega_p}{dt} = M_e + M_{\text{сод}} - M_y \\
 J_k \frac{d^2 \Theta_k}{dt^2} = M_y - M_{on} - M_t \operatorname{sgn}\left(\frac{dy_s}{dt}\right) \\
 M_y = c_2 \arcsin\left(\left(\frac{l_s + y_s}{l_r}\right) - \Theta_e\right) \int (\omega_p - \omega_k) dt \\
 L_{\partial n} = L_{(i,\varphi)n} + i_n \cdot \frac{\partial L_{(i,\varphi)n}}{\partial i_n} \\
 K_{En} = \frac{\partial L_{(i,\varphi)n}}{\partial \varphi} \cdot i_n \\
 \sum F = -F_G \sin(\varphi) - F_R + \sum F_y \\
 M_e = \sum F \cdot R_{p.\text{зовн.}} \\
 F_R = \mu_k F_N \\
 F_N = F_Z + F_G \cos(\varphi) + \sum F_x \\
 F_Z = m_R \omega_S^2 e \\
 F_G = m_R g
 \end{array} \right. \quad (1)$$

де u_n – напруга котушки статора, В;

- i_n – струм котушки статора, А;
 φ – геометричний кут повороту, град;
 $\sum F$ – результуюча сила одностороннього магнітного тяжіння, Н;
 J_p – приведений момент інерції ротора, кг·м²;
 ω_c – синхронна швидкість обертання магнітного поля, рад/с;
 ω_k – кутова швидкість повертання керованих коліс, рад/с;
 ω_p – швидкість обертання вихідного валу ротора, рад/с;
 $R_{p.зовн.}$ – зовнішній радіус ротора, м;
 F_R – сила тертя, Н;
 F_G – вага ротора, Н;
 F_N – сила нормальної реакції опорної поверхні, Н;
 e – ексцентриситет, м;
 F_Z – центробіжна сила, Н;
 M_e – електромагнітний момент на валу двигуна, Н·м;
 M_{on} – момент опору, Н·м;
 m_R – маса ротора, кг;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 μ_k – коефіцієнт тертя;
 K_{En} – коефіцієнт протиЕРС;
 $L_{\partial n}$ – диференційна індуктивність, Гн;
 J_k – момент інерції керованих коліс у горизонтальній площині, кг·м²;
 c_z – жорсткість приводу керуючих коліс, Н·м/рад;
 M_t – момент тертя у рульовому приводі, Н·м;
 l_s – довжина штоку, м;
 l_r – відстань від штоку до поворотного важеля колеса, м;
 Θ_s – кут повороту керованого колеса, рад;
 y_s – переміщення штоку, м;
 $M_{вод}$ – момент, який створює водій при обертанні рульового колеса, Н·м;
 M_y – момент пружних сил, Н·м;

Момент опору повороту шини на місці визначається такою системою рівнянь [7-12]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 M_{res} = c_{\omega} \Theta_{wh}, \quad \Theta_{wh} < 5^{\circ} \\
 M_{res} = M_{\mu max} - (M_{\mu max} - c_{\omega} \Theta_{wh}) \left(\frac{\Theta_B - \Theta_{wh}}{\Theta_B - \Theta_A} \right)^2, \quad 5^{\circ} < \Theta_{wh} < 13^{\circ} \\
 M_{res} = M_{\mu max}, \quad \Theta_{wh} > 13^{\circ} \\
 M_{\mu max} = \frac{G_{wh} \cdot \mu}{16ab} \left[\begin{array}{l}
 (a+2y)(b+2l_0) \sqrt{(a+2y)^2 + (b+2l_0)^2} + \\
 + (a-2y)(b+2l_0) \sqrt{(a-2y)^2 + (b+2l_0)^2} + \\
 + (a+2y)(b-2l_0) \sqrt{(a+2y)^2 + (b-2l_0)^2} + \\
 + (a-2y)(b-2l_0) \sqrt{(a-2y)^2 + (b-2l_0)^2}
 \end{array} \right], \\
 M_{res} = c_{\omega} \cdot \frac{(a_{\partial u} + 2 \cdot r_k \cdot tg \beta_u) \cdot \Theta_k}{2 \cdot V}, \quad V > 1 \text{ м/с} \\
 c_{\omega} = k G_{wh} \cdot 10^{-3} \\
 l_0 = l_z - r_{wh} \cdot tg(\alpha_k + \gamma_{k0}) \\
 y = r_{wh} \cdot tg \beta_k
 \end{array} \right. , \quad (2)$$

- де c_{ω} – кутова жорсткість шини, Н·м/град;
 G_{wh} – навантаження на кероване колесо, Н;
 k – визначають у діапазоні 9...11 [9,12];

$M_{\mu max}$ – граничний за зчепленням момент опору повороту шини;
 Θ_A – максимальний кут повороту колеса на лінійній ділянці, $\Theta_A = 5^\circ$;
 Θ_B – мінімальний кут повороту колеса на ділянці з граничним зчепленням, $\Theta_B = 13^\circ$;
 μ – коефіцієнт зчеплення шини з контактною поверхнею;
 a, b – сторони приведенного рівновеликого прямокутника контактної відбитку шини з контактною поверхнею, м;
 V – лінійна швидкість, м/с;
 y – плече стабілізації, м;
 l_o – плече обкатки, м;
 l_z – довжина цапфи, м;
 r_{wh} – радіус керуючого колеса, м;
 α_k – кут поперечного нахилу шворня, рад;
 γ_{k0} – кут розвалу керуючого колеса, рад;
 β_k – кут повздовжнього нахилу шворня, рад.

Додатковий момент опору при повороті керованих коліс, виходячи з аналізу джерел [13-14], складається з моментів, які не мають суттєвого впливу на загальний момент опору або для їх визначення немає однозначних залежностей. На поверхнях з високим коефіцієнтом зчеплення момент опору повороту шини $M_{\mu max}$ досягає до 90% від загального моменту опору [14]. Для спрощення розрахунку приймемо, що значення додаткового моменту опору визначається як:

$$M_{\text{дод}} = 0,15 \cdot M_{\mu max}. \quad (3)$$

Загальний момент опору повороту керованих коліс визначається:

$$M_{\text{он}} = M_{\text{res}} + M_{\text{дод}}. \quad (4)$$

Імітаційна модель базується на функціональних схемах (див. рис. 2) відповідно до системи рівнянь математичної моделі (1) [7].

Спираючись на функціональну схему (рис. 2, а) створено Simulink-модель полюсу ДРК (рис. 3). Вхідними величинами даної моделі є керуючі імпульси напруги живлення системи керування, кутова швидкість обертання ротора ДРК, кут повороту мінімального повітряного зазору відносно полюсу. Важливим елементом моделі є блок розрахунку диференційних потокозчеплення, індуктивності та коефіцієнта проти ЕРС, а також визначення складових магнітної сили полюсу ДРК.

Розрахунок миттєвих значень диференційних потокозчеплення, індуктивності та коефіцієнта проти ЕРС, а також радіальної і тангенціальної складових магнітної сили полюсу ведеться на основі апроксимованих дискретних значень згаданих раніше величин отриманих попереднім моделюванням магнітного поля ДРК методом кінцевих елементів.

Такий підхід пояснюється особливостями конструкції ДРК. Двигун має складну магнітну систему. Магнітна індукція у зазорі двигуна залежить не лише від струму у котушці полюсу, а й від просторового положення ротора відносно статора. Тому для отримання моделі, характер процесів якої максимально наближений до реальних та враховує нелінійну поведінку магнітної системи двигуна необхідно використовувати запропонований підхід [15-18].

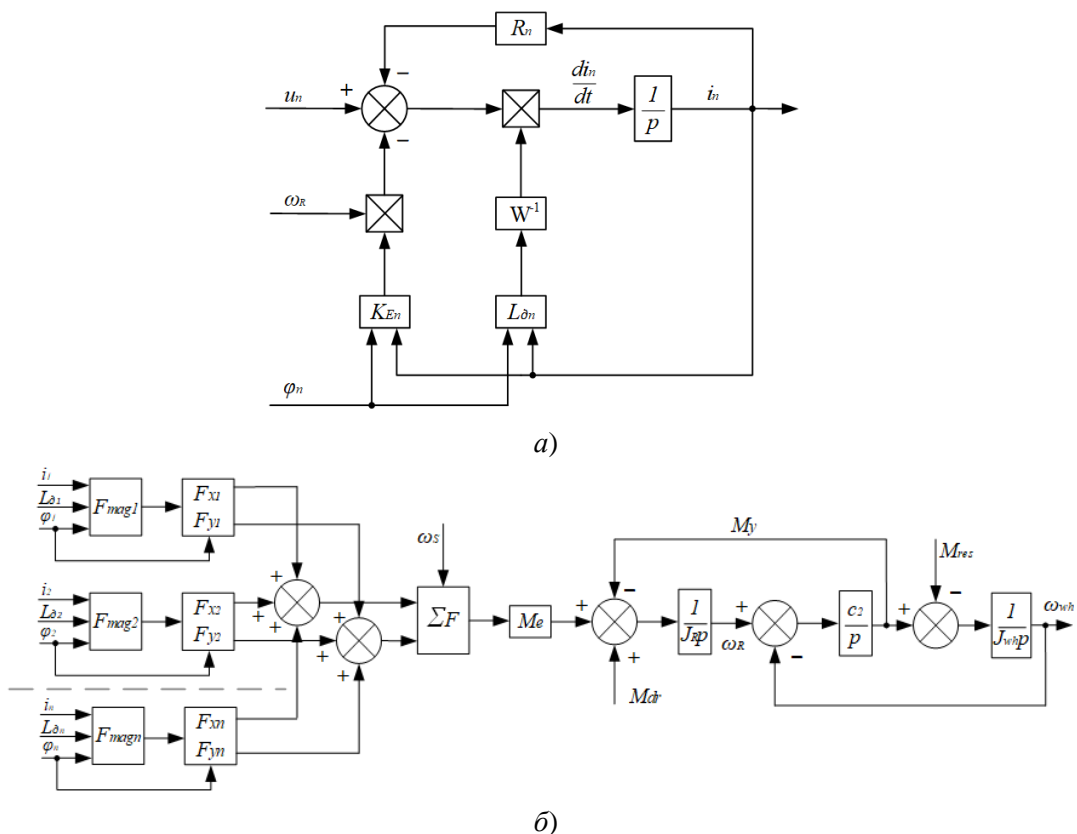


Рис. 2. Функціональні схеми електричної та механічної підсистеми рульового керування тролейбуса на базі ДРК [7]:
 а – функціональна схема полюсу ДРК; б – функціональна схема механічної підсистеми рульового керування на базі ДРК

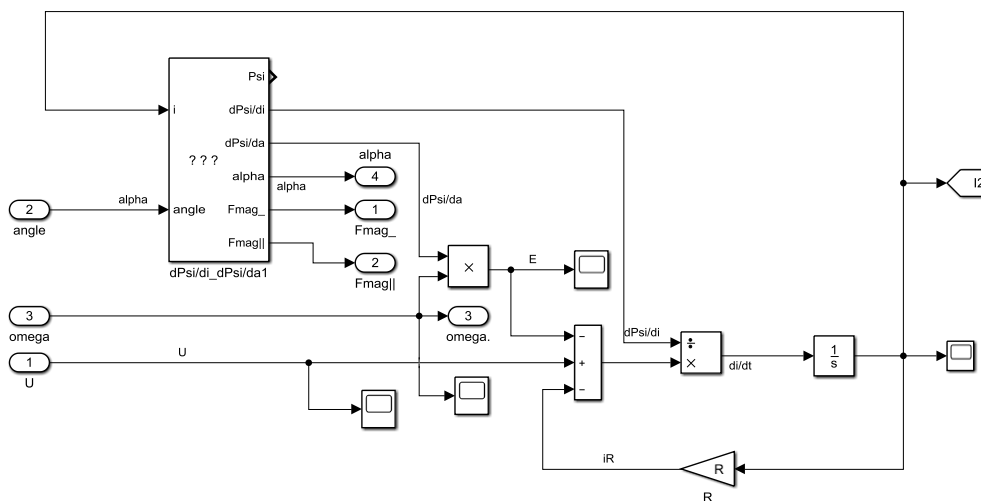


Рис. 3. Simulink-модель полюса ДРК

В рамках даної роботи за попередньо визначеними необхідними механічними параметрами підсилювача РП тролейбуса ЛАЗ Е183Д1 [19,20], спираючись на методи розрахунку [21-26] та особливості конструкції систем рульового керування визначено технічні та масогабаритні характеристики ДРК, які представлені у таблиці 1. Отримані дані дозволяють провести

комплексний розрахунок магнітної системи ДРК та визначити характеристики потокозчеплення, диференційної індуктивності, та радіальної і тангенціальної складових магнітної сили полюса.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики ДРК

Параметр	Величина
Номінальна напруга, В	400
Номінальний струм котушки, А	6
Номінальна частота обертання вихідного валу, об/хв	4
Момент на валу у номінальному режимі, Н·м	5400
Число полюсів	20
Внутрішній діаметр статора, мм	700
Зовнішній діаметр ротора, мм	699,5
Висота спинки статора, мм	75
Висота зубця статора, мм	45
Ширина зубця статора, мм	100
Внутрішній діаметр ротора, мм	640
Довжина осердя ротора, мм	100
Маса ротора, кг	38,8
Ексцентриситет, мм	0,5
Кількість витків котушки	60
Опір котушки, Ом	31
Матеріал осердя	Сталь 2013

Розрахунок магнітних характеристик ДРК ведеться з використанням програмного комплексу FEMM. Під час розрахунку не враховується вплив гістерезису на поведінку магнітної системи та вплив вихрових струмів в осерді електричної машини. Розрахунок ведеться для проміжних положень точки мінімального магнітного зазору відносно полюса ДРК. На кожній ітерації з певним кроком змінюється струм котушки полюса. За допомогою мови Lua та можливостей постпроцесора FEMM на кожній ітерації визначається потокозчеплення та магнітний потік у магнітному зазорі, диференційна індуктивність, а також значення складових магнітної сили кожного полюса.

На рис. 4 зображено розрахункову область поперечного перетину ДРК у програмі FEMM.

За результатами розрахунку отримано набір дискретних значень параметрів ДРК, який не дає можливості їхнього використання для дослідження властивостей системи рульового керування. В такому випадку необхідно створення неперервної математичної моделі магнітних та механічних характеристик за допомогою регресійного аналізу. Для вирішення поставленої задачі пропонується використовувати метод апроксимації кубічними сплайнами, який дозволяє привести розрахункові дані до вигляду аналітичної функції [4].

Порівняльний аналіз методів апроксимації [27] свідчить, що найкращою точністю наближення аналітичної функції мають методи, які базуються на апроксимації рядом Фур'є.

За результатами регресійного аналізу дискретних значень величин, отримані характеристики потокозчеплення Ψ , диференційної індуктивності L_δ , а також радіальну F_x і тангенціальну F_y складові магнітної сили. Отримані характеристики зображено на рис. 5 та 6.

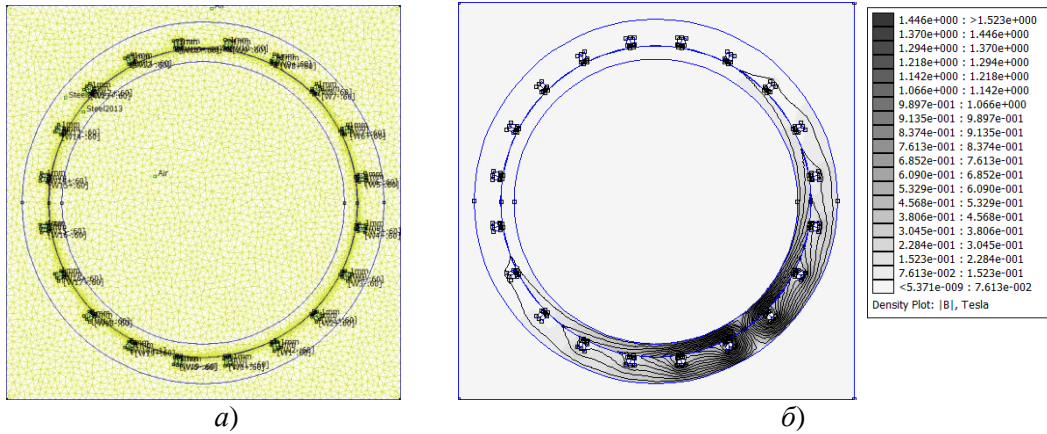


Рис. 4. Розрахункову область поперечного перетину ДРК:

a – розрахункову область ДРК у препроцесорі FEMM; *б* – картина розподілу магнітного поля у постпроцесорі FEMM для заданого положення та струму котушки полюса

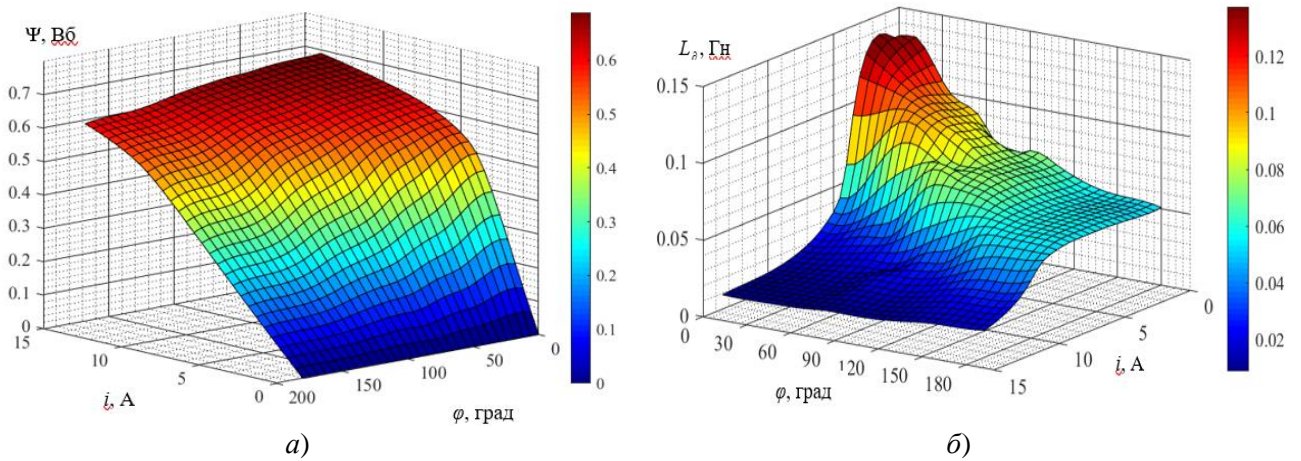


Рис. 5. Електромагнітні характеристики полюса ДРК:

a – потокозчеплення котушки полюса статора ДРК; *б* – диференціальна індуктивність котушки полюса статора ДРК

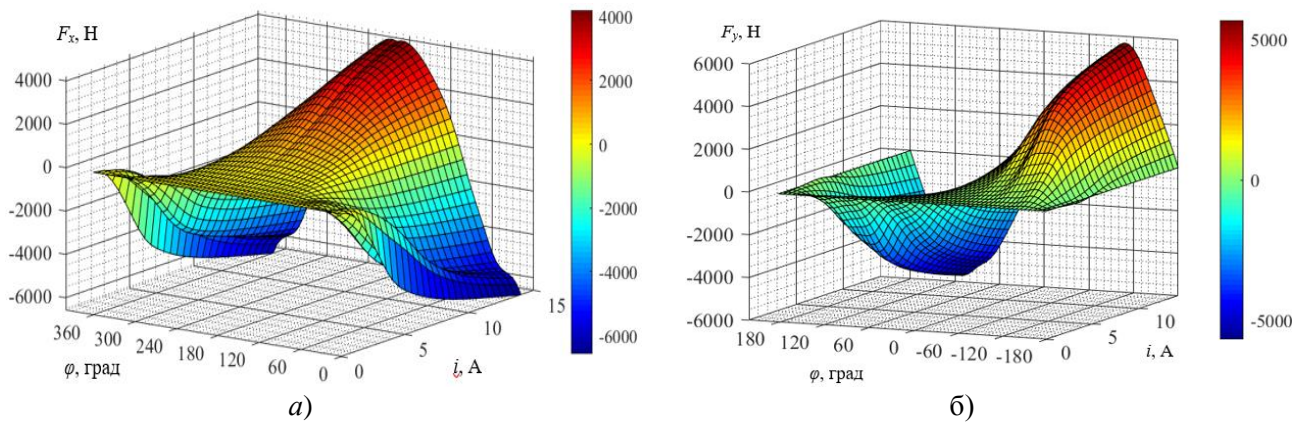


Рис. 6. Електромеханічні характеристики полюсу ДРК:

a – радіальна сила полюса ДРК; *б* – тангенціальна сила полюса ДРК

Визначені значення радіальної і тангенціальної складових магнітної сили для кожного полюса відповідно додаються один до одного. Результуючі значення складових магнітної сили передаються до блоку визначення сили одностороннього магнітного тяжіння (СОМТ) ДРК (див. рис. 7). Вхідними параметрами даного блоку також є кут повороту мінімального магнітного зазору відносно «початкового» положення та кутова швидкість обертання ротору.

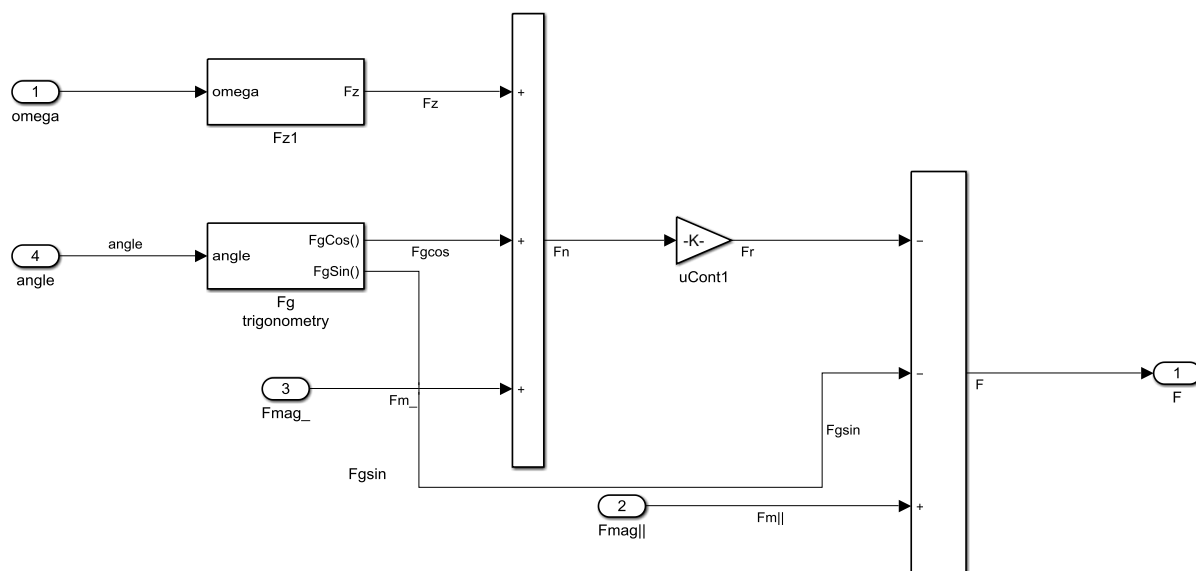


Рис. 7. Simulink-модель розрахунку СОМТ ДРК

Визначення обертового моменту та частоти обертання вихідного валу ротора ДРК з урахуванням кута повороту керованих коліс та пружних зав'язків відбувається у блоці зображеному на рис. 8. Створена Simulink-модель базується на функціональній схемі механічної частини системи рульового керування (див. рис. 2, б).

До вхідних значень блоку належать СОМТ, момент з РМ та загальний момент опору повороту керованих коліс.

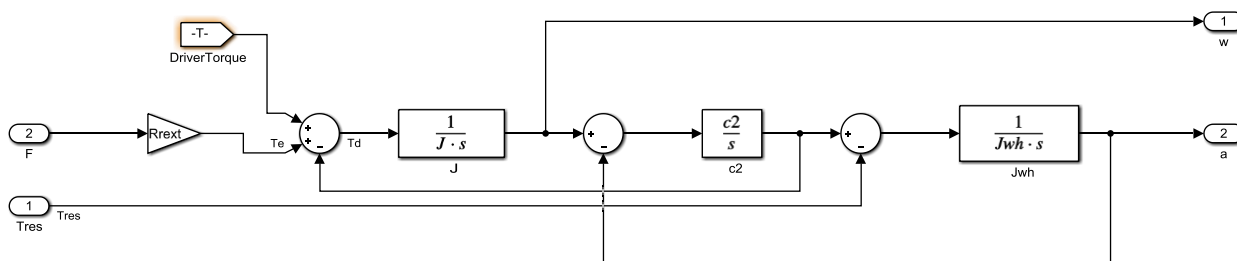


Рис. 8. Simulink-модель визначення обертового моменту та кутової швидкості ДРК

Регулювання вихідних характеристик підсилювача РП на базі ДРК забезпечується за рахунок системи керування струмами у котушках полюсів ДРК. Як показано на структурній схемі (див. рис. 9) система має канал керування за кутом положення ротора відносно розточки статора. Сигнал з датчика положення ротора (ДПР) надходить до блоку 2, для визначення синхронної частоти обертання ротора. Блок 1 розраховує кути увімкнення та вимкнення для кожної фази двигуна з ротором, що обертається (ДРК). Блок 3 проводить порівняння кутів увімкнення та вимкнення, які надходять з блоку 1 з розрахованими у блоці 4 кутами повороту ротора відносно кожної фази ДРК.

У блоці 5 відбувається формування комутаційних імпульсів для кожної фази ДРК, а також контроль синхронної частоти обертання ротора залежно від сигналу завдання.

Система керування враховує момент на рульовому колесі та швидкість руху тролейбуса. Це дозволяє динамічно підлаштовуватися під умови руху для забезпечення максимальної ефективності електроприводу та безпеки і комфорту під час руху тролейбуса.

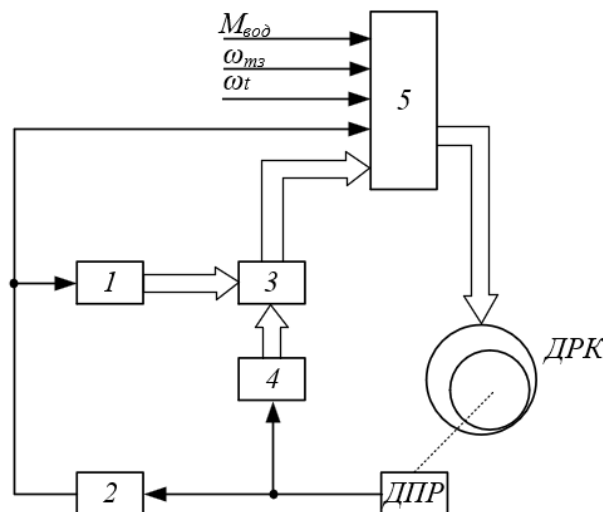


Рис. 9. Структурна схема системи керування електричним приводом у складі системи рульового керування тролейбуса:

ω_t – сигнал завдання частоти обертання ротора; $\omega_{мз}$ – швидкість транспортного засобу; $M_{вод}$ – момент на рульовому колесі водія; ДРК – двигун з ротором, що котиться; ДПР – датчик положення ротора;

1 – блок визначення кутів увімкнення та вимкнення фаз; 3 – блок порівняння кута повороту ротора;

2 – блок визначення частоти обертання ротора; 4 – блок визначення кута повороту ротора для кожної фази статора; 5 – формувач імпульсів комутації для кожної фази статора

Спираючись на структурну схему (див. рис. 9) розроблена Simulink-модель системи керування (рис. 10). Вхідними параметрами моделі є частота обертання вихідного валу ДРК, частота обертання завдання та момент опору на рульовому колесі. Моменти подачі керуючих імпульсів на кожен котушку ДРК регулюються блоками кута вимкнення полюсу *off angle* та кута увімкнення полюсу *on angle*.

Модель (рис. 10) складається з підсистем контролю моменту на рульовому колесі (див. рис. 11, а), частоти обертання вихідного валу (див. рис. 11, б) та датчика положення ротора (ДПР) (див. рис. 11, в). Кут мінімального магнітного зазору відносно кожного полюсу ДРК розраховується у блоці КТs (див. рис. 11, в). Після чого у блоці mod приводяться до діапазону $0...360^\circ$.

Підсистема контролю частоти обертання (див. рис. 11, б) порівнює значення миттєвої та заданої частоти обертання вихідного валу ДРК та за допомогою ПІД-регулятора генерує керуючий імпульс у вигляді логічної одиниці або нуля. Підсистема контролю моменту опору на рульовому колесі (див. рис. 11, а) працює за схожим принципом.

Сигнали з усіх підсистем перемножуються між собою для формування результуючого керуючого впливу на котушки статора ДРК.

Для визначення миттєвих значень моменту опору повороту керованих коліс створено Simulink-модель зображену на рисунку 12. Вхідними параметрами моделі є лінійна швидкість руху тролейбуса та кут повороту керованих коліс. Модель базується на рівняннях (2) – (4)

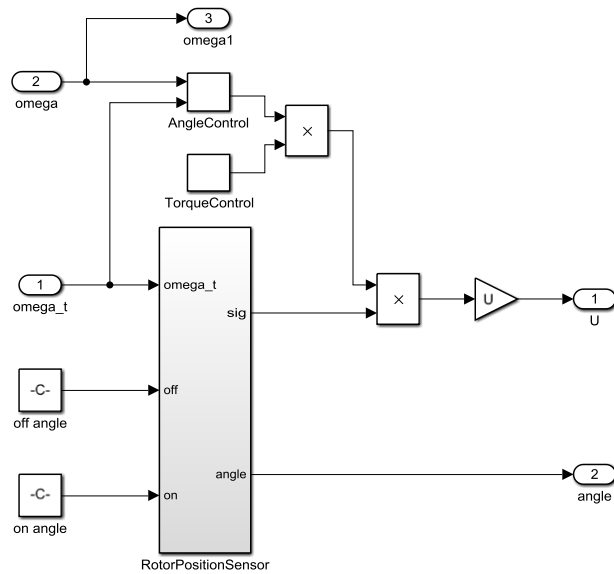


Рис. 10. Simulink-модель системи керування підсилювачем РП на базі ДРК

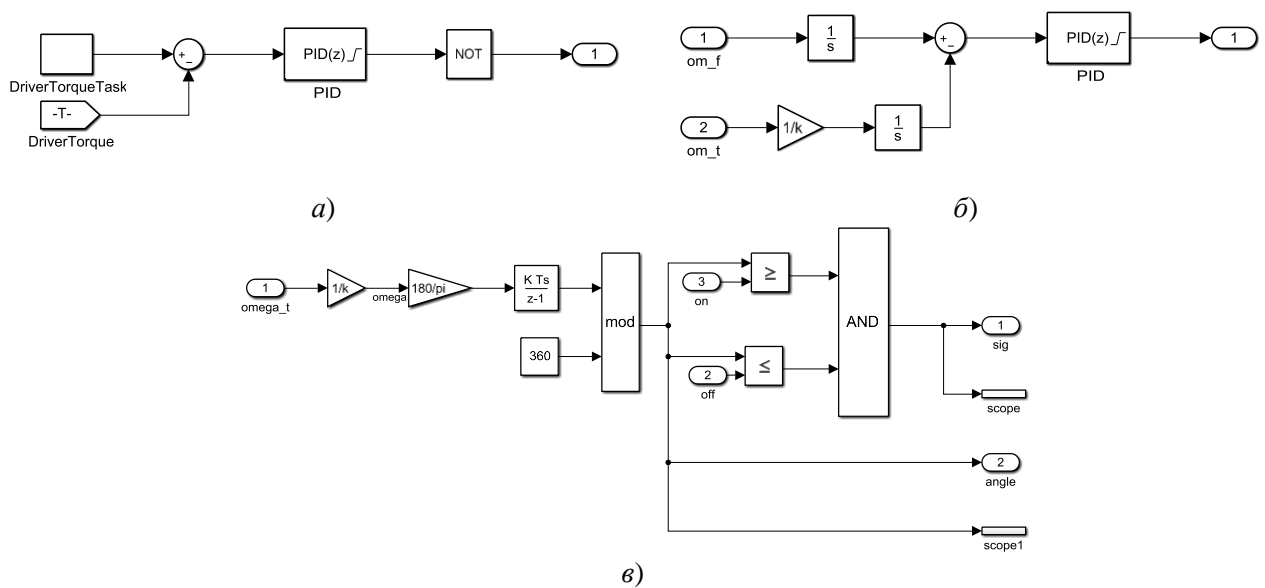


Рис. 11. Складові системи керування підсилювачем РП на базі ДРК:

a – підсистема контролю моменту опору на рульовому колесі; *б* – підсистема контролю частоти обертання; *в* – підсистема ДПР.

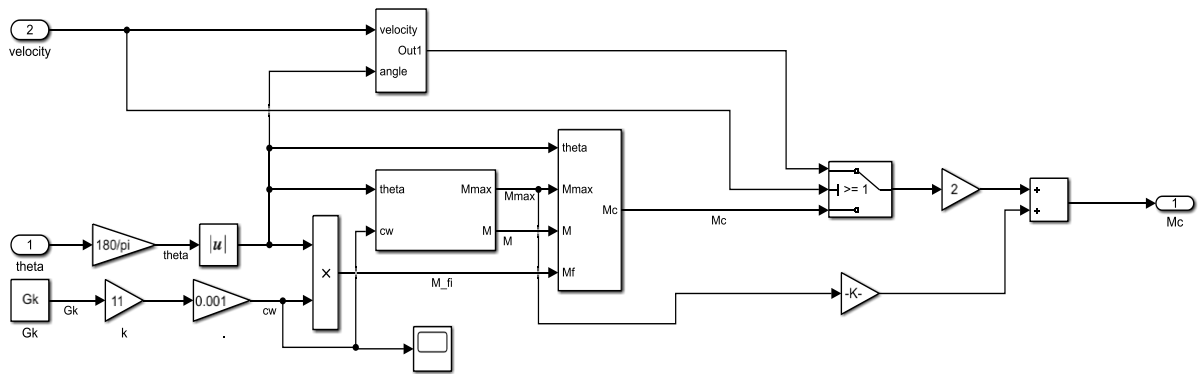


Рис. 12. Simulink-модель визначення моменту опору повороту керованих коліс

Одним з основних завдань системи рульового керування з підсилювачем РП є підтримання оптимального моменту опору на рульовому колесі. Значення такого моменту регламентуються відповідними нормативними актами [28]. Для імітації впливу водія на поворот керованих коліс та визначення моменту опору на рульовому колесі створена Simulink-модель зображена на рис. 13. Вхідними величинами блоку є кут повороту керованих коліс та кут повороту завдання. За отриманою похибкою регулювання ПІД-регулятор створює керуючий вплив на вході елементу динамічного насичення, який призначений для обмеження максимального та мінімального моментів, що створює водій тролейбуса. Отриманий крутний момент помножений на передаточне відношення РМ визначає керуючий вплив водія на поворот керованих коліс.

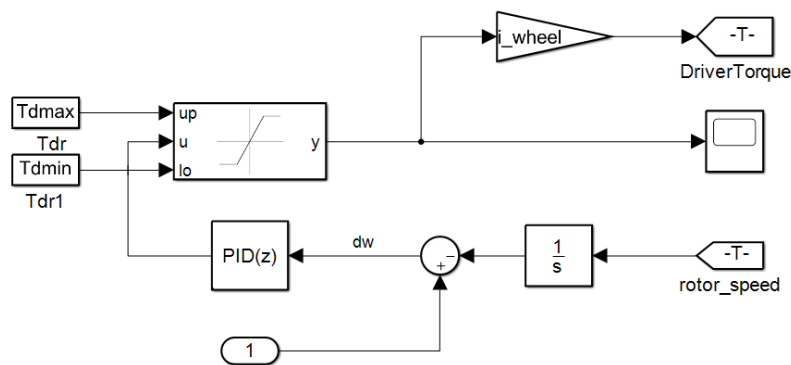


Рис. 13. Simulink-модель визначення крутного моменту водія

Загальна імітаційна модель системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК подана на рис. 14.

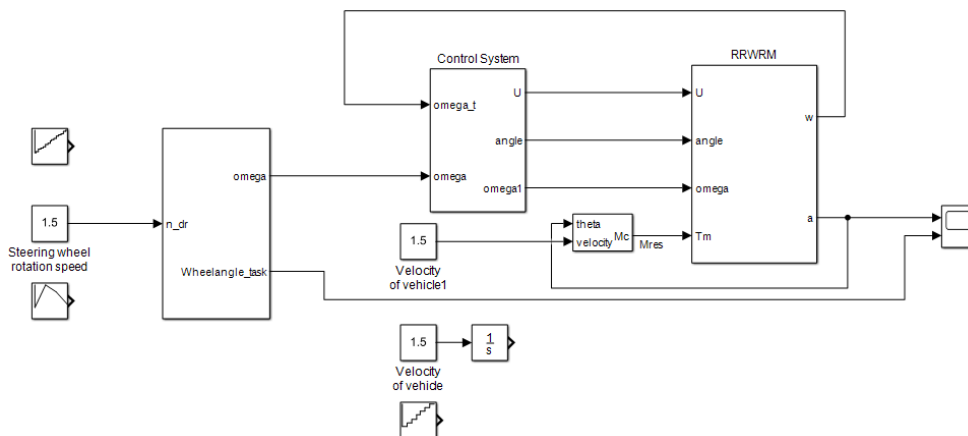


Рис. 14. Загальна імітаційна модель системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК

Моделювання роботи системи рульового керування тролейбуса

Отримана імітаційна модель рульового керування (рис. 14) дозволяє виконувати цифрові дослідження підсилювачів РП на базі ДРК при різних режимах роботи та умовах експлуатації рульового керування тролейбуса.

У процесі моделювання прийняті такі припущення: магнітні системи кожної фази ДРК ідентичні, вихрові струми та гістерезис магнітопроводу ДРК не враховується, активні опори котушок полюсів ДРК рівні, взаємний вплив індукцій полюсів при одночасному узгодженому включенні котушок статора не враховується, величини коефіцієнтів жорсткості елементів механічної частини вважаються постійними, радіальне навантаження та тиск у шинах незмінні, взаємна кінематика тяг та шарнірів рульового керування та підвіски тролейбуса не впливає на перерозподіл сил, напруга живлення електричного двигуна не змінюється з часом.

На рис. 15 – 19 приведені часові діаграми результатів моделювання системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК при повороті рульового колеса на місці. При цьому навантаження на керовану вісь приймається максимально допустимим для тролейбуса ЛАЗ Е183Д1. Частота обертання рульового колеса не змінюється та має значення $n_{год} = 1,5$ об/с. Напруга живлення електричного двигуна $U_{жс} = 400$ В DC. Поворот керованих коліс на місці характеризується створенням максимального навантаження на елементи системи рульового керування.

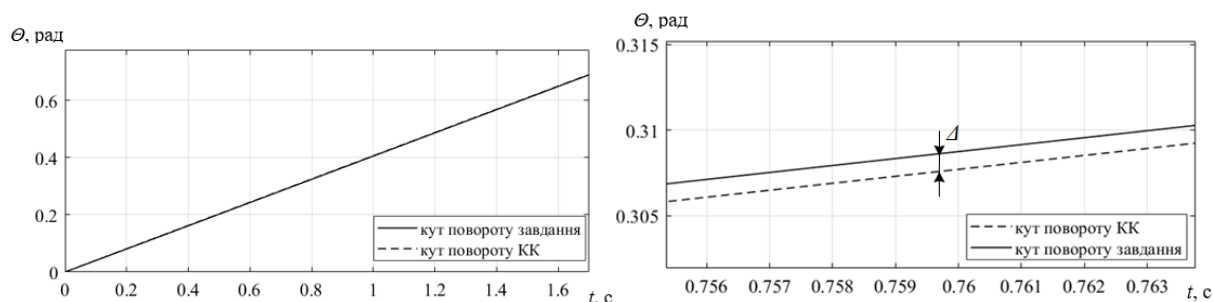


Рис. 15. Часові діаграми кута повороту керованих коліс

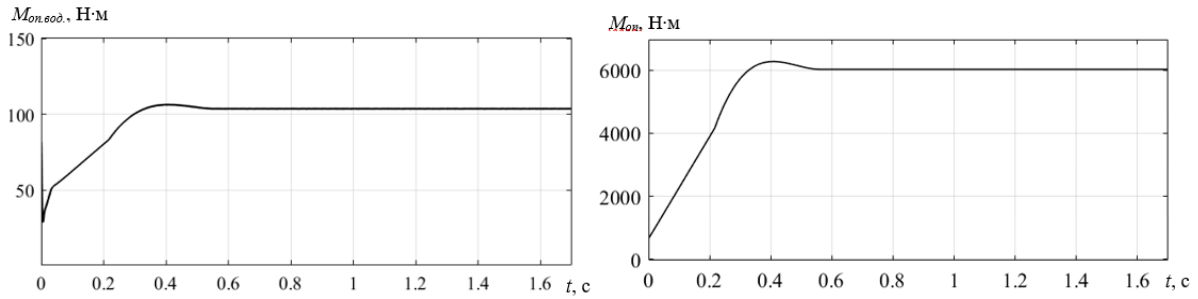


Рис. 16. Часові діаграми моменту опору на рульовому колесі та моменту опору повороту керованих коліс

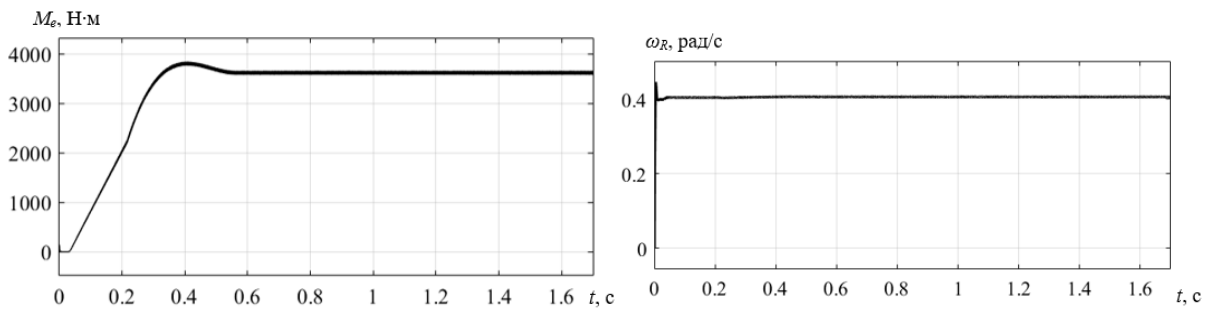


Рис. 17. Часові діаграми електромагнітного моменту ДРК та частоти обертання вихідного валу ротора ДРК

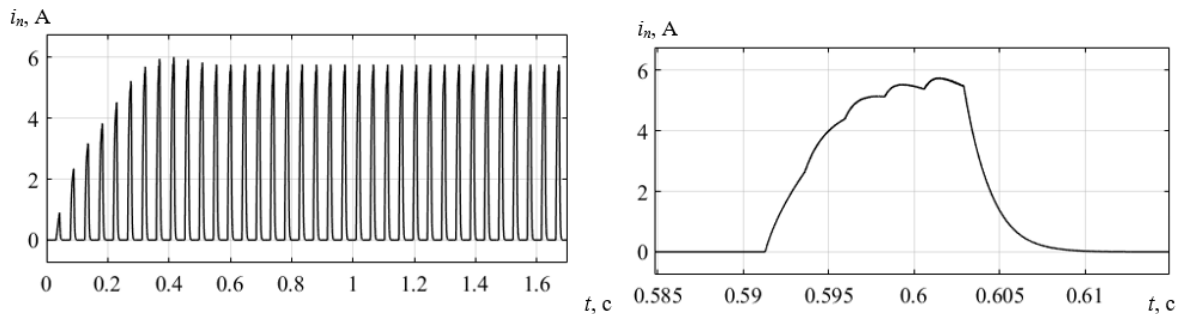


Рис. 18. Часові діаграми струму у котушці полюса ДРК

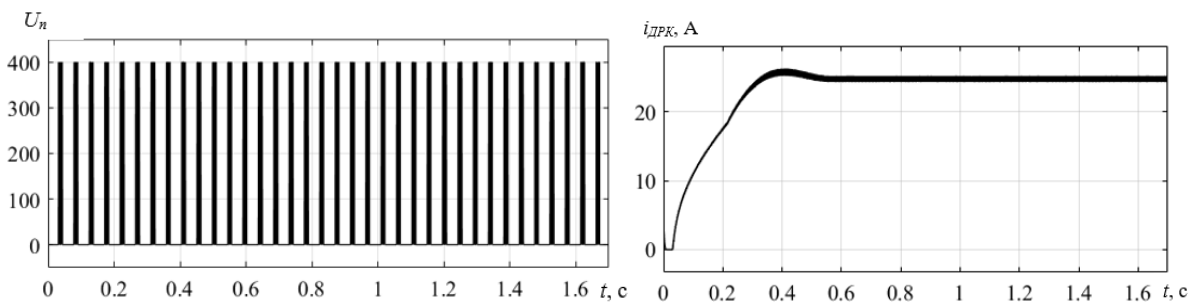


Рис. 19. Часові діаграми напруги прикладеної до котушки полюса ДРК та загальний споживаний струм ДРК

За отриманими результатами моделювання електропідсилювача РП на базі ДРК визначено, що при повороті керованих коліс на місці за заданих початкових умов абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує $\Delta = 0,012$ рад. При цьому момент опору на рульовому колесі за заданим законом регулювання [29] відповідає рекомендованим значенням [28] та не перевищує $M_{оп.вод} = 110$ Н·м. Момент опору повороту керованих коліс при цьому складає понад $M_{оп} = 6000$ Н·м. Максимальний споживаний струм при повороті керованих з максимальним моментом опору складає $i_{ДРК} = 24,76$ А. Споживання електричної потужності з мережі при цьому не перевищує $P_{max} = 3,8$ кВт.

Однією з найважливіших властивостей системи рульового керування, яка впливає на безпеку руху, є стійкість до динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса. У роботі було проведено моделювання системи рульового керування тролейбуса при повороті керованих за динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса. При цьому навантаження на керовану вісь приймається максимально-допустимим для тролейбуса ЛАЗ Е183D1. Напруга живлення електричного двигуна $U_{жс} = 400$ В DC. Зміна швидкості обертання рульового колеса проходить кожні 0,3 с за характеристикою на рис. 20.

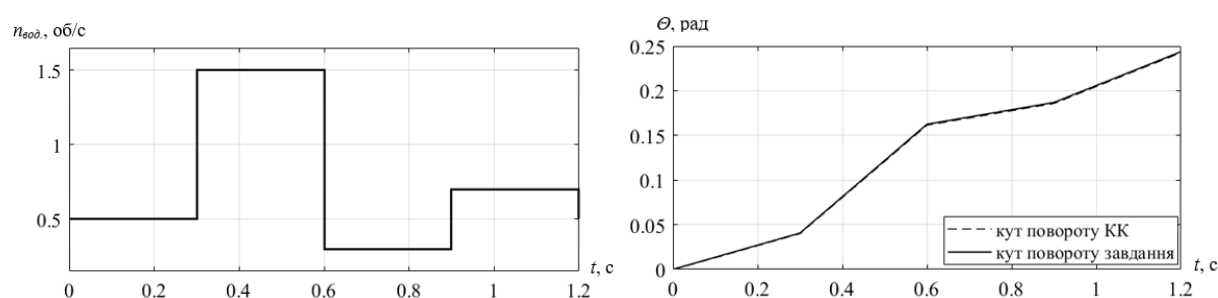


Рис. 20. Часові діаграми зміни швидкості обертання рульового колеса та кута повороту керованих коліс тролейбуса

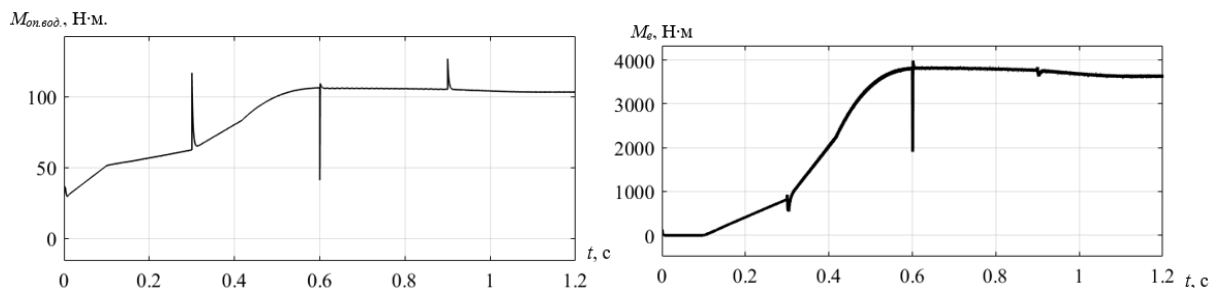


Рис. 21. Часові діаграми моменту опору на рульовому колесі та електромагнітного моменту ДРК за динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса

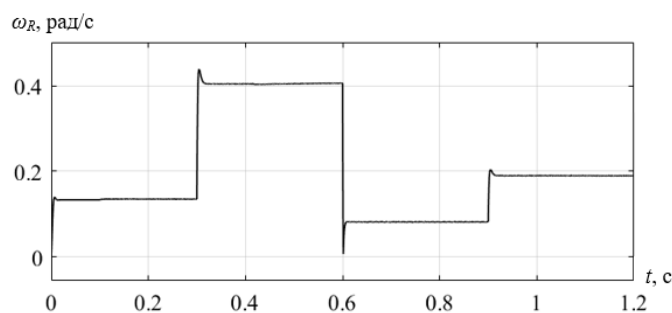


Рис. 22. Часова діаграма частоти обертання вихідного валу ротора ДРК за динамічної зміни швидкості обертання рульового колеса

За результатами моделювання визначено, що за заданих умов абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує $\Delta = 0,015$ рад. При цьому час перехідного процесу зміни швидкості обертання вихідного валу ротора ДРК у моменти динамічної зміни частоти обертання рульового колеса складає $t_{пер.пр.} = 0,011$ с. Це характеризує високі динамічні властивості системи рульового керування тролейбуса з підсилювачем РП на базі ДРК. При цьому максимальна споживана потужність з електричної мережі залишається без змін.

Висновки. У роботі проведено дослідження системи рульового керування тролейбуса ЛАЗ Е183D1 з підсилювачем РП на базі ДРК. На основі математичної моделі системи рульового керування та розроблених функціональних схем створено імітаційну модель рульового керування тролейбуса з використанням пакету Matlab Simulink. Особливістю імітаційної моделі є врахування масогабаритних характеристик рухомого складу, параметрів підвіски керованих коліс, швидкості руху, врахування зміни параметрів магнітної системи ДРК під час роботи. Для врахування нелінійної поведінки магнітної системи та отримання моделі, характер процесів якої максимально наближений до реальних умов, електромеханічні і електромагнітні зв'язки визначені серією розрахунків польових задач методом кінцевих елементів. Отримані залежності апроксимовано усіченим рядом Фур'є, коефіцієнти гармонік якого інтерпольовані кубічними сплайнами.

За результатами імітаційного моделювання при максимально допустимому навантаженні на керовану вісь визначено, що абсолютна похибка керування за кутом повороту керованих коліс на перевищує $\Delta = 0,015$ рад. Час перехідного процесу при динамічній зміні умов повороту керованих коліс складає $t_{пер.пр.} = 0,011$ с. Максимальний момент опору на рульовому колесі не перевищує значення $M_{он.вод} = 110$ Н·м. При цьому максимальна споживана потужність підсилювача не перевищує $P_{max} = 3,8$ кВт.

Створена імітаційна модель дозволяє проводити моделювання динамічних процесів у рульовому керуванні, враховуючи низку факторів, які впливають на поведінку системи та досліджувати системи рульового керування інших безколієвих транспортних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Павленко Т. П., Скуріхін В. І., Колотило В. І., Агарков І.В. Аналіз проблем системи рульового керування тролейбусів та перспективи їх вирішення. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*, 2018. Т. 1, № 32. С. 115–125.
2. Далека В. Х., Хворост М. В., Скуріхін В. І., Скуріхін Д. І., Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина. навч. пос. Харків : ХНАМГ ім. О. М. Бекет., 2018. 370 с.
3. Franke M. Multidisziplinäre Modellierung und Simulation eines Rolling Rotor Switched Reluktanz Antriebes : Doktoringenieur. Magdeburg, 2012. 152 p.
4. Любарский Б. Г., Рябов Е. С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде Matlab Simulink. *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*. 2011. С. 404–424.p
5. Franke M., Brutscheck M., Schmucker U. Modeling and simulation of a rolling rotor switched reluctance motor. 2009 *32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*, Brno, 13–17 May 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2009.5207002>.
6. Miller T. J. E. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49, no. 1. P. 83–90.
7. Pavlenko T., Petrenko O., Shavkun V., Aharkov I. Development of a mathematical model of the trolleybus steering system using a rolling rotor switched reluctance motor. *«EUREKA: Physics and Engineering»*. 2021. № 4. P. 63–75.
8. Рымша В.В., Радимов И.Н., Гульий М.В., Кравченко П.А., Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2010. № 5. С. 24–26.
9. Клімов Е. С. Щодо визначення моменту опору повороту шини керованого колеса на місці. *Міжвузівський збірник "Наукові Нотатки"*. 2014. № 46. С. 246–251.
10. Солтус А.П., Пилипенко В.І., Вплив плеча обкатки на граничний за зчепленням момент повороту шини. *Вісник КДПУ*. 2008. № 1 (48), ч.1. С. 71–74.
11. Солтус А. П., Клімов Е. С. Дослідження особливостей кінематики відбитка шини керованого колеса при повороті на місці з розблокованим приводом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2011. № 1. С. 75–79.
12. Клімов Е. С. Щодо питання визначеності вагового стабілізуючого моменту. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2009. Т. 1. № 1(54). С. 61–65.

13. Ященко Д. М. До визначення моментів, що діють на керуючий колісний модуль автомобіля. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2011. № 8. С. 229–234.
14. Солтус А. П. Основы теории рабочего процесса и расчета колесных управляющих модулей: монография. 7-ме вид. Деп. в Укр. НИИНТИ №501-Ук90 ВИНТИ «Деп. науч. Труды», 1990. 234 с.
15. Мілих В. І., Ревуженко С. А. Теорія і практика чисельно-польового визначення електромагнітних характеристик турбогенераторів при їх роботі в енергосистемі. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2019. № 4. С. 3–15.
16. A fast-built flux-linkage model for switched-reluctance motors / H.-P. Chi et al. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2006. Vol. 29, no. 6. P. 1071–1080.
17. Milykh V. I., Shilkova L. V. Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 5. P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.
18. Milykh V. I., Tymin M. G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Electrical engineering & electromechanics*. 2021. No. 4. P. 12–18.
19. Агарков І. В. Визначення механічних параметрів електричного підсилювача керма у системі рульового керування тролейбусу. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : «Транспортні системи і технології»*. 2018. № 35. С. 52–59.
20. Тролейбус Е183D1-01. Керівництво з експлуатації. Львів, 2006. 277 с.
21. Зинченко Е. Е., Финкельштейн В. Б. Методика расчета вентильных индукторно-реактивных двигателей. *Электротехника и Электромеханика*. 2009. № 4. С. 24–29.
22. Егоров А.В., Наний В. В., Юхимчук, В. Д., Потоцкий, Д.В. Выбор оптимального материала для сердечника двигателя с катящимся ротором, с применением численных методов/ *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2011. № 60. С. 59–62.
23. Дунев А.А., Масленников А. М., Наний В. В., Петренко Н.Я., Сравнение конструкций двигателей с катящимся ротором // *II Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, м. Харків: НТУ «ХПІ», 25–27 берез. 2008 р, С. 57–58.
24. Наний В.В., Мирошниченко А.Г., Юхимчук В. Д., Дунев А.А., Влияние конструкции вентильного ДКР на параметры его магнитного поля. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2007. № 25. С. 62–65.
25. Euyhab El-Kharashi. Design and Analysis of Rolled Rotor Switched Reluctance Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2006. Vol. 1, no. 4. P. 472–481. URL: <https://doi.org/10.5370/JEET.2006.1.4.472>.
26. Analysis of a rolling rotor switched reluctance motor with power electronic / M. Franke et al. *17th Telecommunications forum TELFOR 2009*, Belgrade, 24–26 November 2009.
27. Грищенко Н.В., Семериков С.А., Хараджян А.А., Чернов Е.В. Порівняльний аналіз методів апроксимації. *Кривий Ріг : КДПІ*, 1998. 25 с.
28. ДСТУ UN/ECE R 79-01-2002. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів стосовно механізмів рульового управління (Правила ЕЖ ООН № 79-01:1991, IDT). Вид. офіц.
29. Скуріхін І. Л., Коваленко А. В. Механічне обладнання рухомого складу міського електротранспорту: навчальний посібник. Харків : ХНАМГ, 2012. 226 с.
30. Chengyuan He, Thomas Wu. Permanent Magnet Brushless DC Motor and Mechanical Structure Design for the Electric Impact Wrench System. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/en11061360>.
31. Łuczak D. Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection. *19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)* : IEEE, Miedzyzdroje, 2–5 September 2014. November 2014.
32. Зинченко Е. Е., Финкельштейн В. Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей. *Электротехника и электромеханика*. 2009. № 1. С. 13–16.
33. Любарский Б. Г., Парфенюк Т. В., Ерицян Б. Х. Аппроксимация зависимостей электромагнитных параметров тягового синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. Т. 6, № 4(42). С. 51–54.

REFERENCES

1. Pavlenko T.P., Skurikhin V.I., Kolotilo V.I., Aharkov I.V., (2018) *Analiz problem systemy rulovoho keruvannia troleibusiv ta perspektyvy yikh vyrishennia* [Analysis of problems of the trolleybuses steering system and perspectives for their solution], Collection of scientific works of DUIT. Series «Transport Systems and Technologies», 2018, issue 32. part.1, p. 115-123. [in Ukrainian]
2. Daleka V.H., Hvorost M.V., Skurihin V.I., Skurihin D.I. (2018). *Ruhomiy sklad mIskogo elektrichnogo transportu. Mehanichna chastina* [Rolling stock of urban electric vehicles. Mechanical part] Tutorial, Kharkiv, NUUE in Kharkiv. [in Ukrainian]
3. Franke M. (2012) *Multidisziplinäre Modellierung und Simulation eines Rolling Rotor Switched Reluktanz Antriebes*: Doktoringenieur. Magdeburg, 152 p.
4. Lyubarskiy B. G., Ryabov E. S. (2011) *Modelirovanie elektroprivodov na osnove reaktivnykh induktornykh dvigateley v srede Matlab Simulink* [Modeling of electric drives based on reluctance inductor motors using Matlab Simulink]. NTU «KHPI». 404–424. [in Russian]

5. Franke M., Brutscheck M., Schmucker U. (2009) *Modeling and simulation of a rolling rotor switched reluctance motor*. 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, Brno, 13–17 May 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2009.5207002>.
6. Miller T. J. E. (2002) *Optimal Design of Switched Reluctance Motors*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 49, no. 1. P. 83–90.
7. Pavlenko T., Petrenko O., Shavkun V., Aharkov I. (2021) *Development of a mathematical model of the trolleybus steering system using a rolling rotor switched reluctance motor*. «EUREKA: Physics and Engineering». № 4. p. 63–75.
8. Ryimsha, V.V., Radimov, I.N., Gulyiy, M.V., Kravchenko, P.A. (2010) *Usovershenstvovannaya tseпно-polevaya model ventilno-reaktivnogo dvigatelya*[Improved chain-field model of the valve-reluctance engine]. Elektrotehnika I Elektromehanika. № 5. 24–26 p. [in Russian]
9. Klimov E.S., (2014) *Shhodo vyznachennya momentu oporu povorotu shyny kerovanogo koleasa na misci*. [Regarding determining the moment of resistance of the steering wheel tire in place.], Intercollegiate collection 'SCIENTIFIC NOTES'. Lutsk, Issue №46, p.246-251.
10. Soltus. A. P., Pylypenko V.I., (2008) *Vplyv plecha obkatky na hranychnyi za zcheplyenniam moment povorotu shyny* [Influence of the running arm on the ultimate grip moment of tire rotation], Bulletin of KNPI issue 48, part 1, pp.71-74.
11. Soltus. A. P., Klimov E.S., (2011) *Doslidzhennia osoblyvosti kinematyky vidbytky shyny kerovanoho koleasa pry povoroti na misti z rozblokovanyim pryvodom* [Investigation of Kinematics Features of the Steering Wheel Tire Imprint when Turning in Place with the Unlocked Drive] Mikhail Ostrogradsky Kremenchuk National University, №1, part 1, p 75-79.
12. Klimov E.S., (2009) *Shhodo pytannia vyznachennosti vahovoho stabilizuiuchoho momentu* [Concerning the certainty of weight stabilizing moment], Mikhail Ostrogradsky Kremenchuk National University. Issue 1(54), part 1, p. 61-65
13. Iashchenko D. M. *Do vyznachennia momentiv, shcho diut na keruivchyi modul avtomobilia*. Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia. 2011. № 8. 229–234.
14. Soltus. A. P.,(1990) *Osnovy teorii rabocheho prozessa i rascheta kolesny`kh upravlyayushhikh modulej: monografiya* [Fundamentals of the theory of the working process and the calculation of wheel control modules: a monograph], Scientific works, 234 p.
15. Milykh V. I., Revuzhenko S. A. (2019) *Teoriia i praktyka chyselno-polovoho vyznachennia elektromahnitnykh kharakterystyk turbogeneratoriv pry yikh roboti v enerhosystemi* [Theory and practice of numerical-field determination of electromagnetic characteristics of turbogenerators during their operation in the power system.]. Visnyk NTU «KhPI». Seria: Elektrichni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhii. № 4. P. 3–15.
16. A fast-built flux-linkage model for switched-reluctance motors / H.-P. Chi et al. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2006. Vol. 29, no. 6. P. 1071–1080.
17. Milykh V. I., Shilkova L. V. (2020) *Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation*. Electrical Engineering & Electromechanics. No. 5. P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.
18. Milykh V. I., Tymin M. G. (2021) *A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings*. Electrical engineering & electromechanics. No. 4. P. 12–18.
19. Aharkov I. V. (2018) *Vyznachennia mekhanichnykh parametriv elektrichnoho pidsylivacha kerma u systemi rulovoho keruvannia troleibusu* [Determination of mechanical parameters of the electric power steering in the trolleybus steering system.]. Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seria : «Transportni systemy i tekhnolohii», № 35. P. 52–59.
20. Trolejbus E183D1-01. Kerivny`chtvo z ekspluatatsiyi, (2006) [Trolleybus E183D1-01. Operation manual], Lviv, 277 p.
21. Zinchenko E. E., Finkelshteyn V. B. (2009) *Metodika rascheta ventilnykh induktorno-reaktivnykh dvigatelyu*. [Method for calculating the valve inductor-reluctance motors] Elektrotehnika I Elektromehanika. № 4. P. 24–29.
22. Ehorov A. V., Nanyi V. V., Yukhymchuk V. D., Pototskyi D. V., (2011) *Vyibor optimalnogo materiala dlya serdechnika dvigatelya s katyashchimsya rotorom, s primeneniem chislennykh metodov* [Selection of the optimal material for the core of a rolling rotor motor, using numerical methods] Visnik NTU «HPI». № 60. P. 59–62.
23. Dunev A. A., Maslennykov A. M., Nanyi V.V., Petrenko N. Ya. (2008) *Sravnienie konstruksiy dvigatelyu s katyashchimsya rotorom*. [Comparison of designs of a rolling rotor switched reluctance motor] II UnIversitetska naukovopraktychna studentska konferentsiia magistrantiv NTU «HPI», m. Kharkiv: NTU «HPI», 25–27 berez. 2008 r, P. 57–58.
24. Nanyi V. V., Myroshnychenko A. H., Yukhymchuk V. D., Dunev A. A. (2007) *Vliyanie konstruksii ventilnogo DKR na parametry ego magnitnogo polya*. [Influence of the design of the valve RRSRM on the parameters of its magnetic field] Visnik NTU «HPI». № 25. P. 62–65.
25. Eyhab El-Kharashi. Design and Analysis of Rolled Rotor Switched Reluctance Motor. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2006. Vol. 1, no. 4. P. 472–481. URL: <https://doi.org/10.5370/JEET.2006.1.4.472>.
26. M. Franke, M. Brutscheck, H. Mrech and U. Schmucker (2009) *Analysis of a rolling rotor switched reluctance motor with power electronic*. 17th Telecommunications forum TELFOR 2009, Belgrade, 24–26 November 2009.
27. Hryshchenko N.V., Semerikov S.O., Chernov Ye.V., Kharadzhan O.A. (1998) *Porivnialnyi analiz metodiv aproksymatsii*. [Comparative analysis of approximation methods] Kryvyi Rih : KDPI, P. 25.
28. DSTU UN/ECE R 79-01-2002. *Yedyni tekhnichni prypysy shhodo ofitsiinoho zatverdzhennia dorozhnykh transportnykh zasobiv stosovno mekhanizmiv rulovoho upravlinnia* [Uniform technical prescriptions concerning the approval of road vehicles with regard to steering mechanisms](Pravyla EЭК OON № 79-01:1991, IDT). Vyd. ofits.
29. Skurihin I.L., Kovalenko A.V. (2012). *Mekhanichne obladnannya ruhomogo skladu miskogo elektrotransportu* [Mechanical equipment of rolling stock of city electric transport], Tutorial, Kharkiv: KNAME.

30. Chengyuan He, Thomas Wu. (2018) *Permanent Magnet Brushless DC Motor and Mechanical Structure Design for the Electric Impact Wrench System*. *Energies*. Vol. 11, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/en11061360>.

31. Luczak D. (2014) *Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection*. 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) : IEEE, Miedzyzdroje, 2–5 September 2014. November 2014.

32. Zinchenko E. E., Finkelshteyn V. B. (2009) *Metodika aproksimatsii kriviyh namagnichivaniya ventilyh inductorno-reaktyvnyh dvigateley*. [A technique for approximating the magnetization curves of inductor-reluctance motors] *Elektrotehnika I elektromehanika*. № 1. P. 13–16.

33. Lyubarskiy B. G., Parfenyuk T. V., Eritsyay B. H. (2011) *Aproksimatsiya zavisimostey elektromagnitnyh parametrov tyagovogo sinhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem ot postoyannyh magnitov* [Approximation of the dependences of the electromagnetic parameters of a traction synchronous motor with permanent magnet excitation]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyh tekhnologiy*. № 4(42). P. 51–54.

Aharkov Ivan¹

¹ PhD degree student, Department of Electrical Transport, National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova st., 17 Kharkiv, 61002, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-8766>

SIMULATION OF TROLLEBUS STEERING SYSTEM WITH ELECTRIC POWER STEERING BASED ON ROLLING ROTOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

The analysis of power steering which used on modern rolling stock is carried out. Their main shortcomings are identified. Given the requirements for the steering of trolleybuses, a solution to increase its efficiency is proposed.

Based on the developed mathematical model and functional diagrams of the trolleybus steering system with a electric power steering based on rolling rotor switched reluctance motor, a simulation model of trolleybus steering was created using the Matlab Simulink package. The peculiarity of the simulation model is taking into account the mass and size characteristics of the rolling stock, the parameters of the suspension of the steered axle, the impact of the road surface and the speed of the trolleybus, changes in the parameters of the electric motor magnetic system during operation. The rolling rotor switched reluctance motor which is offered for use as the electric power steering of the LAZ E183D1 trolleybus is calculated.

The calculation of the magnetic system of the engine by the finite element method with the subsequent approximation of the obtained results is carried out. With the help of the developed simulation model the simulation of the trolleybus steering system with electric power steering based on rolling rotor switched reluctance motor was performed. Time diagrams of transients in the trolleybus steering system are obtained and their processing and analysis are carried out.

Keywords: *steering, electric power steering, simulation modeling, trolleybus, rolling rotor switched reluctance motor, magnetomotive force.*

Валентин Могіла¹, Максим Ковтанець^{2*}, Марина Морнева³

¹ Професор, Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, просп. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7101-515X>

² Доцент, Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, просп. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6804-7214>

³ Доцент, Кафедра електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, просп. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2447-1339>

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ВОДИ ТА КОНДЕНСАЦІЇ ПАРИ В ТЕПЛОВИЗНИХ РАДІАТОРНИХ СЕКЦІЯХ

Кафедрою залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин СНУ ім. В. Даля розроблена енергозберігаюча система охолодження дизеля тепловоза з використанням фазових переходів теплоносія. Пропонована система охолодження дозволяє підтримувати постійні оптимальні температури об'єктів охолодження в умовах температур навколишнього середовища ± 40 °С і при будь-якому режимі роботи дизеля.

Для теплового розрахунку радіаторної секції, що працює в режимі конденсатора пари, розроблена математична модель процесу тепловіддачі від пара до стінок плоскої трубки при конденсації, що враховує геометричні особливості перетину трубки. Адекватність зазначеної математичної моделі перевірена шляхом порівняння результатів моделювання з отриманими експериментальними даними. В ході проведення випробувань вимірювалися температура води на виході, температури повітря на вході і виході, і тиску повітря перед і за радіатором. Маючи значення температури стінки, температури пари і конденсату, знаючи значення витрат пари і експериментальний коефіцієнт тепловіддачі, стає можливою перевірка адекватності математичної моделі шляхом порівняння результатів моделювання з отриманими експериментальними даними.

Представлені схеми стендового обладнання, методика випробувань, планування експерименту і основні розрахункові залежності, необхідні для випробувань серійних радіаторних секцій тепловоза в стандартному режимі роботи і в режимі конденсаторів пари.

Ключові слова: експеримент, стендове обладнання, радіаторна секція, коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт тепловіддачі.

Вступ. В умовах паливно-енергетичної кризи, що розвивається у світі, особлива увага на залізничному транспорті приділяється економічності дизеля та його систем. Багаторічний досвід суднобудівних заводів довів перевагу використання фазових переходів теплоносія в системі охолодження (СО) силової установки [1, 2]. Використання випаровування і конденсації охолоджуючої рідини у всіх контурах дозволяє скоротити витрату потужності на циркуляцію теплоносія і перетворювати частину теплової енергії пара в роботу в парових турбінах, що підвищує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) суднового двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) на 5...10% [3] (відзначимо, що ККД дизеля тепловоза становить всього $\approx 40\%$ [4]).

Раніше рівень техніки не дозволяв створювати подібні СО малих габаритів, проте сучасні технології вирішили цю проблему, і провідні світові виробники зацікавилися даним напрямком. Наприклад, компанія BMW створила легковий автомобіль, який має додаткову парову турбіну, яка використовує фазові переходи теплоносія [5].

Аналіз останніх досліджень, постановка проблеми, мета і завдання дослідження. Кафедрою залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин СНУ ім. В. Даля розроблена енергозберігаюча СО дизеля тепловоза з використанням фазових переходів теплоносія [6, 7]. Пропонована система охолодження дозволяє підтримувати постійні оптимальні температури об'єктів охолодження (масла дизеля 70...86 °С, надувочного повітря 60...75 °С, води в сорочці дизеля 80...105 °С [8]) в умовах температур навколишнього середовища ± 40 °С і при будь-якому режимі роботи дизеля. Застосування процесів фазових переходів дозволяє знизити середньорічні витрати потужності на циркуляцію теплоносія на 37% при стандартних параметрах вентиляторів, підвищити максимальну теплорозсіюючу здатність радіаторних секцій, дає можливість здійснювати накопичення теплоти для короткочасного простою тепловоза з вимкненим дизелем у холодний період року з можливістю подальшого пуску дизеля без попереднього прогріву (мінімум: 1 година при -30 °С і 3 години при 0 °С), що призведе до значного зниження середньої експлуатаційної витрати палива тепловозом [9, 10, 11].

Для теплового розрахунку радіаторної секції, що працює в режимі конденсатора пари, була розроблена математична модель процесу тепловіддачі від пара до стінок плоскої трубки при конденсації, що враховує геометричні особливості перетину трубки [12, 13, 14]. Адекватність зазначеної математичної моделі буде перевірена експериментальними дослідженнями натурального зразка радіаторної секції тепловоза.

Мета дослідження полягає у отриманні теплоенергетичних показників конденсації пари в трубках тепловозних радіаторних секцій та підтвердити адекватність математичного моделювання робочих процесів у проектній системі охолодження з урахуванням фазових переходів теплоносіїв. Завдання дослідження – сформулювати рекомендації щодо створення нових економічних систем охолодження новостворених зразків рухомого складу.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення експериментів була взята серійна радіаторна секція ВС-0,5, яка має шахове розташування трубок і геометричні параметри, подані в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри радіаторної секції типу СВ-0,5

Поверхня теплообміну, мм: висота..... ширина..... глибина.....	535 152,5 187	Крок розташування трубок, мм: по фронту..... по глибині.....	16 22	Пластини оребренья: крок, мм..... товщина, мм.... кількість.....	2,3 0,1 232x2
Розмір трубок, мм	19,5x2,2	Число рядів трубок по глибині	8	Маса секції, кг	24,55
Товщина стінки трубок, мм	0,55	Кількість трубок	68	Установча висота, м	0,686
Живе перетин для проходу, м ² : повітря . води	0,0662 0,00132	Поверхня теплообміну, що омивається повітрям, м ²	13,1	Поверхня теплообміну, що омивається рідиною, м ²	1,35

Для підвищення точності результатів досліджень були проведені теплотехнічні випробування обраної водо-повітряної секції ВС-0,5, при стандартних для рухомого складу умовах, на універсальному теплотехнічному стенді, схема якого представлена на рис. 1. Це дозволило отримати початкові теплотехнічні характеристики радіаторної секції для подальшого їх порівняння з отриманими характеристиками при фазових переходах теплоносія.

Методика проведення випробувань узгоджується зі стандартними методиками, застосовуваними для визначення теплотехнічних параметрів водо-повітряних секцій на рухомому складі. У ході випробувань підтримувалися постійна температура води на вході ($\approx 83^\circ\text{C}$) і постійна об'ємна витрата води, відповідна витраті води на тепловозі:

$$V_{\text{ед}} = \frac{80 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}}{n_c}; \quad (1)$$

де $V_{\text{ед}}$ – необхідна об'ємна витрата води в секції, $\text{м}^3/\text{год}$;
 n_c – кількість секцій (підключених паралельно), необхідних для розсіювання теплоти гарячого контуру.

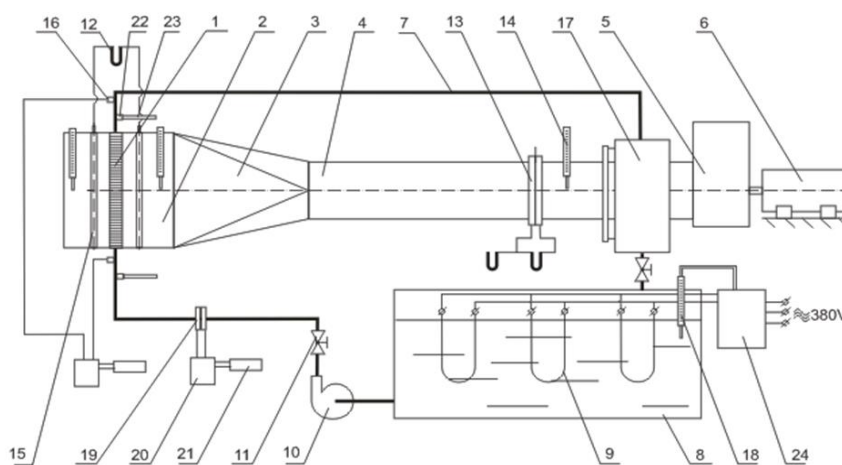


Рис. 1. Схема експериментального стенду для теплотехнічних випробувань радіаторів:

- 1 - радіатор; 2 - патрубок; 3 - перехідник; 4 - трубопровід повітря; 5 - відцентровий вентилятор; 6 - електродвигун; 7 - трубопровід водний; 8 - бак нагрівальний; 9 - ТЕН;
- 10 - водяний насос; 11 - вентиль; 12 - мікроманометр; 13 - сегментна діафрагма;
- 14, 23 - термометр; 15 - трубка повного тиску; 16, 22 - бонка; 17 - мірний бак;
- 18 - термометр; 19 - діафрагма; 20 - дифманометр; 21 - комбінований прилад; 24 - пульт управління

У ході проведення випробувань вимірювалися температура води на виході, температури повітря на вході і виході, і тиск повітря перед і за радіатором. В процесі випробувань варіювалися масова витрата повітря, що дорівнює 2,4, 3,2 і 4,6 $\text{кг} / \text{год}$, що відповідає масовій швидкості повітря, що проходить через радіатор 6, 10, 14 $\text{кг} / (\text{м}^2\text{с})$; а також варіювалася робоча поверхня теплообміну (тобто робоча довжина трубок). Згідно зі свідченнями манометрів було визначено гідравлічний опір випробуваної радіаторної секції. Виходячи з переданої кількості теплоти, обчислювався логарифмічний коефіцієнт теплопередачі за формулою [15]:

$$K_{lg} = \left[-1,163 \cdot \frac{\Delta Q_{cp} \Delta t_{e3}}{F_2} \right] \cdot \left[\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta t_{e3}}{\Delta t_{\text{ед}(ym)}} \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta t_{\text{ед}(ym)}}{t_{\text{ед}1} - t_{\text{ед}1}} \right) \right) \right\} \right]; \quad (2)$$

де ΔQ_{cp} – кількість переданої теплоти (середнє за показниками води і повітря), $\text{ккал}/\text{год}$;
 (відповідно 1,163 – коефіцієнт що враховує розмірності);

Δt_{e3} – перепад температур повітря, $^\circ\text{C}$;

F_2 – площа поверхні, що охолоджується повітрям, м²;

$\Delta t_{\text{ср}(ym)}$ – уточнений перепад температур води, °С;

$t_{\text{ср}1}$ – температура води на вході в радіатор, °С;

$t_{\text{ср}2}$ – температура повітря на вході в радіатор, °С.

Коефіцієнт теплопередачі радіаторної секції, що працює в стандартному режимі, також обчислюється за формулою [16]:

$$K_{\text{теор}} = \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + Er \right) \cdot \frac{F_2}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right]; \quad (3)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки, Вт/(м²К);

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря, Вт/(м²К);

$\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки трубки, м;

$\lambda_{\text{ст}}$ – теплопровідність матеріалу стінки, Вт/(мК);

F_1 – площа поверхні, що охолоджується повітрям, м²;

Er – коефіцієнт термічного опору забруднень всередині трубки (зовнішня поверхня радіатора була ретельно очищена, але, оскільки конструкція зварена, очищення внутрішньої поверхні трубок здійснювалася продувом і заливанням миючих засобів і не може бути перевірена візуально).

Коефіцієнти і визначаються відповідно до відомих залежностей [17]:

$$Nu_{1\text{теор}} = 0,00387 \cdot Re_p^{0,936} \cdot Pr_p^{0,4}; \quad (4)$$

$$Nu_{2\text{теор}} = 0,00387 \cdot Re_n^{0,936} \cdot Pr_n^{0,4}; \quad (5)$$

де Re – критерій Рейнольдса;

Pr – критерій Прандтля;

Індекси p, n – рідини і повітря відповідно.

Знаючи теоретичні коефіцієнти тепловіддачі і експериментальний коефіцієнт теплопередачі, з рівняння (3) був обчислений коефіцієнт термічного опору забруднень, який буде використаний в подальших експериментах для підвищення точності результатів.

Випробування радіаторної секції в режимі конденсатора пара проводилися на модифікованому стенді для теплотехнічних випробувань радіаторів, схема якого подана на рис. 2.

Стенд працює наступним чином: рідкий теплоносій, який перебуває в нагрівальному баку 8 кипить під впливом ТЕН-ів 9 (емітуючи процеси, що відбуваються в системі охолодження двигуна при його роботі) і подається по теплоізолюваних трубопроводах через вентиль 11 в радіатор 1, де конденсується, передаючи теплоту охолоджуючому повітря. Електродвигун 5 пускає в хід відцентровий насос 6, який всмоктує охолоджуюче повітря із зовні в трубопровід 4 через патрубок 2 з заданою витратою, яка контролюється сегментною діафрагмою 13. Конденсат відводиться по трубопроводу 7 в мірну ємність 17. Пара подається самопливом при нормальному тиску, що дозволяє використовувати відкритий контур, з'єднаний з атмосферою, і перешкоджає виникненню високого надлишкового тиску, яке тягне за собою зміну температури кипіння і конденсації. Компресор 10 є допоміжним пристроєм. Мікроманометр 12 вимірює показники трубок повного тиску 15 і дозволяє обчислити аеродинамічний опір радіатора. Коефіцієнт теплопередачі визначається згідно переданої теплоти, яка обчислюється за показаннями термометрів 14 і перевіряється отриманою масою конденсату в мірній ємності

17. При проведенні експерименту керованими факторами є: робоча поверхня теплообміну (тобто робоча довжина трубок), витрата пари та витрата повітря. Значення інших факторів (форма трубок радіатора, фізико-хімічні властивості теплоносія, тиск у баку та радіаторі, температура повітря у приміщенні тощо) будуть прийняті постійними.

Коефіцієнт тепловіддачі α_1 і теплопередачі K є функціями $f(n, d, z, t, Re, r, \lambda, v, c, \rho)$; де n, d, z – геометричні параметри трубок радіатора; t, Re – параметри потоків, r, λ, v, c, ρ – фізико-хімічні параметри теплоносіїв.

Одним з найважливіших факторів, що впливають на коефіцієнт тепловіддачі α_1 при конденсації, є температура стінки. Оскільки радіаторна секція має 68 трубок розташованих в шаховому порядку, температура повітря змінюється під час проходження його через секцію, що обумовлює нерівність температур стінок трубок. Помістити численні вимірювальні прилади вглиб секції не представляється можливим через малий крок пластин обрешетки.

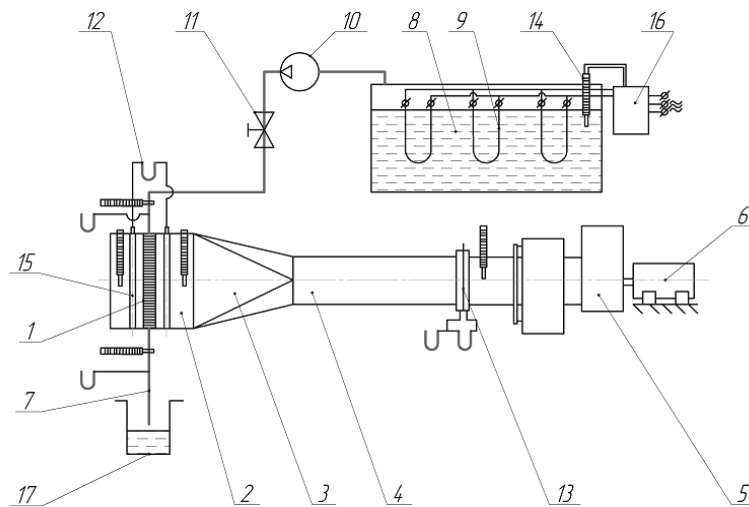


Рис. 2. Схема стенду для теплотехнічних випробувань радіаторних секцій при конденсації теплоносія:

- 1 - радіатор; 2 - патрубок; 3 - перехідник; 4 - трубопровід повітря; 5 - відцентровий вентилятор; 6 - електродвигун; 7 - трубопровід для конденсату; 8 - бак нагрівальний; 9 - ТЕН; 10 - компресор; 11 - вентиль; 12 - мікроманометр; 13 - сегментна діафрагма; 14 - термометр; 15 - трубка повного тиску; 16 - пульт управління; 17 - мірна ємність для конденсату

Обчислення усередненої температури стінок трубок можливо на базі експериментальних значень коефіцієнта теплопередачі K , отриманих в результаті досвіду. Використовуючи формулу (5) з формули (3) можна отримати значення, після чого обчислити температуру стінки використовуючи рівність питомих теплових потоків. Дані обчислення можна провести графічним способом [18], побудувавши графіки назустріч один одному і знайшовши точку перетину, або (з більшою точністю) вирішивши ту ж задачу у вигляді рівнянь [19]:

$$q = \frac{(\Delta t_{cp} - \Delta t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r}; q = \frac{\Delta t_2}{\alpha_2}; \quad (6)$$

де $\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\text{входа}} + \Delta t_{\text{свихода}}) / 2$ – середній температурний перепад, °С;

$\Delta t_2 = t_{\text{стенки}} - t_{2cp}$; де t_{2cp} – середня температура повітря, °С.

Таким чином, маючи значення температури стінки, температури пара і конденсату, знаючи значення витрат пара і експериментальний коефіцієнт тепловіддачі, стає можливою перевірка адекватності математичної моделі шляхом порівняння результатів моделювання з отриманими експериментальними даними.

Математичне моделювання процесів теплообміну при конденсації проводилась за допомогою написаної комп'ютерної програми, яка дозволяє отримати значення коефіцієнта тепловіддачі при варіюванні всіх головних чинників:

$$\alpha_1 = f(n, d, z, t_{cm}, t_n, w_n, r, \lambda_p, \nu_p, c, \rho_n, \rho_p, t_{kin}) \quad (7)$$

де n – відношення розмірів поперечного перерізу трубки;

d – діаметр круглої частини трубки, м;

z – довжина трубки, м;

t_{cm}, t_n, t_{kin} – температури стінки трубки, пари і фазового переходу відповідно;

w_n – швидкість пари на вході в трубку, м/с;

r – питома теплота фазового переходу, кДж/кг;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(мК);

c – питома теплоємність рідини, кДж/(кгК);

ρ_n, ρ_p – щільність пари і рідини відповідно, кг/м³.

В ході моделювання будуть варіюватися три основні чинники, значення інших будуть прийняті константами:

$$\alpha_1 = f(z, t_{cm}, w_n);$$
$$n, d, t_n, r, \lambda_p, \nu_p, c, \rho_n, \rho_p, t_{kin} = const \quad (8)$$

У цьому випадку, умови моделювання процесу теплообміну повністю збігаються з умовами фізичного експерименту, що дає можливість зіставити результати теоретичних і експериментальних досліджень.

Висновки. Представлені методики експериментальних досліджень коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари в трубках тепловозних радіаторних секцій дозволяють отримати їх теплоенергетичні показники та підтвердити адекватність математичного моделювання робочих процесів у проектній системі охолодження з урахуванням фазових переходів теплоносіїв, що дозволить сформулювати рекомендації щодо створення нових економічних систем охолодження новостворених зразків рухомого складу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sklifus Y. The results of the experimental research of the heat transfer coefficient during steam condensation in the tubes of the diesel radiator // An international journal on motorization, vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering. - Lublin–Lugansk: ТЕКА. – 2012. – Vol. 12, №4, P. 264-267.
2. Liudvinavičius L., Lingaitis L. Locomotive kinetic energymanagement // Transport Problems: an International Scientific Journal; Sep2011, Vol. 6 Issue 3, P. 135-142.
3. Mogila Valentine. The prospects of increasing the effectiveness of the cooling device of a diesel locomotive // Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture «ТЕКА». – LUBLIN. – 2010. – Volume XC, P. 198-203.
4. Іванченко Д.А. Параметри управління енергетичної системи тепловоза // Інноваційні технології на залізничному транспорті: збірник наукових праць конф., 13-15 вересня 2012 р., Донецьк-Красний Лиман. Луганськ: СНУ ім. Володимира Даля, 2012. с. 98-105.
5. Паровой двигатель на BMW 5-й серии. URL: <http://sintezgaz.org.ua/energonovosti/173/parovoi-dvigatel-na-bmw-5-i-serii> (дата звернення 12.11.2021).
6. Спосіб охолодження дизеля тепловоза: патент на корисну модель 54682 Україна / В.І. Могила, М.І. Горбунов, Я.К. Скліфус, Р.К. Шевченко, бюл. №22 від 25.11.2010.

7. Спосіб охолодження дизеля тепловоза: патент на корисну модель 54682 Україна / В.І. Могила, М.І. Горбунов, Я.К. Скліфус, С.В. Кара, бюл. № 2 от 25.01.2012.
8. Mohyla Valentin. The cooling device of locomotive with vaporizing coolant // Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture «ТЕКА». – LUBLIN. – 2011. – Volume XIA, P. 169-176.
9. Могила В.И., Ноженко Е.С., Ноженко В.С., Горбунов Н.Н. Анализ энергетических резервов локомотива. // Транспорт, экология – устойчивое развитие: материалы XVIII научно-технической конференции, 10 – 12.05 2012. Варна: Вид-во Варна, 2012. с. 383-389.
10. Gorbunov M. Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / M. Gorbunov, V. Pistek, M. Kovtanets, O. Nozhenko, S. Kara, P. Kučera // JVE International LTD. Vibroengineering Procedia. – 2017. Vol. 13. P. 159-164.
11. Gorbunov M., Kovtanets M., Kostyukovich A., Nozhenko V., Vaičiūnas G., Steišūnas S. Development of the theory and methodology of controlling the local tribological contact thermomechanical loading. Proceedings of the 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018, P. 1383-1388.
12. Gorbunov M., Prosvirova O., Kovtanets M., Steišūnas S., Fomin O. Experimental study of brake frictional contact properties under the impact of local cooling and surfaces cleaning. Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. Transport Means 2019, P. 1281-1284.
13. Gorbunov M., Nozhenko V., Kovtanets M., Porkuyan O. Innovative risks of introducing advanced technical solutions in transport. Proceedings of 24th International Scientific Conference. Transport Means 2020, P. 97-101.
14. Mogila V., Kovtanets M., Morneva M., Kovtanets T. To the calculation of heat transfer during steam condensation in heat exchanger pipes of the diesel locomotive engine cooling system. Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means 2021, P. 322-330.
15. Голубенко О.Л. Горбунов М.І., Слащов В.А., Могила В.І. Комплексне розв'язання проблеми покращення тягово-енергетичних показників тягового рухомого складу. Вісник ЧНУ ім. В. Даля, 3(145), 2010. с.45-57.
16. Тартаковський Е.Д., Агулов А.Ф., Фалендиш А.П. Теорія та конструкція локомотивів. Ч.2. Вибір та розрахунок основних вузлів локомотивів: навч. посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2009. 150 с.
17. Tartakovsky E. Condition and trends renewal of diesel locomotives in Ukraine // Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospect: thesis, 3-12 May 2017, Dresden (Germany).
18. Мозжухин А.Б. Расчет теплообменника: методические указания. Тамбов: ГГТУ, 2011. 32 с.
19. Spiryagin M. Design and simulation of heavy locomotives and trains. CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. 447 p.

REFERENCES

1. Sklifus, Y. (2012). The results of the experimental research of the heat transfer coefficient during steam condensation in the tubes of the diesel radiator. An international journal on motorization, vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering. Lublin–Lugansk, ТЕКА, 12, 264-267.
2. Liudvinavičius, L., Lingaitis, L. (2011). Locomotive kinetic energy management. Transport Problems: an International Scientific Journal; 6, 135-142.
3. Mogyla, V. (2010). The prospects of increasing the effectiveness of the cooling device of a diesel locomotive. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture «ТЕКА», LUBLIN, XC, 198-203.
4. Ivanchenko, D.A. (2012). Parametri upravlinnya energetichnoyi sistemi teplovoza [Control parameters of the power system of a locomotive]. D.A. Ivanchenko. Innovatsiyni tehnologiyi na zailznicnomu transporti - Innovative technologies in railway transport: Proceeding of the conference, (pp.98-105). Donetsk-Krasniy Liman- Lugansk: SNU im. Volodimira Dalya [in Russian].
5. Parovoj dvigatel' na BMW 5-j serii [Steam engine on the BMW 5-series]. <http://sintezgaz.org.ua/energonovosti/173/parovoi-dvigatel-na-bmw-5-i-serii> [in Russian].
6. Mogula, V.I., Gorbunov, M.I., Sklifus, Y.K., Shevchenko, R.K. Sposob ohlazhdeniya dizelya teplovoza [Method of cooling a diesel locomotive]. Patent UA, no. 54682 [in Ukrainian].
7. Mogula, V.I., Gorbunov, M.I., Sklifus, Y.K., Kara, S.V. Sposob ohlazhdeniya dizelya teplovoza [Method of cooling a diesel locomotive]. Patent UA, no. 66918 [in Ukrainian].
8. Mohyla, V. (2011). The cooling device of locomotive with vaporizing coolant. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture «ТЕКА», LUBLIN, XIA, 169-176.
9. Mogila, V.I., Nozhenko, E.S., Nozhenko, V.S., Gorbunov N.N. (2012). Analiz energeticheskikh rezervov lokomotiva [Analysis of locomotive energy reserves]. V.I. Mogila (Eds.), Transport, ekologiya – ustoychivoe razvitiye – Transport, ecology - sustainable development: Proceeding of the XVIII scientific and technical conference, (pp. 383-389). Varna: Varna [in Russian].
10. Gorbunov, M., Pistek, V., Kovtanets, M., Nozhenko, O., Kara, S., & Kučera, P. (2017). Research to improve traction and dynamic quality of locomotives / JVE International LTD. Vibroengineering Procedia, 13, 159-164.
11. Gorbunov, M., Kovtanets, M., Kostyukovich, A., Nozhenko, V., Vaičiūnas, G., Steišūnas, S. (2018) Development of the theory and methodology of controlling the local tribological contact thermomechanical loading / Proceedings of the 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018, 1383-1388.
12. Gorbunov, M., Prosvirova, O., Kovtanets, M., Steišūnas, S., Fomin, O. (2019) Experimental study of brake frictional contact properties under the impact of local cooling and surfaces cleaning / Proceedings of the 23rd International Scientific Conference. Transport Means 2019, 1281-1284.

13. Gorbunov, M., Nozhenko, V., Kovtanets, M., Porkuyan, O. (2020) Innovative risks of introducing advanced technical solutions in transport / Proceedings of 24th International Scientific Conference. Transport Means 2020, 97-101.
14. Mogila, V., Kovtanets, M., Morneva, M., Kovtanets, T. (2021). To the calculation of heat transfer during steam condensation in heat exchanger pipes of the diesel locomotive engine cooling system. Proceedings of 25th International Scientific Conference. Transport Means, Kaunas, Lithuania, 322-330.
15. Golubenko, O.L. Gorbunov, M.I., Slaschov, V.A., Mogila, V.I. (2010). Kompleksne rozv'yazannya problemi pokraschennya tyagovo-energetichnih pokazniksv tyagovogo ruhomogo skladu [Comprehensive solution to the problem of improving the traction and energy performance of traction rolling stock]. Visnik SNU im. V. Dalya, 3(145), 45-57 [in Ukrainian].
16. Tartakovskiy, E.D., Agulov, A.F., Falendish, A.P. (2009). Teoriya ta konstruktsiya lokomotiviv Ch.2. Vibir ta rozrahunok osnovnih vuzliv lokomotiviv [Theory and design of locomotives. Part 2. Selection and calculation of the main components of locomotives]. Harkiv: UkrDAZT [in Russian].
17. Tartakovskiy, E. (2017). Condition and trends renewal of diesel locomotives in Ukraine. Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, Dresden.
18. Mozzhuhin, A.B. (2011). Raschet teploobmennika [Heat exchanger calculation]. Tambov: TGTU [in Russian].
1. Seliverstov, V.M. (1973). Utilizaciya tepla v sudovyh dizel'nyh ustanovkah [Heat recovery in marine diesel installations]. L: Sudostroenie [in Russian].
19. Spiriyagin, M. (2016). Design and simulation of heavy locomotives and trains .CRC Press Taylor & Francis Group.

Valentin Mogila¹, Maksym Kovtanets², Marina Morneva³

¹ Professor, Department of railway and road transport, lift and care system, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59-a Tsentralnyi Prospect, Severodonetsk , 93400, Ukraine

² Associate Professor, Department of railway and road transport, lift and care system, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59-a Tsentralnyi Prospect, Severodonetsk , 93400, Ukraine

³ Associate Professor, Department of electrical engineering, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59-a Tsentralnyi Prospect, Severodonetsk , 93400, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT EXCHANGE DURING WATER COOLING AND STEAM CONDENSATION IN DEMOVER RADIATOR SECTIONS

The Department of Railway and Road Transport, lift and care system of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, an energy-saving cooling system for diesel locomotives using phase transitions of the coolant has been developed. The proposed cooling system allows to maintain constant optimal temperatures of cooling objects at ambient temperatures ± 40 °C and in any mode of operation of the diesel engine. For thermal calculation of the radiator section operating in the mode of the steam condenser, the mathematical model of process of heat transfer from steam to walls of a flat tube at condensation is developed that considers geometrical features of section of a tube. The adequacy of this mathematical model is verified by comparing the simulation results with the obtained experimental data. During the tests, the outlet water temperature, inlet and outlet air temperature, and air pressure in front of and behind the radiator were measured. Having the values of wall temperature, steam temperature and condensate, knowing the value of steam consumption and the experimental heat transfer coefficient, it becomes possible to verify the adequacy of the mathematical model by comparing the simulation results with the obtained experimental data. Schemes of bench equipment, test methods, experimental planning and basic calculation dependences required for testing serial radiator sections of a locomotive in the standard mode of operation and in the mode of steam condensers are presented.

Keywords: *experiment, bench equipment, radiator section, heat transfer coefficient, heat transfer coefficient.*

Василь Равлюк¹, Ярослав Дерев'янчук^{2*}, Сергій Погорєлов³

¹ Доцент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: orcid.org/0000-0003-4818-9482

^{2*} Старший викладач, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4932-2751>

³ Магістр, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2291-210X>

*Автор відповідальний за листування: slavad2der@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ГАЛЬМОВОЇ СИСТЕМИ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА

У роботі проведено комплекс теоретичних наукових досліджень, який доводить, що за використання різних типів гальмових колодок у пасажирських вагонах деякі елементи типової конструкції механічної гальмової системи необхідно модернізувати.

На основі 2D схеми-моделі виконано аналітичні розрахунки гальмової важільної передачі пасажирських вагонів. Завдяки цьому запропоновано шляхи удосконалення найбільш вагомих елементів важільної передачі у пасажирських вагонах за умов застосування композиційних колодок. Виконано аналіз зусиль, які діють у типовій конструкції важільної передачі пасажирського вагона для різних типів колодок. Проведено розрахунок на міцність важливих елементів механічної гальмової системи шляхом застосування скінчено-елементного методу.

Запропоновано використовувати можливості програмного комплексу Femap Siemens PLM Software, який дає можливість виконати оптимізацію елементів механічної системи пасажирських вагонів. Наведено приклад топологічної оптимізації деяких елементів гальмової важільної передачі пасажирського вагона.

За рахунок удосконалення елементів механічної гальмової системи для застосування композиційних колодок у пасажирських вагонах, значно спрощується їх конструкція, полегшується технічне обслуговування та ремонт, так само зменшується вага системи в цілому та вартість і значно підвищується рівень безпеки руху на залізничному транспорті.

Ключові слова: гальмова важільна передача, пасажирський вагон, гальмові колодки, міцність, оптимізація, удосконалення, система.

Вступ. Створення сучасного пасажирського рухомого складу повинно здійснюватися на основі інноваційного підходу, тобто створення якісно нових конструкцій вагонів, які характеризуються високою надійністю, економічністю в експлуатації та технічному утриманні.

Для забезпечення своєчасних перевезень рухомий склад, нарівні з іншими технічними засобами, повинен працювати безвідмовно та гарантувати безпеку руху особливо під час гальмування. Тому гальмова система є однією з основних складових частин сучасного рухомого складу від рівня досконалості конструкції, ефективності, надійності й безвідмовної роботи яких в значній мірі залежить безпека руху поїздів, а також пропускна та перевізна здатність залізниць [1].

За останні роки стан гальмового обладнання рухомого складу в АТ «Укрзалізниця» істотно погіршився й став суттєвим макроекономічним фактором, який стримує збільшення обсягів перевезень на регіональних філіях залізниці й підвищує їх собівартість.

У сучасних вагонах гальмова важільна передача (ГВП) представляє собою механічну гальмову систему у вигляді тяг та важелів, за допомогою яких зусилля від ручного, пневматичного або електропневматичного гальма передається на гальмові колодки або накладки, які притискаються до коліс.

У наш час, набули широкого застосування фрикційні колодки двох типів — чавунні й композиційні. Композиційні гальмові колодки порівняно з чавунними отримали значно більш широке застосування, так як вони мають більш високий коефіцієнт тертя, менше зусилля натискання і кращу зносостійкість, у декілька разів збільшений термін служби, меншу вагу і вартість, а також забезпечують безшумне та плавне гальмування поїзда.

Механічна гальмова система пасажирських вагонів до якої відносяться горизонтальні важелі із затяжками, останні мають отвори, які дозволяють змінювати передаточне число ГВП. Для чавунних гальмових колодок передаточне число більше і елементи ГВП передають значно більші зусилля. А це в свою чергу збільшує їх вагу та вартість й ускладнює їх технічне обслуговування та ремонт.

Встановлення композиційних колодок на пасажирські вагони у яких важільна передача має передаточне число для чавунних колодок, може спричинити явища «юз», утворення повзунів, що руйнують рейки та рухомий склад і загрожують безпеці руху. Так само спричиняють негативні температурні режими на поверхні кочення коліс, що викликають їх пошкодження у вигляді зсувів металу, мікротріщин тощо. Таким чином, удосконалення елементів ГВП пасажирського рухомого складу для застосування композиційних гальмових колодок не тільки спростить конструкцію, полегшить технічне обслуговування та ремонт, а ще й зменшить їх вагу та вартість і значно підвищить рівень безпеки руху на залізничному транспорті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням аналізу роботи гальмового обладнання пасажирських вагонів приділялось достатньо уваги в роботах багатьох фахівців [2], [3]. Так, у роботі [4] доведено, що передавальне число є одним з основних параметрів ГВП, яке не залежить від типу вагона, що дозволяє вирішувати завдання уніфікації. Однак слід зауважити, що передавальне число безпосередньо пов'язане з коефіцієнтом корисної дії (ККД) ГВП вагона. А це, в свою чергу, є величиною, що залежить від таких факторів, як тип вагона, конструктивні особливості ГВП, що призводить до втрати узагальненості цільової функції. Крім того ККД ГВП також залежить від експлуатаційних умов таких як зміна товщини колодки і обода колеса внаслідок зносу тощо [5]. Дослідження ГВП при використанні чавунних і композиційних колодок на вантажних вагонах розглянуто у роботі [6], [7]. У праці [8] виконано дослідження зносу чавунних і композиційних колодок в залежності від кута розташування важелів ГВП. Згідно з результатами цих досліджень, композиційні колодки мають стабільний коефіцієнт тертя і високу зносостійкість в широкому діапазоні швидкостей, але викликають термомеханічні пошкодження коліс внаслідок низької теплопровідності [9].

У роботі [10] автором виконано комплекс завдань з удосконалення й оптимізації елементів рухомого складу. Проте питання, що стосуються оптимізації елементів механічних гальмових систем пасажирського рухомого складу не розглядалися.

У праці [11] колектив авторів наводить результати натурних випробовувань, що дозволяють виконати порівняльну оцінку характеристики міцності деяких типів гальмових колодок вітчизняного виробництва з їх закордонними аналогами, які зазвичай використовують у ГВП візків вагонів. Дослідні випробовування вітчизняних гальмових колодок зі спеціальними вставками у порівнянні з колодками закордонних виробників дозволили встановити, що виникнення дефектів експлуатаційного характеру по колу кочення коліс значно зменшиться. Однак необхідно зазначити, що у цій роботі мова велася тільки про вантажний рухомий склад.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є розроблення практичних заходів з удосконалення механічної гальмової системи пасажирських вагонів.

Для досягнення вище зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз існуючої механічної гальмової системи пасажирських вагонів з метою визначення чинників, які впливають на безпеку руху.
2. Розробити практичні рекомендації з удосконалення конструкції гальмової важільної передачі пасажирських вагонів за рахунок використання комплексного підходу.
3. Оптимізувати елементи механічної гальмової системи пасажирських вагонів для використання композиційних колодок.

Матеріали та методи дослідження. Нині найбільш розповсюджені на рухомому складі є композиційні колодки. В порівнянні з чавунними колодками вони мають більш високий коефіцієнт тертя, менше зусилля натискання і кращу зносостійкість, у декілька разів більший термін служби, меншу вагу, значно меншу вартість, а також забезпечують безшумне та плавне гальмування поїзда. Збільшений термін експлуатації впливає на показники технічного обслуговування та підвищує економічність. Не значне натиснення на колодку дозволяє зменшити тиск в гальмовому циліндрі та зменшити витрату стисненого повітря. Що у свою чергу дозволяє спростити й полегшити конструкцію гальмової системи пасажирського вагона.

Заміна типу колодок спричиняє необхідність зменшення передаточного числа горизонтальних важелів. Для цього слід виконати переставлення шарнірних валиків у горизонтальні важелі й затяжку в яких передбачені спеціальні отвори (рис. 1) [12, 13].

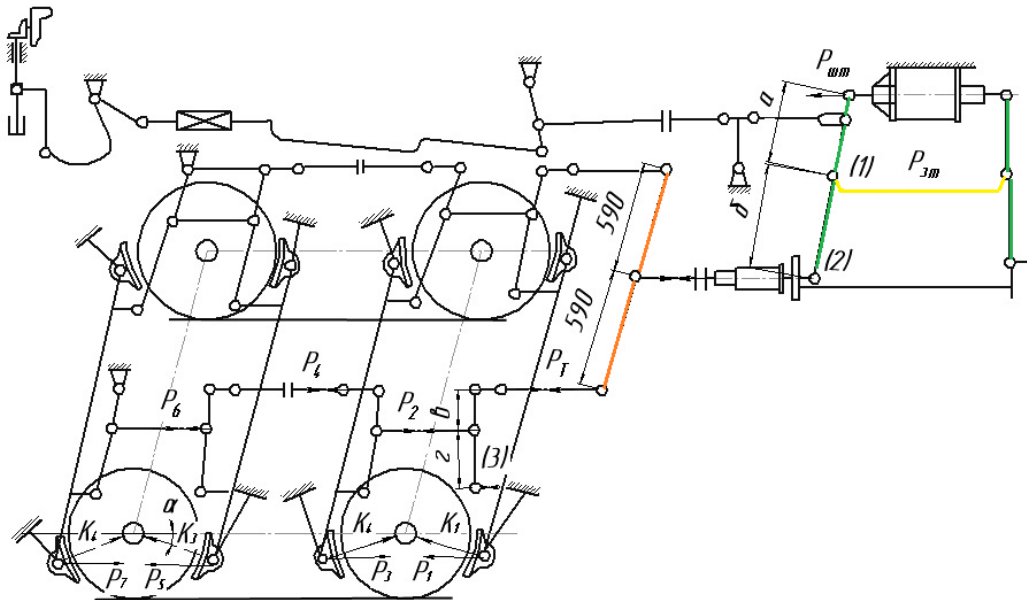


Рис. 1. 2D схема-модель ГВП пасажирського вагона:

a, б – плечі горизонтального важеля; *в, з* – плечі вертикального важеля візка;

P_1 - P_6 – зусилля, що діють в елементах; K_1 - K_4 – зусилля, що передаються від гальмових колодок на колесо вагона; $P_{шт}$, $P_{зм}$, $P_т$ – зусилля, що діють відповідно на штоці гальмового циліндра, затяжці й тязі; α – кут, що проходить між серединою колодки і горизонтальною віссю колеса

Для дослідження доцільності удосконалення ГВП проведена оцінка зусиль, що діють у важільній передачі пасажирського вагона за різних типів гальмових колодок, розраховані на міцність за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) найбільш вагомі елементи передачі [14]. Використовуючи можливості програмного комплексу реалізований приклад оптимізації форми елементів ГВП за прототипом закордонних конструкцій відповідних елементів.

Зусилля, що діють на штоці гальмового циліндра при певному типі гальмових колодок можна визначити за формулою:

$$P_{ум}^i = p^i \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

де p^i – тиск у гальмовому циліндрі при i -му типі колодок, МПа;

d – діаметр гальмового циліндра, м, для пасажирського вагона $d = 0,356$ м.

Зусилля $P_{зоп}^i$ (рис. 1), що діє на зтяжці горизонтальних важелів за різних типів гальмових колодок визначається як:

$$P_{зоп}^i = P_{ум}^i \frac{a^i + b^i}{b^i}, \quad (2)$$

де a^i, b^i – розміри плеч горизонтального важеля при i -му типі колодок, м. При типовій конструкції важеля $a^k = b^k = 0,260$ м, $b^k = a^k = 0,390$ м [6].

Зусилля на авторегуляторі або посередині горизонтального балансира P_{σ}^i розраховується за такою формулою

$$P_{\sigma}^i = P_{зоп}^i \frac{a^i}{b^i}. \quad (3)$$

Величину зусилля, що діє на зтяжці вертикальних важелів візка можна визначати як

$$P_{\sigma}^i = \frac{1}{2} P_{\sigma}^i \frac{v + z}{z}, \quad (4)$$

де v, z – розміри плеч вертикального важеля візка, м. Приймаємо $v = z = 0,230$ м формула (4) змінить свій вигляд

$$P_{\sigma}^i = P_{\sigma}^i. \quad (5)$$

Горизонтальні й вертикальні важелі складаються з двох частин, тому зусилля $P_{зоп}^i, P_{\sigma}^i$ необхідно зменшити навпіл.

За наведеною методологією отримані результати, які наведені на рис. 2.

Важелі ГВП випробовують переважну деформацію згину, тому умова міцності для такого важеля буде мати вигляд

$$[\sigma_3] \geq \frac{M_3}{W}, \quad (6)$$

де $[\sigma_3]$ – допустиме напруження, що виникає у важелі при згині, МПа;

M_3 – максимальний згинальний момент, кН·м;

W – момент опору в найбільш напруженому перерізі, м³.

Найбільш напруженим є переріз, де важіль з'єднується з зтяжкою, тоді, для горизонтального важеля максимальний згинальний момент, можна визначити, як $M_3^i = 0,5 P_{зоп}^i \cdot a^i$, відповідно, для горизонтального балансира $M_{3\sigma}^i = 0,5 P_{\sigma}^i \cdot e$ (e – плече балансира, $e = 0,590$ м), для вертикального важеля $M_{3\sigma}^i = 0,5 P_{\sigma}^i \cdot v$.

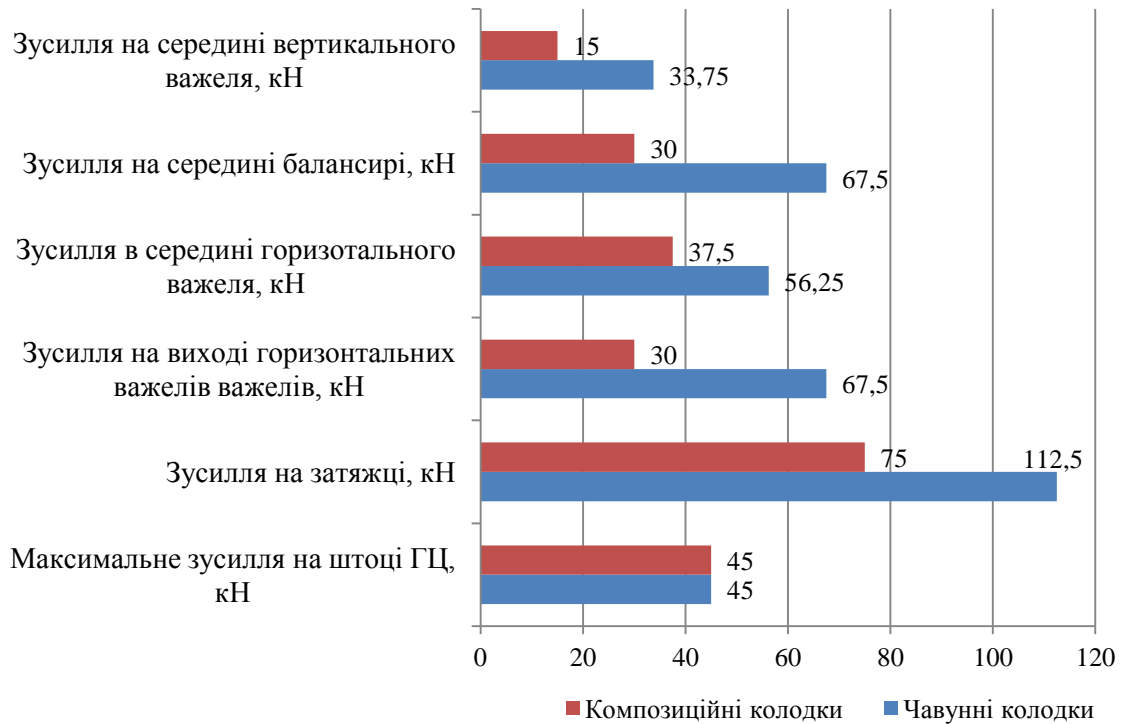


Рис. 2. Величина зусиль в елементах ГВП, що залежить від типу гальмових

Момент опору найбільш напруженого перерізу, що має прямокутну форму, з отвором, висотою $d_{отвору}$ під втулку та валик дорівнює

$$W = \frac{t(h^3 - d_{отвору}^3)}{6h}, \quad (7)$$

де t, h – відповідно товщина та висота важеля, м.

З формул (6-7) отримаємо допустиму висоту важеля у вигляді кубічного рівняння

$$h^3 - \frac{6M_3}{t[\sigma_3]}h = d_{отвору}^3 \quad (8)$$

Розв'язуючи рівняння (8) отримаємо допустимі значення максимальної ширини важелів при певних типах колодок, при цьому величини товщини та діаметра отвору приймаємо як у існуючої конструкції. Отримані результати розрахунку зводимо в табл. 1.

Таблиця 1. Значення допустимої ширини важеля при деформації згину для різних типів гальмових колодок у найбільш напруженому перерізі важеля, м

Найменування	Тип колодок ГВП		Різниця ширини, %
	чавунні	композиційні	
Горизонтальний важіль	0,16	0,138	13,75
Горизонтальний балансир	0,19	0,104	45,26
Вертикальний важіль візка	0,12	0,084	30

Для перевірки на міцність спеціалізованих під композиційні колодки важелів використовувався програмний комплекс Autodesk Inventor. В якості зусиль використовувались зусилля обчислені за формулами 1–5, що рівномірно розподілені по вушку зони контакту з валиком. Граничні умови – шарнірне закріплення в крайніх отворах під валики ГВП. Результати розрахунку наведені на рис. 3. При розрахунках максимальні напруження не перевищують допустимі [15, 16].

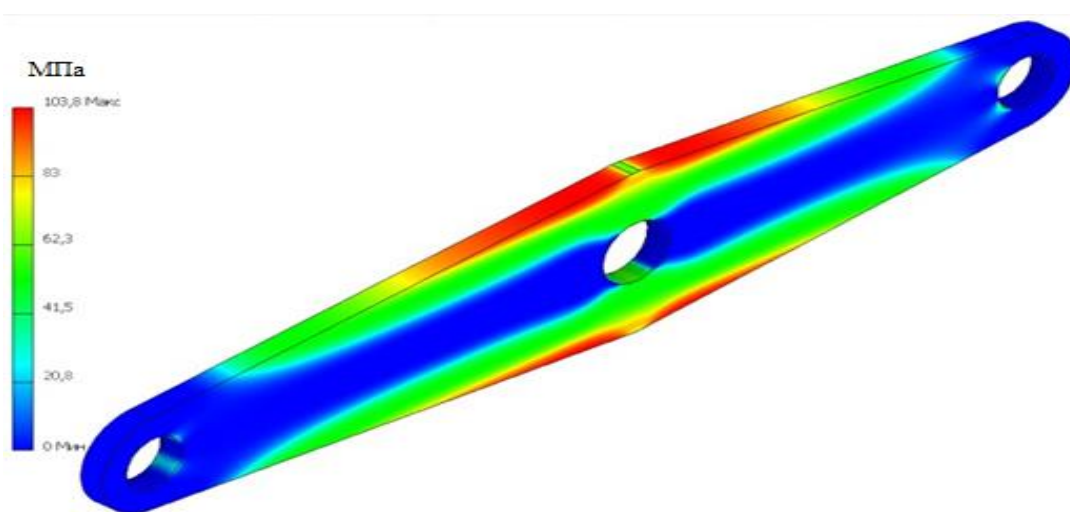


Рис. 3. Напруження, які виникають у горизонтальному важелі

Розрахунок на міцність горизонтального важеля та зтяжки було виконано у програмного комплексу Femap Siemens PLM Software з вирішувачем NX Nastran. При оцінці міцності конструкції важеля без отвору під чавунні колодки використовувались скінченні елементи тетрадральної форми (54119 скінчених елементів, 36021 вузлів, мінімальний розмір грані скінченого елемента – 5 мм). Для розрахунку зтяжки обрана спрощена скінчено-елементна модель у вигляді пластини, яка складається з 10914 скінчених елементів, 22365 вузлів, мінімальний розмір трикутника становить 5 мм. В якості матеріалу використовувалась сталь Ст.3, з якої переважно виготовляються елементи ГВП, прийнято допущення про ізотропність та однорідність матеріалу. Скінчено-елементна модель навантажувалась попередньо розрахованими зусиллями (табл. 1), при цьому, зусилля вважались рівномірно розподіленими по вушку зони контакту з валиком, таке прикладення зусиль обумовлене припрацюванням елементів дотику. В якості граничних умов використовувалось шарнірне закріплення в отворах під валики. Результати розрахунку наведені на рис. 3-4.

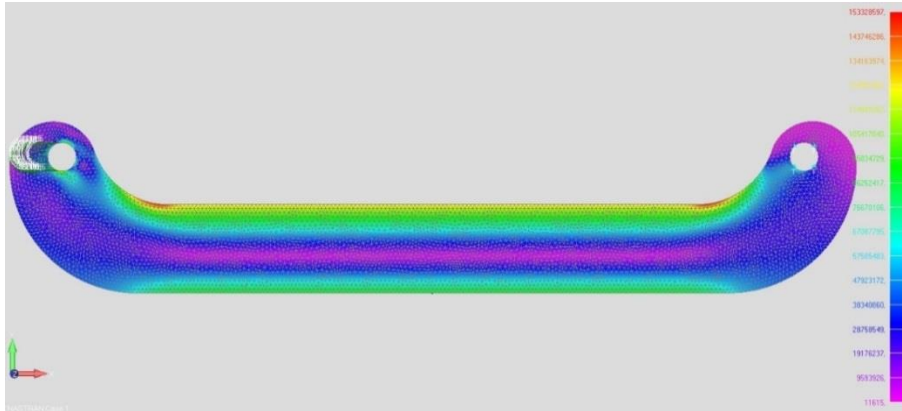


Рис. 4. Результати розрахунку зтяжки горизонтальних важелів на міцність

Порівнюючи отримані максимальні еквівалентні напруження (171 МПа та 153 МПа відповідно для горизонтального важеля та зтяжки, необхідно відмітити, що ці напруження локальні виникають у місцях дотику з валиком або в зонах переходу, середні значення напружень мають меншу величину) з допустимими напруженнями для сталі Ст.3 $[\sigma]=0,95\sigma_T$ [16] $[\sigma]=190$ МПа можна зробити висновки про виконання умов міцності.

Такі елементи ГВП як горизонтальні важелі та зтяжка мають характерні форму та розміри характерні і їх виготовляють з прокату штампуванням. Нові технології розкрою сталевого прокату (плазмова, лазерна, гідроабразивна різка) дозволяють виготовляти елементи більш складної конфігурації. Ця обставина обумовлює можливість зміни форми елементів важільної передачі та раціонального розкрою прокатного листа.

Використовуючи можливості програмного комплексу Femap авторами проведено топологічну оптимізацію важеля та зтяжки при забезпеченні умов міцності. Приклади результатів розв'язання такої задачі наведені на рис. 5 – 6.

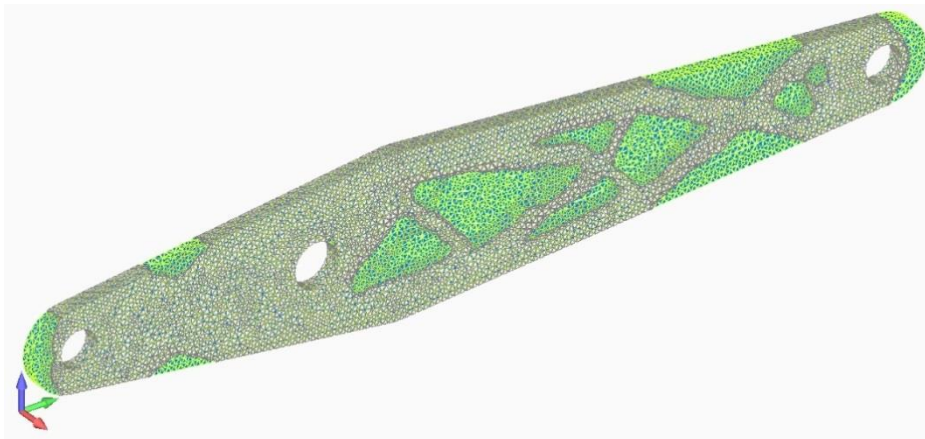


Рис. 5. Результат програмної топологічної оптимізації горизонтального важеля при зменшенні маси на 30% виконаного за допомогою Femap

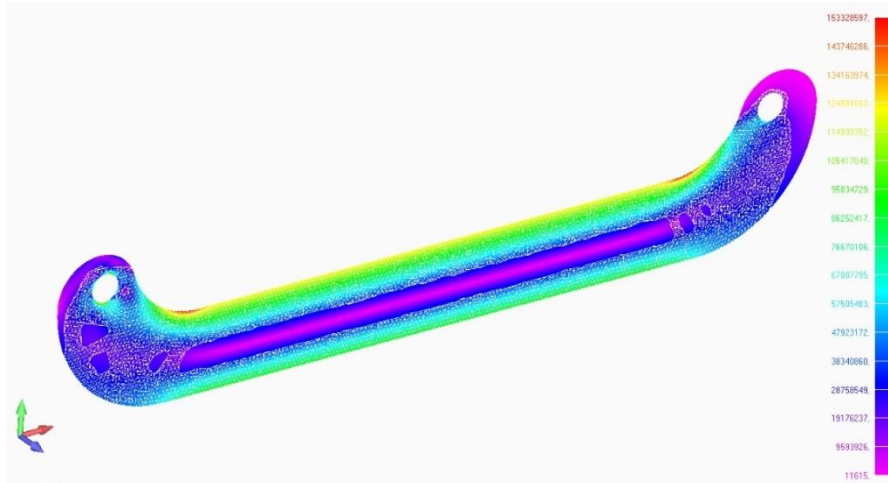


Рис. 6. Результат програмної топологічної оптимізації зтяжки горизонтальних важелів при зменшенні маси на 30%

Висновки та перспективи подальших досліджень. 1. Виконано аналіз існуючої механічної гальмової системи пасажирських вагонів з метою визначення чинників, які впливають на безпеку руху. Проведено оцінку зусиль, що діють у важільній передачі пасажирського вагона для різних типів гальмових колодок. Встановлено, що за використання композиційних колодок у ГВП зусилля, які діють у складових менші ніж для чавунних колодок. Це дає змогу провести удосконалення геометричної форми елементів механічної гальмової системи за їх спеціалізації на композиційні колодки.

2. Розраховано на міцність найбільш вагомні елементи механічної гальмової системи пасажирського вагона шляхом використання СЕМ. Розрахунок показав, можливість суттєвого зменшення ширини вертикальних важелів і балансира. Для перевірки на міцність спеціалізованих під композиційні колодки важелів використовувався програмний комплекс Autodesk Inventor. Максимальні еквівалентні напруження при цьому склали близько 180 МПа, тобто не перевищують допустимі.

3. За рахунок удосконалення елементів механічної гальмової системи для застосування композиційних колодок у пасажирських вагонах, значно спрощується їх конструкція, полегшується технічне обслуговування та ремонт, так само зменшується вага системи в цілому та вартість і значно підвищується рівень безпеки руху на залізничному транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Равлюк В. Г., Захарченко В. В. Теоретичні засади проектування та вдосконалення гальмових систем вантажних вагонів // I Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», Харків-Миргород, 23-24 вересня 2021 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 123 – 125.
2. Бабаєв А. М., Дмитрієв Д. В. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць: навч. посіб. / Київ: ДЕТУТ, 2007.
3. Равлюк В.Г., Дерев'янчук Я.В., Афанасенко І. М., Равлюк М. Г. Розробка електронної діагностичної системи для підвищення достовірності діагностування гальм пасажирських вагонів. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: 2016. Т. 5, №4, с. 35-40. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66007
4. Аввакумов А.С. Совершенствование механической части тормоза специализированных вагонов-хопперов бункерного типа: Дис. канд.техн. наук.05.22.07/МИИТ.М., 1995.
5. Ravlyuk V. H., Mykhalkiv S. V., Rybin A. V., Derevianchuk Ya. V., Plakhtii O. A. Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020, № 6, pp. 48-54, <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048>
6. Волошин Д. І., Афанасенко І. М., Дерев'янчук Я. В. Модернізація елементів гальмівної важільної передачі вантажного вагона. // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 30. К.: ДЕТУТ, 2017. С. 65-72.

7. Afanasenko I., Derevianchuk I., D. Voloshin Improvement of brake lever transmission for dump cars // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 708, 2019, 012037. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012037 (Great Britain)
8. Асташкевич, Б. М. Исследование эксплуатационных дефектов фрикционного сопряжения тормозной колодки с колесом вагона // Вестник ВНИИЖТ, 2004, № 4. С. 35-39.
9. Шакина А. В., Фадеев В. С., Штанов О. В. Новые тормозные колодки повышенной износостойкости // Вагоны и вагонное хозяйство. 2014. № 4. С. 42-44.
10. Фомін О. В. Оптимізаційне проектування елементів кузовів залізничних напіввагонів та організація їх виробництва: Монографія / Донецьк: ДонІЗТ УкрДАЗТ, 2013. 251 с.
11. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винстрот Б. У., Муковоз С. П. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины. Локомотив-информ. 2015. № 7/8. С. 20-22.
12. Вагоны вантажні. Гальмівне обладнання. СТП 04-028: 2020. Протокол № Ц-45/83 Ком. т. засідання правління АТ «Укрзалізниця» від 01.10.20 р. 2020. 117 с.
13. Інструкція з ремонту гальмівного обладнання вагонів: ЦВ-ЦЛ-0013 : Затв. нак. Укрзалізниці №22-ЦЗ від 25.01.05. вид. офіц. К.: ТОВ Видавничий дім «САМ», 2005. 160 с.
14. Равлюк В. Г., Дерев'янчук Я. В. Рациональный способ модернизации элементов гальмової важільної передачі пасажирських вагонів // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.-прак. конф. / Академія технічних наук України. (Івано-Франківськ, 5 – 7 квітня 2021 р.). Івано-Франківськ: Кушнір Г. М., 2021. С. 366 – 370.
15. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм / М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 356 с.
16. Конструирование и расчет вагонов/ Под ред. проф. Лукина В.В. / М.: УМК МПС России, 2000. 731 с.

REFERENCES

1. Ravlyuk V. G., Zakharchenko V. V. (2021). Teoretychni zasady proektuvannia ta vdoskonalennia halmovykh system vantazhnykh vahoniv [Theoretical principles of design and improvement of brake systems of freight cars]. *1-a mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiia «Prohresyvni tekhnologii zasobiv transportu», Kharkiv-Myrhorod [1st International Scientific and Technical Conference "Progressive Technologies of Vehicles", Kharkiv-Myrhorod]*, 1. 123 – 125. [in Ukrainian]
2. Babaiev A. M., D. V. Dmytriiev (2007) Pryntsyyp dii, rozrakhunky ta osnovy ekspluatatsii halm rukhomoho skladu zaliznyts: navch. posib. Kyiv: DETUT. [in Ukrainian].
3. Ravlyuk V.H., Derevianchuk Ya.V., Afanasenko I. M., Ravliuk M. H. (2016) Rozrobka elektronnoi diahnostychnoi systemy dlia pidvyshchennia dostovirnosti diahnostuvannia halm pasazhyrskykh vahoniv. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy*. T. 5, №4, pp. 35-40 [in Ukrainian].
4. Avvakumov A.C. (1995) Sovershenstvovanie mehanicheskoy chasti tormoza spetsializirovannykh vagonov-hopperov bunkernogo tipa: *Dis. kand.tehn. nauk.-05.22.07/MIIT,-M*. [in Russian]
5. Ravlyuk V. H., Mykhalkiv S. V., Rybin A. V., Derevianchuk Ya. V., Plakhtii O. A. Forecasting of wear of pads of modernized brake system devices of bogies of freight cars using ARIMA models. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, № 6, pp. 48-54, <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/048>
6. Voloshyn D. I., Afanasenko I. M., Derevianchuk Ya. V. (2017) Modernizatsiia elementiv halmivnoi vazhilnoi peredachi vantazhnoho vahona. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu Ministers-tva osvity i nauky Ukrainy: Seriia «Transportni systemy i tekhnologii»*. Vyp. 30, DETUT pp. 65-72. [in Ukrainian].
7. Afanasenko I., Derevianchuk I., Voloshin D. (2019) Improvement of brake lever transmission for dump cars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 708, 012037. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012037 (Great Britain)
8. Astashkevich, B. M. (2004) Issledovanie ekspluatatsionnykh defektov friktsionnogo sopryazheniya tormoznoy kolodki s kolesom vagona. *Vestnik VNIIZhT*, № 4. - pp. 35-39. [in Russian]
9. Shakina A. V., Fadeev V. S., Shtanov O. V. (2014) Novyye tormoznyie kolodki povyishennoy iznosostoykosti. *Vagony i vagonnoe hozyaystvo*. № 4. - pp. 42-44. [in Russian]
10. Fomin O. V. (2013) Optymizatsiine proektuvannia elementiv kuzoviv zaliznychnykh napivvahoniv ta orhanizatsiia yikh vyrobnytstva: Monohrafiia. *DonIZT UkrDAZT*, Donetsk [in Ukrainian].
11. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Vinstrot, B. U. (2015). Ispytaniya perspektivnykh tormoznykh kolodok na zheleznykh dorogah Ukrainyi [Tests of promising brake pads on the railways of Ukraine]. *Lokomotiv-inform [Lokomotiv-inform]*, 7-8, 20-22. (in Russian)
12. Vahony vantazhni. Halmivne obladnannia. (2020) *STP 04-028: 2020*. [Freight cars. Braking equipment], 117. [in Ukrainian]
13. Instrukciya z remontu galmivnogo obladnannya vagoniv: CV-CL-0013 [Manual braking equipment repair cars] (2005). *Zatv. nak. Ukrzaliznici №22-CZ vid 25.01.05. – vid. ofic. – K.: TOV Vidavnichij dim «SAM», 2005. – 160 s.* [in Ukrainian]
14. Ravlyuk V. G., Derevianchuk I. (2021). Ratsionalnyi sposib modernizatsii elementiv halmivnoi vazhilnoi peredachi pasazhyrskykh vahoniv [A rational way to modernize the elements of the brake lever transmission of passenger cars].

Prykladni naukovo-tekhnichni doslidzhennia [Applied scientific and technical research]. Akademiia tekhnichnykh nauk Ukrainy [Academy of Technical Sciences of Ukraine]. Ivano-Frankivsk [Ivano-Frankivsk], 5, 366-370. [in Ukrainian]

15. Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm.(1996) *GosNIIV-VNIIZhT*, 356 s. [in Russian].

16. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Construction and calculation cars] (2000). UMK MPS Rossii. 731s. [in Russian].

Vasyl Ravlyuk¹, Yaroslav. Derevianchuk^{2*}, Pohorielov Serhii³

¹ Associate Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

^{2*} Senior Teacher, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4932-2751>

³ Master student, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2291-210X>

THE IMPROVEMENT MECHANICAL BRAKE SYSTEM OF THE PASSENGER CAR

A set of theoretical scientific researches is carried out in the work, which proves that with the use of different types of brake pads in passenger cars some elements of the typical design of the mechanical brake system need to be modernized.

Analytical calculations of the brake lever transmission of passenger cars are performed on the basis of the 2D scheme-model. Due to this, ways to improve the most important elements of lever transmission in passenger cars under the conditions of composite pads are proposed.

The analysis of the forces acting in the typical design of the lever transmission of a passenger car for different types of pads is performed. The strength of important elements of the mechanical brake system is calculated by applying the finite element method.

It is proposed to use the capabilities of the software package Femap Siemens PLM Software, which allows you to optimize the elements of the mechanical system of passenger cars. An example of topological optimization of some elements of brake lever transmission of a passenger car is given.

By improving the elements of the mechanical brake system for the use of composite pads in passenger cars, greatly simplifies their design, facilitates maintenance and repair, also reduces the weight of the system as a whole and cost and significantly increases the level of traffic safety.

Keywords: brake lever transmission, passenger car, brake pads, strength, optimization, improvement, syste.

Юрій Мартинов^{1*}, Олександр Петренко^{2*}, Борис Любарський³

¹ Аспірант, Кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17 м. Харків, 61002, Україна, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-0828-7355>

² Професор, Кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17 м. Харків, 61002, Україна, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-4027-4818>

³ Професор, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, 04071, Україна, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2985-7345>

* Автор, відповідальний за листування: Martynov.Yurii94@gmail.com

ОЦІНКА ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЛІФТОВОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

У статті дана оцінка сучасному стану міського ліфтового господарства, проведено аналіз статистичних даних, які відображають кількість працюючих понаднормово відповідно до встановлених нормативами часових норм безпечної експлуатації та непрацюючих ліфтів. Проведено порівняльний аналіз характеристик типових ліфтових приводів. Зазначено, що на підставі проведеного дослідження можливо зробити такі висновки та надати рекомендації. В умовах бюджетного дефіциту організаціям, що обслуговують ліфти необхідно самостійно намагатись знаходити кошти для оновлення або модернізації цього виду транспорту, що призведе до росту прискорення строків виконання технічних робіт. Наприклад, таким джерелом фінансування можуть бути приватні інвестиції. За відсутності достатнього фінансування організації з обслуговування можуть отримувати необхідного обладнання шляхом лізингу. Важливим питанням є підвищення рівня підготовки кадрів для якісного технічного обслуговування ліфтів. Необхідна поетапна заміна ліфтів, які відпрацювали свій нормативний строк експлуатації (в першу чергу – це ліфти, що відпрацювали понад 35 років, потім 25 років і т.д.). В основу оновлених ліфтів необхідно закласти сучасні інноваційні технології, які б забезпечили енергозбереження та були обладнані новітніми методами контролю, моніторингу технічного стану ліфтової системи дистанційно, це суттєво підвищить рівень якості та швидкості обслуговування.

Ключові слова: ліфтовий електропривод, технічний стан ліфтового господарства, енергозбереження, перетворювач частоти.

Вступ. Ліфт належить до категорії вертикального типу транспорту підвищеної небезпеки, тому існує необхідність своєчасного та кваліфікованого обслуговування та ремонту. Досить велика частина цього виду транспорту буда виготовлена та здана в експлуатацію ще за радянські часи. За інформацією джерела [1] майже 60 % ліфтів вичерпали свій технічний ресурс безпечної експлуатації, також в наслідок неякісного монтажу та обслуговування відсоток відмов поступово зростає. Згідно ДСТУ №22011-95– забороняється використання ліфту без проведення оцінки експерта. Рівень диспетчеризації за останні 25 років зменшився на 20 %, в наслідок: браку коштів, дефіциту кваліфікованих працівників та відсутності достатньої уваги до цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Ліфт є одним з найважливіших та найрозповсюдженим видом сучасного транспорту, з ростом міст також збільшується його значення в житті населення. Такий транспортний засіб забезпечує комфортне пересування та

транспортування людей і вантажів в багатоповерхових будинках, торгових центрів, метрополітені тощо. Особливо через відсутність ліфтів або їх несправний стан відчують значний дискомфорт маломобільні групи населення такі як: люди похилого віку, інваліди, батьки з дитячими візками тощо[2-6].

Варто зазначити, що більшість існуючих в Україні ліфтів (приблизно 86 тис. одиниць) – були встановлені ще в 1970-1980 роки, типове обладнання наведено в таблиці 1[7,8]. За даними Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України – більш ніж 65 % ліфтів вже експлуатуються понад 25 років [2].

Таблиця 1. Технічні характеристики ліфтів

№	Параметр	ПГП-500		ПГП-408	ПГП-500
1	Максимальна висота підйому, м	75	75	75	100
2	Максимальна висота верхнього поверху, м	3,5	3,5	3,5	4,3
3	Максимальна кількість зупинок	16	16	3-20	24
4	Швидкість руху кабіни, м/с	1,0	1,0	1,0	1,4
5	Електродвигун	ЛС-2-91-6/24 ШЛ		АС 2-91-6/24 ШЛ	АС 2-92-6/24 ШЛ
6	Потужність, кВт	5,0/1,25	7/1,25	7/1,75	10/2,5
7	Частота обертання, хв-2	990/222	930/220	930/200	930/200
8	Редуктор	РГЛ	РГЛ-180	РГЛ-180	РГЛ-180
9	Міжцентрова відстань, мм	160	180	180	180
10	Передавальне відношення	40	35	47	35
11	Тип гальма	Колодчатий			
12	Гальмівний момент, Н·м	80-100	100	100	260
13	Тип електромагніту	МП-201	МП-201	МП-201	МП-201
14	Внутрішній розмір кабіни, мм	980×1120×2100	1200×1400×2100	1200×2200×2100	2200×1200×2100

Мета і завдання дослідження. Оцінити сучасний стан міського ліфтового господарства, розробити заходи або надати рекомендації щодо покращення його технічного стану, диспетчеризації та енергозбереження.

Матеріали та методи дослідження. У м. Харкові (Україна) масове встановлення ліфтів для населення почалось 1980-1990 роки. Зараз в м. Харкові та області встановлено понад 12,5 тис. ліфтів, з яких понад 90 % вже відпрацювали свій нормативний строк експлуатації. Аналогічна ситуація в Луганській області (98 %), Херсонській (95 %), Кіровоградській (88 %), Черкаській (80 %). Найкращий в Україні результат демонструє Київська область (приблизно 46 %). Загальна кількість непрацюючих ліфтів в Україні становить приблизно 2,5 % від їх загальної кількості. Кількість непрацюючих ліфтів загалом зростає через фізичний та моральний знос елементів, недостатнє фінансування, низький рівень диспетчеризації, відсутність достатньої кількості кваліфікованих кадрів, вандалізм, крадіжки елементів ліфта і недосконалість законодавчої та нормативної бази. В місті Харкова можливо ще додати, що КП «Харківміськіліфт» займається не лише обслуговуванням ліфтів, а й електромережою в будівлях, що призводить до погіршення та суттєвого сповільнення заходів спрямованих на обслуговування ліфтів в місті [3-5].

Ліфт є найбільш енергозатратним елементом технічного оснащення будь-якого багатоповерхового будинку [9]. Це досить складна системою, яка споживає енергію не тільки під час руху, але навіть в той час, коли ліфтом ніхто не користується і він знаходиться в режимі очікування. Чим більше модернізована і вдосконалена модель підйомника, тим більше енергії їй необхідно: для освітлювальних приладів, для сигналізаційних пристроїв, для приладів зв'язку та спостереження, для системи вентиляції і так далі. У підсумку – експлуатація кожного окремо взятого ліфта обходиться досить дорогою А в масштабах цілої країни подібна енергоємність ліфтового обладнання перетворюється на справжнісіньку проблему.

Сучасні тенденції з енергоефективності та ресурсозбереження диктують світовій ліфтовій промисловості умови, які б задовольнили потреби багатьох країн світу. Вартість та строки окупності таких електромеханічних систем залежать від інтенсивності користування, індивідуальних потреб населення та комплектації.

Підраховано, що енергозберігаючі ліфти дозволяють економити на електроенергії від 20 до 60% витрат. Конкретні дані залежать від типу, моделі технологічного устрою. Як зазначено в [10], досягається економія за рахунок застосування в конструкції ліфтів безредукторних приводів, частотних перетворювачів, силових ліній, запобіжників більш низької потужності.

Також важливою складовою енергозбереження є оснащення підйомної машини пристроями регенерації. Їх функціонування гарантує до 20% економії електроенергії. Працює система таким чином: що вивільняється в момент гальмування ліфтової кабіни енергія, завдяки безредукторному приводу, перетворюється в електричний струм. Останній використовується для живлення підйомної системи. еcodiskРяд виробників ліфтового обладнання використовують в цілях економії також двері з синхронним магнітним двигуном, високоефективні планетарні редуктори. Крім цього, сучасні підйомні машини оснащуються інтелектуальними системами контролю. Останні дозволяють автоматично відключати привід під час так званого робочого простою кабіни (коли ліфт для перевезення пасажирів або вантажів не використовується). Системи контролю забезпечують при необхідності і максимально швидкий початок роботи обладнання – енергозберігаючі ліфти запускаються протягом декількох секунд. Пробний цикл роботи при цьому не проводиться. Деякі розробники оснащують ліфтове обладнання спеціальним регулятором швидкості, який відповідає за живлення одношвидкісного двигуна головного приводу (лебідки). Подібний захід допоможе знизити споживання електрики приблизно на 34%.

Основна перевага енергозберігаючих технологій в секторі ліфтового сервісу зрозуміло. Однак їм впровадження таких не обмежується. Енергозберігаючі технології в ліфтах мають ряд так званих «побічних» переваг. Сучасні перетворювачі частоти забезпечують плавність перехідних процесів в складній ліфтової механіці. Це, в свою чергу, працює на збільшення експлуатаційного строку служби окремих механізмів і вузлів. В кінцевому підсумку застосування енергозберігаючих технологій знижує витрати на технічне обслуговування підйомних систем. Ефект отримав назву «подвійний економії».

Ліфтові елементи (редуктори, електродвигуни, канати, гальма і канатоведучих шківів), раніше потребували заміни раз в десять або п'ять (залежно від моделі) років, сьогодні можуть служити втричі довше. Одношвидкісні двигуни, на відміну від своїх двошвидкісних попередників, мають меншу вагу, розмір, вартість. Крім того, обладнання відрізняється істотно більшою плавністю розгону-гальмування кабіни. У практичному призначеному для користувача аспекті це дозволяє підвищити комфортність ліфта за рахунок зниження шумових і вібраційних ефектів. Маса лебідки підйомної машини значно зменшується за рахунок відсутності маховика. У два-три рази економити енергію дозволяє зниження пускових струмів двигуна. Останній за рахунок цього менше нагрівається, довше зношується.

Завдяки сучасним перетворювачам частоти досягається плавність перехідних процесів в ліфтовій механіці, що в свою чергу сприяє збільшенню терміну експлуатації окремих вузлових елементів і механізмів. Це веде до зниження витрат на технічне обслуговування. Так, в ліфтовому обладнанні елементи, які раніше потрібно було замінювати раз в п'ять-десять років,

в сучасних моделях можуть прослужити до двадцяти п'яти років (мова йде про редукторах, електродвигуні, канатах, гальмах і канатотяговому шківі).

Одношвидкісний електродвигун, на відміну від свого попередника - двохшвидкісного електричного двигуна, не тільки має менші розміри і вагу, але і коштує значно дешевше. До того ж, таке обладнання відрізняється більшою плавністю розгону і гальмування кабіни, а це означає менше шумових ефектів і вібрацій, що в цілому робить поїздку в ліфті більш комфортною.

Через відсутність маховика значно зменшується маса ліфтової лебідки. Зниження пускових струмів в двигуні в два-три рази економить електроенергію при пуску кабіни і сприяє зниженню температури нагріву двигуна, що в свою чергу підвищує його ресурс роботи. І в результаті, хоча ціна на енергозберігаючі ліфти трохи вище, ніж на «звичайні», їх термін окупності значно менше. Але головне, крім вищеописаних достоїнств такі ліфти не просто економлять енергію, а ще й повертають її в систему енергозбереження будівлі, як це показано в [11,12]

Яскравим прикладом для України є ліфт GeN2.Класичне верхнє розташування машинного приміщення дозволяє розміщувати ліфт GeN2 Premier в стандартних шахтах, традиційних для вітчизняного ринку. Такий спосіб дозволяє економити простір шахти і вмістити кабіну великої місткості в маленьку шахту. Завдяки застосуванню армованих сталевими канатами поліуретанових ременів, конструкція лебідки займає вдвічі менше площі в порівнянні зі звичайною редукторною лебідки. Лебідка встановлена на гумових ізолюючих прокладках малOSHUMNA безредукторна лебідка знижує вібрації і мінімізує рівень шуму в прилеглих приміщеннях., що наведено в [12,13]

Поліуретанові тягові ремені і безредукторна лебідка з герметично закритими підшипниками не вимагають мастила, що забруднює навколишнє середовище. Застосування гнучких армованих поліуретанових ременів замість звичайних сталевих канатів забезпечує плавне і безшумне переміщення кабіни ліфта. Плоскі поліуретанові ремені GeN2 PREMIER протестовані на 120 млн. Циклів безперебійної роботи.

Система PULSE постійно вимірює електричний опір сталевих канатиків (сердечників), що знаходяться всередині поліуретанового ремня. Якщо канатики по тій або іншій причині починають руйнуватися, їх опір змінюється. Це означає, що пора ставити новий ремінь. [11]

Запатентована система евакуації, що працює від акумуляторної батареї, з електронним контролем швидкості руху кабіни, забезпечує безпечну евакуацію застряглих в кабіні пасажирів в разі відключення електроенергії. Електронна система PULSETM здійснює контроль над станом і цілісністю сталевих канатів поліуретанового ремня 24 години на добу 7 днів на тиждень, заздалегідь попереджаючи про необхідність заміни ременів

Як зазначається в [14] компактна безредукторна лебідка з енергозберігаючим приводом ReGen дозволяє економити до 75% електроенергії в порівнянні зі звичайною ліфтовою системою без регенеративного приводу. Нове світлодіодне освітлення, пропонуване як стандартне для ліфтових систем GEN2 PREMIER, скорочує споживання енергії і служить до 10 разів довше, ніж звичайні люмінесцентні лампи. Режим автоматичного відключення, в разі відсутності викликів на ліфт, робить світлодіодне освітлення до 80% більш ефективним в порівнянні з традиційним.

У ліфтах Otis GeN2 використовується рекупераційний привід ReGen. За допомогою силової електроніки вироблена двигуном електроенергія набуває стандартні напруга і частоту і повертається в електричну мережу будівлі. Про рекупераційних режимі ліфта повідомляють індикатори в кабіні.

Привід ReGen Регенерує енергію і постачає чистою енергією інші системи будівлі, роблячи ліфт Gen2 Flex на 75% більш економічним і на 40% менше енерговитратним, ніж нерегенеративного системи без машинного приміщення. Довговічне світлодіодне освітлення Знижує енергоспоживання і служить в 10 разів довше, ніж звичайні флуоресцентні лампи. Сплячий режим Коли ліфт не використовується, освітлення і вентилятори відключаються, і запускаються натисканням кнопки виклику. Сплячий режим робить світлодіодне освітлення на 75% більш економічним, ніж звичайні системи. Без необхідності мастила Лебідка і поліуретанові армовані ремені ліфта Gen2 не вимагають додаткового змащення, що позбавляє від необхідності зберігання, деактивації та утилізації небезпечних відходів. Низьковольтні ланцюги управління Ця стандартна

конструктивна особливість знижує потужність, споживану в режимі очікування, на 50 відсотків в порівнянні звичайними машинами, і захищає персонал в процесі проведення ТО.

За останні роки для покращення роботи ліфтів почали перетворювачі частоти (ПЧ) набуває все більшу популярність. Ліфтова галузь також перейняла цю тенденцію. ПЧ забезпечує плавність ходу, зменшує пускові струми та плавність перехідних процесів, графіки наведені на рисунку 1 (прискорення або гальмування майже не відчуються), це також позитивно впливає на знос елементів кінематичних ланок системи, підвищує надійність та довговічність використання ліфта, нівелює ударні моменти (які виникають в двошвидкісних електроприводах при переході на знижену швидкість руху). Використання такого типу керування підвищує комфортність для пасажирів.

Одною з найважливіших переваг частотного керування у порівнянні з класичними системами керування є його економічність. Використання перетворювача частоти в ліфтовій галузі дозволяє зменшити витрати електричної енергії на 40-60 %, це досягається зниженням моменту інерції лебідки головного приводу ліфта, за рахунок видалення маховика з ведучого валу. Перетворювач частоти дозволяє використовувати одношвидкісні асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором, вони мають менші габарити та вагу, а маховий момент таких двигунів значно менший ніж аналогічні двошвидкісні двигуни. Данні дослідження перехідних процесів показані на рис.1[15-17].

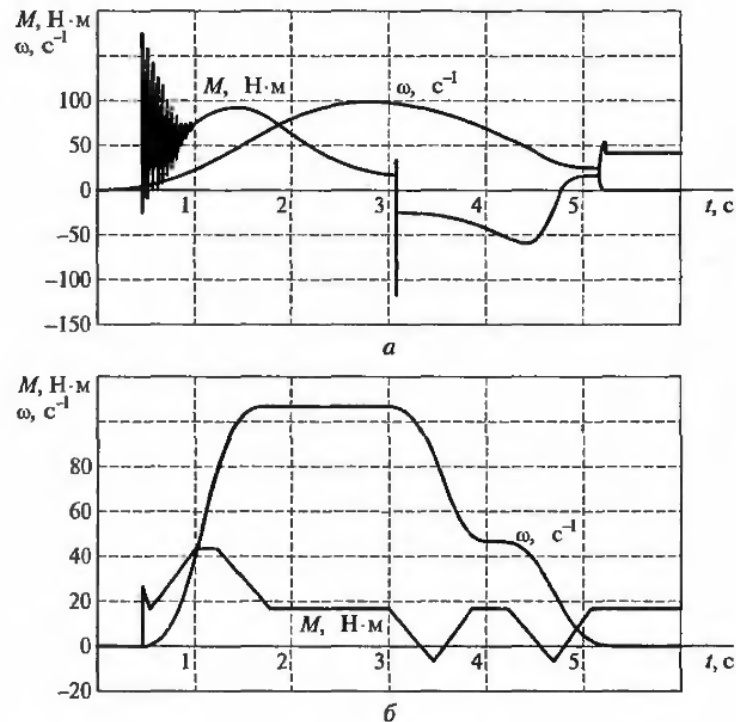


Рис. 1. Перехідні процеси в електроприводі ліфта при підйомі на один поверх з двошвидкісним нерегульованим (а) і частотно-керованим (б) електроприводом [9]

Частка руху ліфтової кабіни на швидкості дотягування до рівня точної зупинки досить не велика і тому існує необхідність реалізувати точну зупинку кабіни ліфта без залучення частотного перетворювача, з закладеними характеристиками комфортності, надійності та відсутності ударного моменту та з використанням одношвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Система керування ліфта з перетворювачем частоти здатна точно виконувати та дотримуватись закладених алгоритмів руху, прискорення та точної зупинки кабіни на поверсі, в межах допустимої похибки. При традиційних засобах процес реалізується шляхом переходу на

знижену швидкість двигуна, з якою кабіна доїжджає до датчика точної зупинки. Саме для реалізації точної зупинки в ліфтовій галузі використовують двошвидкісні двигуни.

Відмова від масового встановлення ПЧ на житлові споруди обґрунтована його вартістю та великим строком окупності (що залежить від вантажопідйомності та інтенсивності користування), який може коливатись від 3 до 8 років [9].

Одним з можливих рішень, що одночасно охоплює всі вищенаведені потреби та є економічно обґрунтованим, є використання замість двошвидкісного нерегульованого електроприводу – одношвидкісний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором за рахунок використання керованого динамічного гальмування.

Висновки. На підставі проведеного дослідження можна зробити такі висновки та надати рекомендації:

1. В умовах бюджетного дефіциту організаціям, що обслуговують ліфти необхідно самостійно намагатись знаходити кошти для оновлення або модернізації цього виду транспорту, що призведе до росту прискорення строків виконання технічних робіт. Наприклад, таким джерелом фінансування можуть бути приватні інвестиції.

2. За відсутності достатнього фінансування організації з обслуговування можуть отримувати необхідне обладнання шляхом лізингу.

3. Важливим питанням є підвищення рівня підготовки кадрів для якісного технічного обслуговування ліфтів.

4. Необхідна поетапна заміна ліфтів, які відпрацювали свій нормативний строк експлуатації (в першу чергу це ліфти, що відпрацювали понад 35 років, потім 25 років і т. д.).

5. В основу оновлених ліфтів необхідно закласти сучасні інноваційні технології, які б забезпечили енергозбереження та були обладнані новітніми методами контролю, моніторингу технічного стану ліфтової системи дистанційно, це суттєво підвищить рівень якості та швидкості обслуговування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пилипенко І. О. Основні організаційні заходи відтворення основних засобів підприємств ліфтового господарства/Комунальне господарство міст. Серія : Економічні науки. 2019. Вип. 2. С. 47-52.
2. Сайт «БИЗНЕС ЦЕНЗОР». URL: https://biz.censor.net.ua/news/3143675/v_ukraine_65_liftov_rabotayut_ bolee_25 лет_minregion (дата звернення : 09.03.2021).
3. Офіційний портал «ВЕРХОВНА РАДА УКРАЇНИ» URL: http://lib.rada.gov.ua/DocDescription?doc_id=145300 (дата звернення : 09.03.2021).
4. Сайт «Последние новости Харькова – РЕДПОСТ» URL: <http://dozor.kharkov.ua/news/jkh/1201345.html>(дата звернення : 09.03.2021).
5. Сайт «УКРАИНА КОМУНАЛЬНАЯ» URL: <http://osbb.jkg-portal.com.ua/ru/publication/one/-lftove-gospodarstvo-modernizacii-ne-bude-44169>(дата звернення : 09.03.2021).
6. Наказ Держжилкомунгоспу № 102 Примірний перелік послуг з утримання ліфтів: від 11.05.2005 р.
7. Михальчук В. Как восстановит лифтовое хозяйство Украины // Подъемные сооружения. Специальная техника. 2011. №11/12. С. 26-27.
8. Волков Д. П., Ионов А. А., Чутчиков П. И. Атлас конструкций лифтов. Москва: АСВ, 2003. 156 с.
9. Сайт «Асинхронный электропривод лифта» URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/38939/1/TPU370816.pdf> (дата звернення : 09.03.2021).
10. Сайт «МОГИЛЕВСКИЙ ЗАВОД ЛИФТОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ» URL: <https://www.liftmach.by/catalog/lebyedki-liftov>(дата звернення : 09.03.2021).
11. Сайт «Лифт Эксперт» URL: <https://liftexpert.com.ua/top-novosti-ru/ekonomit-ekonomit-i-esche-raz-ekonomit.html> (дата звернення : 09.03.2021).
12. Сайт «Креатив мастер» URL: <https://platform-master.ru/products/lebedka-lifta-otis-gen-2-bezreduktornaya-na-trimnua> (дата звернення : 09.03.2021).
13. Сайт «Лифт монтаж» URL: <https://montajlift.ru/10-otis.html> (дата звернення : 09.03.2021).
14. Сайт «Популярная механика» URL: <https://www.popmech.ru/technologies/235843-samye-neobychnye-tehnologii-liftakh/> (дата звернення : 09.03.2021).
15. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Москва : ИЦ Академия, 2004. 256 с.

16. Наказ Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства №369 Про затвердження Порядку встановлення вартості технічного обслуговування ліфтів та систем диспетчеризації від 9.11.2006 р.
17. Кравец М. Тенденції та перспективи ліфтового господарства України. // Ліфт Експерт. 2013. №5. С. 32.

REFERENCES

1. Pylypenko, I. O. (2019) Osnovni orhanizatsiyni zakhody vidtvorennya osnovnykh zasobiv pidpnyemstv liftovoho hospodarstva [The main organizational measures for the reproduction of fixed assets of the elevator industry]. *Komunal'ne hospodarstvo mist. Seriya : Ekonomichni nauky.– Municipal utilities. Series: Economic Sciences*, 2. 47-52. [in Ukrainian].
2. Sait «BYZNES TSENZOR» [BUSINESS CENSOR website] https://biz.censor.net.ua/news/3143675/v_ukraine_65_liftov_rabotayut_bolee_25_let_minregion Retrieved from https://biz.censor.net.ua/news/3143675/v_ukraine_65_liftov_rabotayut_bolee_25_let_minregion [in Ukrainian]
3. Sait Ofitsiynyy portal «VERKHOVNA RADA UKRAYINY» [Official Portal of the Verkhovna Rada of Ukraine] http://lib.rada.gov.ua/DocDescription?doc_id=145300 Retrieved from http://lib.rada.gov.ua/DocDescription?doc_id=145300 [in Ukrainian]
4. Sait «Posledniye novosti Khar'kova – REDPOST» [Latest news of Kharkov – REDPOST] <http://dozor.kharkov.ua/news/jkh/1201345.html> Retrieved from <http://dozor.kharkov.ua/news/jkh/1201345.html> [in Russian]
5. Sait «UKRAINA KOMMUNAL'NAYA» [UKRAINE KOMMUNALNAYA] <http://osbb.jkg-portal.com.ua/ru/publication/one/-lftove-gospodarstvo-modernzacji-ne-bude-44169> Retrieved from <http://osbb.jkg-portal.com.ua/ru/publication/one/-lftove-gospodarstvo-modernzacji-ne-bude-44169> [in Russian]
6. Nakaz Derzhylkomunhospu № 102 Prymirnyy perelik posluh z utrymannya liftiv: vid 11.05.2005 r. [Order of the State Committee for Communal Services № 102 Approximate list of elevator maintenance services: dated 11.05.2005] (2005, may,11) [in Ukrainian]
7. Mikhal'chuk, V. (2011) Kak vosstanovit' liftovoye khozyaystvo Ukrainy [How to restore the lift economy in Ukraine // Lifting structures]. *Pod'yemnyye sooruzheniya. Spetsial'naya tekhnika – Lifting structures. Special equipment*, 11/12, 26-27
8. Volkov, D.P., & Ionov, A.A., & Chutchikov, P.I. (2003) *Atlas konstruksiy liftov [Atlas of elevator structures]*. Moskva: ASV [in Russian]
9. Sait «Asinkhronnyy elektroprivod lifta» [Asynchronous electric drive of the elevator] <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/38939/1/TPU370816.pdf> Retrieved from <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/38939/1/TPU370816.pdf> [in Russian]
10. Sait «MOGILEVSKIY ZAVOD LIFTOVOGO MASHINOSTROYENIYA» [MOGILEV LIFT ENGINEERING PLANT] <https://www.liftmach.by/catalog/lebyedki-liftov> Retrieved from <https://www.liftmach.by/catalog/lebyedki-liftov> [in Russian]
11. Sait «Lift Ekspert» [Lift Expert] <https://liftexpert.com.ua/top-novosti-ru/ekonomit-ekonomit-i-esche-raz-ekonomit.html> Retrieved from <https://liftexpert.com.ua/top-novosti-ru/ekonomit-ekonomit-i-esche-raz-ekonomit.html> [in Russian]
12. Sait «Kreativ master» [Creative Master] <https://platform-master.ru/products/lebedka-lifta-otis-gen-2-bezreduktornaya-na-tri-remnya>. Retrieved from <https://platform-master.ru/products/lebedka-lifta-otis-gen-2-bezreduktornaya-na-tri-remnya>. [in Russian]
13. Sait «Lift montazh» [Elevator installation] <https://montajlift.ru/10-otis.html> Retrieved from <https://montajlift.ru/10-otis.html> [in Russian]
14. Sait «Populyarnaya mekhanika» [Popular Mechanics] <https://www.popmech.ru/technologies/235843-samyeneobychnye-tekhnologii-v-liftakh/>. Retrieved from <https://www.popmech.ru/technologies/235843-samyeneobychnye-tekhnologii-v-liftakh/> [in Russian]
15. Braslavskiy, I.YA., & Ishmatov, Z.SH., & Polyakov, V.N. (2004) *Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod [Energy-saving asynchronous electric drive]: Moskva : ITS Akademiya* [in Russian]
16. Nakaz Ministerstva budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva №369 Pro zatverdzhennya Poryadku vstanovlennya vartosti tekhnichnoho obsluhovuvannya liftiv ta system dyspetcheryzatsiyi vid 9.11.2006 r. [Order of the Ministry of Construction, Architecture and Housing and Communal Services №369 On approval of the Procedure for determining the cost of maintenance of elevators and dispatching systems from 9.11.2006] (2006, November 9) [in Ukrainian]
17. Kravets, M. (2013) Tendentsiyi ta perspektyvy liftovoho hospodarstva Ukrainy [rends and prospects of the elevator industry of Ukraine]. *Lift Ekspert – Elevator Expert*, 5, 32. [in Ukrainian].

*Yurii Martynov*¹, *Oleksandr Petrenko*², *Liubarskyi Borys*³

¹ Ph.D. student, Department of Electric Transport, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov Street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Professor, Department of Electric Transport, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov Street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

³ Professor, Department of Electric Transport and Diesel Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Kirpychova, 2, Kharkiv, 61002, 04071, Ukraine

ASSESSMENT AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE LIFT ECONOMY OF UKRAINE

The article assesses the current state of the city elevator industry, analyzes statistical data that reflect the number of overtime workers in accordance with the established norms of time norms of safe operation and non-working elevators. A comparative analysis of the characteristics of typical elevator drives. It is noted that on the basis of the study it is possible to draw the following conclusions and provide recommendations. In the conditions of budget deficit the organizations servicing elevators need to try to find means for updating or modernization of this type of transport independently that will lead to growth of acceleration of terms of performance of technical works. For example, private investment can be such a source of funding. In the absence of sufficient funding, service organizations can lease the necessary equipment. An important issue is to increase the level of training for quality maintenance of elevators. It is necessary to gradually replace elevators that have served their standard service life (first of all, these are elevators that have worked for more than 35 years, then 25 years, and so on). The renewed elevators should be based on modern innovative technologies that would ensure energy savings and be equipped with the latest methods of control, monitoring the technical condition of the elevator system remotely, it will significantly increase the level of quality and speed of service.

Keywords: *elevator electric drive, technical condition of elevator economy, energy saving, frequency converter.*

Антон Озулу^{1*}, Борис Любарський²

¹ Аспірант, кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9524-8006>

² Професор, кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2985-7345>

* Автор, відповідальний за листування: anton.ozulu96@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ АМОРТИЗАТОРИ

Стаття розглядає питання системи ходової частини швидкісного електропоїзда з нахилом кузова та системою рекуперації коливань. Авторами було розглянуто основні системи підвищення кузова електропоїзда, які використовуються на даний момент. Була висунута основна проблематика цих систем підвищення. Приділяється увага використанню пневморесорного підвищення. Розглянуто люльче підвищення електровоза ВЛ80, та конструкція самого візка. Визначені основні критерії оцінки ефективності перспективних електромеханічних амортизаторів за якими проводиться порівняльна характеристика. У статті охарактеризовано перспективний електромеханічний амортизатор на базі синхронного лінійного двигуна, який може забезпечити як нахил кузова, так і гасіння та рекуперацію коливань. Розглянута функціональна схема керування двома синхронними лінійними двигунами, які встановлені на одному візку. Описана робота системи керування синхронними лінійними двигунами. Описана конструкція лінійного двигуна постійного струму з постійними магнітами. Розглянута функціональна схема керування двома лінійними двигунами постійного струму з постійними магнітами. Приведена конструкція електромеханічного амортизатора компанії «Bose». Проведена порівняльна характеристика трьох перспективних електромеханічних амортизаторів за шістьма критеріями. Зроблено висновки та обрано електромеханічний амортизатор, який забезпечує основні потреби рухомого складу.

Ключові слова: електромеханічний амортизатор, рекуперація, нахил кузова, електрорухомий склад, коливання.

Вступ. Сьогодні основним елементом ходової частини електрорухомого складу є система ресорного підвищення. Альтернативним підходом для підвищення динамічних показників ходових частин, та швидкісних характеристик електрорухомого складу є застосування електромеханічних амортизаторів, які мають можливість рекуперувати частину енергії коливань в електричну енергію з подальшою можливістю її використання на рухомому складі, та виконувати функцію нахилу кузова [8].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. У швидкісних поїздах як привід нахилу кузова використовуються пневматичні, гідравлічні та електромеханічні системи, які мають низьку переваг та недоліків. Гідравлічна система має велику кількість магістралей і апаратів, які працюють під високим тиском, що знижує загальну надійність системи і підвищує ймовірність витоків робочої рідини. Пневматична система, пристрій якої, по суті, аналогічно гідравлічній, має збільшений час спрацьовування внаслідок невисокої щільності робочого середовища – повітря. Однак її елементи безпосередньо присутні у кожному типі пневматичного ресорного підвищення без якого вже неможливо уявити сучасні швидкісні електропоїзди. Електромеханічна система, що застосовується на сучасних поїздах, не

забезпечує можливість самостійного повернення кузова в початкове положення при відключенні живлення або інших аварійних ситуаціях, що безпосередньо впливає на безпеку руху [1, 2, 5]. Також, для роботи описаних систем нахилу кузова необхідна багата кількість енергії. Завдяки встановлення електромеханічної системи нахилу кузова та рекуперації коливань у ходову частину електровозів, можливо підвищити пропускну здатність залізниці, цим самим вирішується проблема тривалих пасажирських перевезень в Україні.

Мета і завдання дослідження. Визначення основних характеристик електромеханічних амортизаторів з системою нахилу кузова, та визначення найбільш енергоефективної системи для використання у ходовій частині електрорухомого складу. За для вирішення вказаних проблем, буде розглянуто три види систем нахилу кузова та рекуперації коливань.

Матеріали та методи дослідження. На даний час, електромеханічний привод – це сукупність крокового електродвигуна, редуктора і гвинтової пари, що забезпечує лінійне переміщення штоку. Наявність гвинтової пари в цьому типі приводу виключає самоповернення кузова в початкове положення внаслідок її заклинювання при відключенні живлення. Проте, такий тип силового приводу має збалансовані масогабаритні показники, високу швидкодію, малу потребу в обслуговуванні, а також широкий діапазон регулювання. Це зумовило застосування електромеханічного приводу на більшості поїздів з нахилом кузовів, що виробляються в даний час.

Пневморесорне підвішування забезпечує вимогу електрорухомого складу, але потребує додаткового обладнання та його обслуговування, тому характеристики електромеханічного амортизатора будуть розглянуті у порівнянні з пневморесорним амортизатором [7,11].

Для розгляду питання електромеханічних амортизаторів буде використана ходова частина з люльковим підвішуванням, а саме візок електровоза ВЛ80, модель якого подана на рис. 1. Основними критеріями оцінки відповідності вимогам системи рекуперації коливань на нахилу кузова є: коефіцієнт демпфування амортизатора, діапазон робочої частота, тягова характеристика (сила) та потужність.

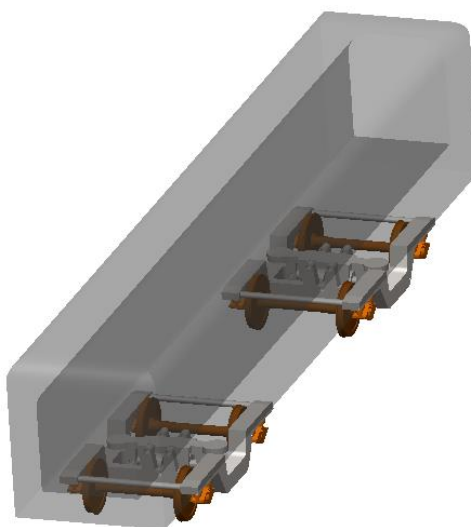


Рис. 1. Модель вагона ВЛ80

Першим, як електромеханічний амортизатор, розглянуто синхронний лінійний двигун, який можливо використовувати як для нахилу кузова, так і для накопичування енергії. Лінійний двигун складається з двох компонентів (рис. 2): 1 – статор, 2 – слайдер з постійними магнітами (ротор).

Працює двигун наступним чином. На обмотки статора подається трифазну напругу (фази зміщені на 120 градусів). У міру наростання амплітуди синусоїди в одній фазі, буде пропорційно збільшуватися струм і електромагнітне поле, створюване навколо обмотки. З

огляду на те, що синусоїда наростає в усіх трьох фазах двигуна по черзі, пік максимального електромагнітного поля буде зміщуватися від однієї обмотки до іншої. Магнітне поле слайдера (ротора) по черзі притягається власними полюсами до протилежного за знаком вектору поля статора.

Перевагами використання синхронного лінійного двигуна є простота конструкції, нескладна система керування та велика швидкість виконання нахилу кузова. Для керування можливо використовувати звичайний перетворювач частоти, задаючи вихідну частоту 0,5 -2 Гц [3]. Якщо порівнювати синхронний лінійний двигун з асинхронним, то можливо визначити переваги синхронного двигуна в тому, що він спорожній працювати з великими повітряними зазорами та має $\cos\phi$ близький до одиниці. При цьому ККД (коефіцієнт корисної дії) може бути до 96 %.

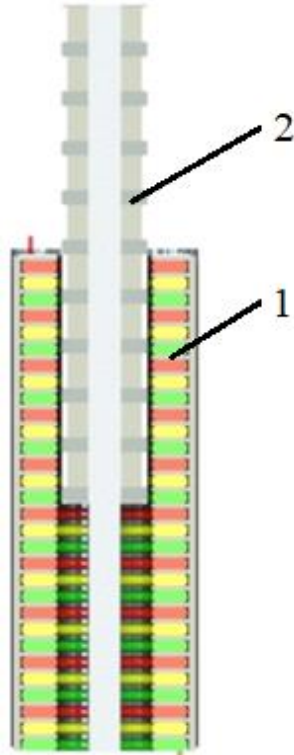


Рис. 2. Синхронний лінійний двигун:

1 – статор, 2 – слайдер з постійними магнітами (ротор).

Функціональна схема системи керування двома синхронними лінійними двигунами, які виконують нахил кузова одного візка, подана на рис. 3. Керування двигунами виконується таким чином: на діодний випрямляч (блок 1) подається зміна напруга, після чого отримується на виході блоку напруга постійного струму та переходить до ланки постійного струму (ЛПС – блок 2). У ЛПС входить пасивний фільтр, а саме: конденсатор та котушка індуктивності. ЛПС під'єднується до блоків транзисторів (блок 4, 5), саме які й подають напругу на синхронні лінійні двигуни (блок 6, 7). Керування транзисторами виконується блоком мікроконтролера (МК – блок 3), при цьому оптимальна частота широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) – 3 кГц. Амплітуда, яка подається на двигуни керується завдяки зміні скважності ШИМ [14,15].

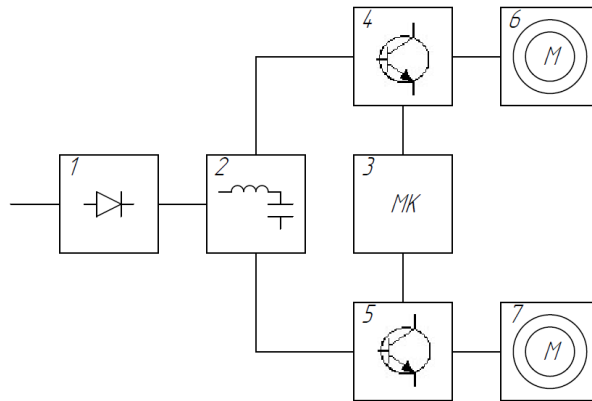


Рис. 3. Функціональна схема керування синхронними лінійними двигунами

Як другий вид двигуна для системи нахилу кузова та рекуперації коливань, розглянуто лінійний двигун постійного струму з постійними магнітами [4,6], який подано на рис. 4, де: 1 – якорь, 2 – постійний магніт, 3 – обмотка якоря, 4 – станина.

Принцип дії амортизатора складається у наступному. Постійний магніт має радіальне намагнічення. Силкові магнітні лінії потоку збудження замикаються по колу: повітряний зазор з якорем та обмоткою якорю, спинка станини, станина, постійний магніт. Потік збудження зчіплюється з обмоткою якоря, що розташована на немагнітному якорі. При руху якоря (до низу або до верху), що обумовлений зовнішніми динамічними силами коливання кузова та візка, якорь рухається. У обмотці якоря виникає ЕРС (електрорухома сила). При замкненні обмотки якоря на навантаження виникає струм якоря. У провідниках обмотки якоря зі струмом виникає сила, яка направлена супротив динамічної сили, що призводить до демпфування коливань кузова. На потік збудження впливає потік реакції якоря, що розмагнічує одну з половин магнітного кола станини (верхню чи нижню) в залежності від напрямлення руху якоря (донизу чи до верху), а іншу (протилежну) намагнічує, що може призвести до насичення магнітного кола та зменшення електромагнітної сили. Усі ці процеси доволі аналогічні процесам в уніполярній електричній машині постійного струму.

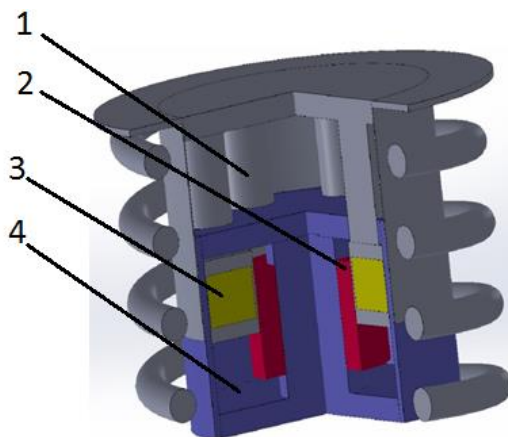


Рис. 4. Лінійний двигун постійного струму з постійними магнітами:

1 – якорь, 2 – постійний магніт, 3 – обмотка якоря, 4 – станина

Цей тип двигуна відрізняється своєю простотою конструкції. Обмотка статора має одну фазу, у той час як синхронний лінійний двигун має три фази.

Функціональна схема системи керування двома лінійними двигунами постійного струму показана на рис. 5. Керування двигунами виконується таким чином: на діодний випрямляч (блок 1) подається зміна напруга, після чого отримується на виході блоку напруга постійного струму та переходить до ланки постійного струму (ЛПС – блок 2). У ЛПС входить пасивний фільтр, а саме: конденсатор та котушка індуктивності. ЛПС під'єднується до блоків тиристорів (блок 4, 5), саме які й подають напругу на лінійні двигуни (блок 6, 7). Керування тиристорами виконується блоком мікроконтролера (МК – блок 3), при цьому оптимальна частота широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) – 1-3 кГц [13].

Схема керування схожа зі схемою керування синхронним лінійним двигуном, але відрізняється відсутністю транзисторів та наявністю тиристорів, що зменшує вартість системи керування. При цьому на силу практично не впливає положення якоря відповідно станини, що забезпечує стабільність сил демпфування при зазорах між кузовом та візком.

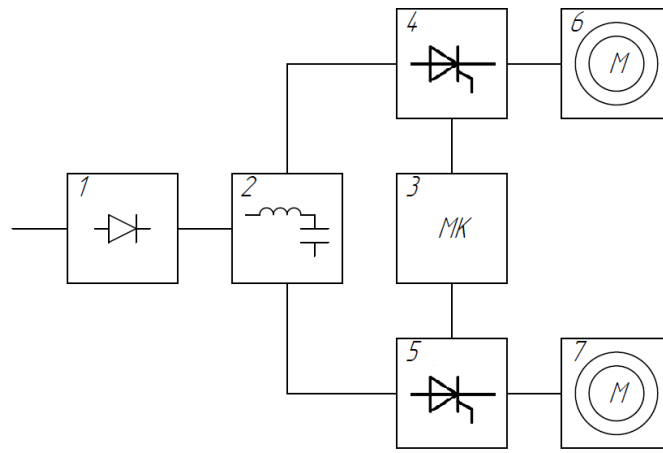


Рис. 5. Функціональна схема керування лінійного двигуна постійного струму

Прагнення щодо використання енергії коливань кузова транспортного засобу призвело в останні часи до створення електромеханічних системи гасіння коливань де в якості поглинаючого елемента виступає генеруюча електромеханічна система [9]. Найбільше поширення такі системи у автомобільному транспорті, тому третім розглянуто амортизатор «Bose» (Bose Suspension System), який показано на рис. 6, де: 1 – шток, 2 – постійний магніт, 3 – обмотка. Модель виготовлена в 1995 році [10,12]. У конструкції на базі седана Lexus LS400 пружинну підвіску замінили на торсіонну, а амортизатори – лінійними електродвигунами, якими через потужні підсилювачі керував комп'ютерний блок на основі інформації від датчиків ходу кожного з коліс. Ідея такої підвіски полягає в наступному: коли колесо опускається в яму під час відбою, електродвигун активно «допомагає» йому переміщатися вниз, а під час стиснення «втягує» колесо вгору. У роботі головна увага приділялася забезпеченню плавності руху автомобіля та зниження крену кузова при поворотах. Пропонується використовувати конструкцію електричного амортизатора, яка включає в себе кручений елемент, зовнішня частина якого виконана з електропровідного матеріалу. Магнітний елемент складається із стрижня, на центральній осі якого розташовані магніти. Зовнішня частина виконана таким чином, що до неї може увійти стрижень із магнітами. Стрижень із магнітами формує магнітне поле, величина якого залежить від того, наскільки введений стрижневий магніт. Корпус одним кінцем підключений до виведення магнітного з'єднання.

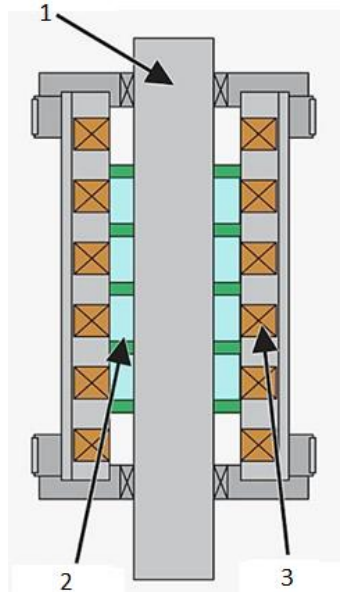


Рис. 6. Амортизатор «Bose»:
1 – шток, 2 – постійний магніт, 3 – обмотка

У таблиці 1 вказані основні характеристики лінійного двигуна, побудованого для використання у системі нахилу кузова.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця параметрів електромеханічних амортизаторів

№	Параметр	Синхронний лінійний двигун	Лінійний двигун постійного струму	Амортизатор «Bose»
1	Коефіцієнт демпфування	22,85 кН*с/м	25 кН*с/м	17,5 кН*с/м
2	Діапазон робочих частот	0,5 – 500 Гц	1 – 500 Гц	0,5 – 500 Гц
3	Сила	1600 Н	2000 Н	1250 Н
4	Питома сила	45 Н/кг	44 Н/кг	31 Н/кг
5	Потужність	2000 Вт	2500 Вт	н.д.
6	Питома потужність	57 Вт/кг	55 Н/кг	н.д.

Висновки. Виходячи з отриманих даних, можна сказати, що електромеханічні амортизатори спроможні конкурувати з пневморесорним та гідравлічним підвішуванням у складі ходової частини електропоїзда, а також, мають можливість регулювати силу демпфування в залежності від режимів руху транспортного засобу, що дає можливість не тільки утилізувати енергію коливань рухомого складу, а і повернути її до електричного кола транспортного засобу з можливістю повторного використання. При цьому, одна й та ж сама система може забезпечити нахил кузова електропоїзда без додаткового обладнання. Виходячи з наведених характеристик, можливо сказати, що лінійний синхронний двигун, та амортизатор постійного струму можуть забезпечити потреби електровозбудування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Омеляненко В.И., Любарский Б.Г., Якунин Д.И. Моделирование механизма наклона кузова с приводом на базе линейного электродвигателя // *Залізничний транспорт України*. 2011. № 2. С. 48-52.
2. Єрціян Б. Х. Синтез комбінованої системи нахилу кузова швидкісного електричного рухомого складу : дис. Багіша Хачиковича Єрціяна д-ра технічних. наук : 05.22.09 / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т", Харків, 2016. 189 с.

3. O. Demydov, B. Liubarskyi, V. Domanskyi, M. Glebova, D. Iakunin, A. Tyshchenko. Determination of optimal parameters of the pulse width modulation of the 4qs transducer for electric rolling stock // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*, 2018, P. 29-38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143789>.
4. B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, T. Pavlenko, D. Iakunin, S. Yatsko, Y. Vashchenko. Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*, 2019, P. 16-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176304>
5. M. Yu. Zalugin, B. A. Lyubarsky, S. N. Shuklinov, N. G. Mikhalevich, D. N. Leontiev. Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor // *Наука и техника*. 2018. №5. С. 440-446. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-440-446>.
6. B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, B. Yeritsyan, Y. Kovalchuk, L. Overianova. Procedure for modeling dynamic processes of the electromechanical shock absorber in a subway car // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*, 2019, P. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181117>.
7. P. Karimi Eskandary, A. Khajepour, A. Wong, M. Ansari. Analysis and optimization of air suspension system with independent height and stiffness tuning // *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 17, No. 5, 2018, P. 807–816. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0079-9>.
8. Якунин Д.И., Ерицяц Б.Х., Шаповалов Д.Ю. Развитие имитационного моделирования электромеханической системы привода наклона кузовов // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. 2012. № 20. С. 98–103.
9. Lei Zuo. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions // *Smart Materials and Structures*. 2010. №19. P. 1–11.
10. Сергиенко А.Н., Любарский Б.Г., Самородов В.Б. Анализ конструкций электромеханических преобразователей и выбор схемы электроамортизатора неподрессоренных масс транспортного средства // *Сб. науч. тр. ХНАДУ «Автомобильный транспорт»*. 2012. № 31. С. 18–25.
11. Сердобинцев Е.В., Ёе Вин Хан. Вертикальные колебания метровагона с пневмоподвешиванием // *Мир транспорта*. 2013, № 2. С. 78–84.
18. Bart L.J. Gysen, Tom P.J. van der Sande, Johan J.H. Paulides and Elena A. Lomonova. Efficiency of a Regenerative Direct-Drive Electromagnetic Active Suspension // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011, № 60 (4), P. 1384–1393. DOI: <https://doi.org/10.1109/tvt.2011.2131160>
19. Kolpakch'yan, P. G., Shcherbakov, V. G., Kochin, A. E., Shaikhiev, A. R. Sensorless control of a linear reciprocating switchedreluctance electric machine // *Russian Electrical Engineering*. 2017. № 88 (6). P. 366–371. DOI: <https://doi.org/10.3103/s1068371217060086>.
20. Y. Xu, J. Zhao, J. Huang. Multiple Linear Motor Control System Based on FPGA // *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) : Hangzhou, Oct. 22-25, 2014, China*. P. 2327-2331.
21. Kimura F., Yamamoto A., Higuchi. FPGA implementation of a signal synthesizer for driving a high-power electrostatic motor // *Industrial Electronics (ISIE)*. 2011. P. 1295-1300.

REFERENCES

1. Omelyanenko V.I., Lyubarsky B.G., Yakunin D.I. (2011). Modelirovaniye mekhanizma naklona kuzova s privodom na baze lineynogo elektrodvigatelya [Modeling of the body tilt mechanism with a drive based on a linear electric motor]. *Zaluznychnyy transport Ukrayiny – Railway transport of Ukraine*, 2, 48–52 [in Russian].
2. Yeritsyan B.H. (2016). Syntez kombinovanoi systemy nakhyly kuzova shvydkisnoho elektrychnoho rukhomoho skladu [Synthesis of the combined body tilt system of high-speed electric rolling stock]. *Doctor's thesis*. Kharkiv: NTU "KhPI" [in Ukrainian].
3. O. Demydov, B. Liubarskyi, V. Domanskyi, M. Glebova, D. Iakunin, & A. Tyshchenko (2018). Determination of optimal parameters of the pulse width modulation of the 4qs transducer for electric rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*, 29-38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143789>.
4. B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, T. Pavlenko, D. Iakunin, S. Yatsko, & Y. Vashchenko (2019). Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*, 16-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176304>
5. M. Yu. Zalugin, B. A. Lyubarsky, S. N. Shuklinov, N. G. Mikhalevich, & D. N. Leontiev (2018). Study of Proportional Pressure Modulator on the Basis of Electromagnetic-Type Linear Motor. *Science and technology*, 5, 440-446. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-5-440-446>.
6. B. Liubarskyi, N. Lukashova, O. Petrenko, B. Yeritsyan, Y. Kovalchuk, & L. Overianova (2019). Procedure for modeling dynamic processes of the electromechanical shock absorber in a subway car. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774*, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181117>.
7. P. Karimi Eskandary, A. Khajepour, A. Wong, M. Ansari (2018). Analysis and optimization of air suspension system with independent height and stiffness tuning. *International Journal of Automotive Technology*, 5, 807–816. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0079-9>.

8. Yakunin D.I., Yeritsyan B.H., Shapovalov D.Yu. (2012). Razvitiye imitatsionnogo modelirovaniya elektromekhanicheskoy sistemy privoda naklona kuzovov [Development of simulation modeling of the electromechanical system of the drive of an inclination of bodies]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "Kharkivs'kyi politekhnichnyi instytut" – Bulletin of National technical university "Kharkiv polytechnic institute"*, 20, 98–103 [in Russian].

9. Lei Zuo (2010). Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions. *Smart Materials and Structures*, 19, 1–11.

10. Sergienko A.N., Lyubarskiy B.G., Samorodov V.B. (2012). Analiz konstruksiy elektromekhanicheskikh preobrazovateley i vybor skhemy elektroamortizatora nepodressorenykh mass transportnogo sredstva [Analysis of the designs of electromechanical converters and the choice of the electric shock absorber circuit for the unsprung masses of the vehicle]. *Sb. nauch. tr. KHNADU "Avtomobil'nyy transport" – Col. scientific. tr. KhNAHU "Automobile transport"*, 31, 18–25 [in Russian].

11. Serdobintsev, E. V., Ye Win Han (2013). Vertikal'nyye kolebaniya metrovagona s pnevmo podveshivaniyem [Vertical Oscillations of the Metro Wagon with Pneumatic Suspension]. *Mir transporta – World of transport*, 2, 78–84 [in Russian].

1. Bart L.J. Gysen, Tom P.J. van der Sande, Johan J.H. Paulides and Elena A. Lomonova (2011). Efficiency of a Regenerative Direct-Drive Electromagnetic Active Suspension. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (4), 1384–1393. DOI: <https://doi.org/10.1109/tvt.2011.2131160>.

2. Kolpakhch'yan, P. G., Shcherbakov, V. G., Kochin, A. E., Shaikhiyev, A. R. (2017). Sensorless control of a linear reciprocating switched reluctance electric machine. *Russian Electrical Engineering*, 88 (6), 366–371. DOI: <https://doi.org/10.3103/s1068371217060086>.

3. Y. Xu, J. Zhao, J. Huang (2014). Multiple Linear Motor Control System Based on FPGA. *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. (pp. 2327-2331). Hangzhou.

4. Kimura F., Yamamoto A., Higuchi (2011). FPGA implementation of a signal synthesizer for driving a high-power electrostatic motor. *Industrial Electronics (ISIE)*, 1295-1300.

Anton Ozulu¹, Boris Lyubarsky²

¹ Ph.D. student, Department of Electric Transport and Diesel Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Kirpychova, 2, Kharkiv, 61002, 04071, Ukraine

² Professor, Department of Electric Transport and Diesel Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", st. Kirpychova, 2, Kharkiv, 61002, 04071, Ukraine

PROSPECTIVE ELECTROMECHANICAL SHOCK ABSORBERS

The article considers the issue of the system of the running gear of a high-speed electric train with a body inclination and the system of oscillation recovery. The authors considered the main suspension systems of the electric train body, which are currently used. The main problems of these suspension systems were put forward. Attention is paid to the use of air-spring suspension. The pipe suspension of the VL80 electric locomotive and the construction of the trolley itself are considered. The basic criteria of an estimation of efficiency of perspective electromechanical shock-absorbers on which the comparative characteristic is carried out are defined. The article describes a promising electromechanical shock absorber based on a synchronous linear motor, which can provide both body tilt and damping and recovery of oscillations. The functional scheme of control of two synchronous linear motors which are established on one cart is considered. The operation of the control system of synchronous linear motors is described. The design of a linear DC motor with permanent magnets is described. The functional control scheme of two linear DC motors with permanent magnets is considered. The design of the electromechanical shock-absorber of the Bose company is resulted. The comparative characteristic of three perspective electromechanical shock-absorbers on six criteria is carried out. Conclusions are made and an electromechanical shock absorber is selected, which provides the basic needs of rolling stock.

Keywords: electromechanical shock absorber, recuperation, body tilt, electric rolling stock, oscillations.

Riabov Ievgen^{1*}, Sapronova Svitlana², Tkachenko Viktor³, Goolak Sergiy⁴, Keršys Robertas⁵

¹ 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 Department of Cars and Carriage Facilities, State University of Infrastructure and Technologies 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

³ Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

⁴ Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

⁵ Department of Transport Engineering, Kaunas University of Technology, 56, Studentų str., Kaunas, LT-51424, Lithuania. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7785-722X>

*Corresponding author: riabov.ievgen@gmail.com

CALCULATION OF TRACTION AND ENERGY CHARACTERISTICS ELECTRIC ROLLING STOCK WITH ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC DRIVE

The issue of determining the traction and energy characteristics of electric rolling stock with asynchronous traction drive is considered. It is noted that such rolling stock can work at any point of the traction area, resulting in the need to determine the characteristics of the rolling stock for the entire traction area. The calculation of the characteristics of the traction induction motor, which are the basis for determining the traction and energy characteristics of the electric rolling stock, is considered in detail. A procedure based on the calculation of the replacement circuit of an induction motor is proposed. The calculation of power losses due to higher harmonic voltages and currents is considered. An example of calculation of traction and energy characteristics of an DC electric shunting locomotive with a traction asynchronous electric drive is given.

Keywords: *traction asynchronous electric drive, electric rolling stock, induction motor, traction characteristics*

Introduction. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030" [1] defines decarbonization as a priority for the country's development. Improving the energy efficiency of transport is part of the process of implementing decarbonisation initiatives. One of the directions of this is the use of energy-optimal modes of vehicles movement with minimal energy consumption to perform the train task [2, 3]. To solve such problems, the characteristics of rolling stock are used, which are given in the Rules of traction calculations for train operation [4, 5]. At the same time, rolling stock with an asynchronous electric traction drive is becoming more and more widely used on the railways of Ukraine. Data on traction and energy characteristics of this rolling stock are not provided in the technical documentation. That is why the task of determining the characteristics is important.

Analysis of recent research and problem statement. Traction and braking characteristics of rolling stock are used while solving traction problems. Current characteristics that are necessary for the calculations of the traction power supply system are also important for the electric rolling stock. The use of an asynchronous traction electric drive on a rolling stock ensures its operation with any value of traction force and speed within the traction area. However, in the technical documentation, for example, [5], only the limit traction characteristics are given, which leads to the need to apply assumptions about the behavior

of traction characteristics for operating modes whose parameters do not meet the limit. Therefore, the definition of traction and current characteristics for the entire traction area is relevant. The characteristics of traction electric machines and the characteristics of auxiliary equipment are basic for determining the traction and current characteristics of rolling stock. In this paper, only traction asynchronous electric motors in the traction mode of rolling stock are considered in detail.

The traction asynchronous motor is a frequency-controlled electric machine with a wide range of load and speed changes. The calculation of their characteristics is important for determining the energy efficiency of rolling stock. In [6] the method of calculation of the traction asynchronous electric motor is given, and the method of characteristics calculation on the basis of data on geometrical sizes of active parts of a stator and a rotor and winding data is given. In [7, 8] detailed mathematical models of the traction asynchronous electric motor at power supply from a source of non-sinusoidal voltage, in particular, for calculation of losses from higher harmonics of tension and current are resulted. In [9], a model for calculating losses in a frequency-controlled induction motor is proposed. Work [10] contains a method for determining losses in a traction induction motor in solving traction problems. In [11] a comparison of the results of analytical and numerical calculations of losses in a traction induction motor is performed. The authors [12] proposed and investigated a new model of losses in electrical steel, which is used in the manufacture of electric motor cores. In [13], an algorithm for calculating losses by the finite element method is presented. In general, it should be noted that in the study of traction asynchronous motors are widely used specialized software [14-17]. Mathematical models of induction motors for asymmetric modes of operation have also been developed [18-20].

Thus, we can conclude about a significant study of electromechanical processes in traction induction motors. However, the direct application of the results of these studies to determine the traction and current characteristics for the entire traction area is labored, so we consider the task of calculating the above characteristics is relevant.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the work is to develop a method for calculating the traction and current characteristics of electric rolling stock with asynchronous traction drive in traction mode. To achieve this goal it is necessary to adjust the existing methods of calculating the characteristics of traction induction motors and additions that take into account the features of the power supply system of electric motors.

Materials and methods of research. The procedure given in [20] can be used as a basis for the method of calculating the characteristics of an induction motor. The calculation formulas are based on the substitution scheme of an induction motor. Using them in the case of calculating the characteristics of the traction induction motor, it is necessary to use the parameters of the substitution circuit for the main harmonic voltage and current taking into account their change from saturation of the magnetic circuit, first of all, taking into account changes in magnetizing circuit inductance. The calculation should be performed for a winding temperature of 150 ° C in accordance with the requirements of DSTU GOST 2582 [21]. The sequence of calculation is given below.

The input data is the speed V and the tangential thrust force F_k .

Traction power

$$P_k = \frac{F_k V}{3,6}, \quad (1)$$

where the speed is set in km / h.

Motor rotor speed

$$n_2 = \frac{V \mu_{GB}}{3,6 \pi D_k}, \quad (2)$$

where D_k – the diameter of the drive wheel,

μ_{GB} – gear ratio of the traction gearbox.

Torque on the shaft of the traction motor

$$M_2 = \frac{F_k D_k}{2 n_{TM} \mu_{GB} \eta_{GB}}, \quad (3)$$

where n_{TM} – the number of traction motors (motorized axles),
 η_{GB} – gear efficiency in the mode of operation with speed n_2 and torque M_2 .
 The efficiency of the gearbox can also be determined by the power on the motor shaft

$$P_2 = \frac{\pi M_2 n_2}{30} \quad (4)$$

The dependences for this case are given in [22].

Electric rotor speed

$$f_r = \frac{pn_2}{60} \quad (5)$$

where p – the number of pole pairs of the motor.

The following calculations are performed in the following sequence.

Set the rotor current frequency f_2 .

Supply voltage frequency

$$f_1 = f_r + f_2 \quad (6)$$

Using the dependence of the stator voltage on the frequency, we determine the phase voltage
 $U_{1ph} = U_{1l}/\sqrt{3}$ (U_{1l} – line voltage).

Flux linkage

$$\Psi_1 = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{U_{1ph}}{f_1} \quad (7)$$

The obtained value of the flux coupling is determined by the inductance of the magnetizing circuit and the scattering inductance of the stator and rotor (in the case of taking into account the saturation of their values).

Correction factor that takes into account the saturation of the magnetic circuit

$$C_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{X_m}\right)^2}, \quad (8)$$

where $X_1 = 2\pi f_1 L_1$ – inductive resistance of the stator (L_1 – the scattering inductance of the stator winding);

$X_m = 2\pi f_1 L_m$ – inductive resistance of the magnetizing circuit (L_m – inductance of the magnetizing circuit);

R_1 – active resistance of the stator winding phase in the heated state.

Relative slip

$$s = \frac{f_2}{f_1} \quad (9)$$

Equivalent active resistance of the electric motor

$$R_{eq} = C_1 \left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s} \right) \quad (10)$$

where R_2' – the active resistance of the rotor winding in the heated state is given.

Equivalent inductive resistance of the electric motor

$$X_{eq} = C_1 (X_1 + C_1 X_2'), \quad (11)$$

where $X_2' = 2\pi f_1 L_2'$ – the inductive resistance of the rotor winding is given (L_2' – the inductance of scattering of a rotor winding is resulted).

Equivalent resistance of the electric motor

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (12)$$

The rotor current is reduced

$$I_2' = \frac{C_1 U_{1ph}}{Z_{eq}} \quad (13)$$

Active component of the stator current

$$I_{1a} = I_{0a} + \frac{U_{1ph}}{Z_{eq}} \cos \varphi_2', \quad (14)$$

where I_{0a} – active component of no-load current;

φ_2' – the angle between the vectors I_2' and U_{1ph} , with $\cos \varphi_2' = \frac{R_{eq}}{Z_{eq}}$

Active component of no-load current

$$I_{0a} = \frac{P_{st} + m I_\mu^2 R_1}{m U_{1ph}}, \quad (15)$$

where P_{CT} – losses in the stator magnetic circuit at voltage U_{1ph} and frequency f_1 ;

I_μ – the magnetizing current, which is determined by the dependence of the flux linkage on the magnetizing current;

m – the number of phases of the motor.

Reactive stator current component

$$I_{1r} = I_\mu + \frac{U_{1ph}}{Z_{eq}} \sin \varphi_2', \quad (16)$$

where $\sin \varphi_2' = \frac{X_{eq}}{Z_{eq}}$.

The effective value of the phase current of the main harmonic

$$I_{1ph} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad (17)$$

Power factor

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_{1ph}} \quad (18)$$

Active power taken from the source

$$P_1 = m U_{1ph} I_{1ph} \quad (19)$$

Losses in the stator winding

$$P_{e1} = mI_{1ph}^2 R_1 \quad (20)$$

Losses in the rotor winding

$$P_{e2} = m(I_2')^2 R_2' \quad (21)$$

Losses in the magnetic circuit

$$P_{st} = P_{st\ nom} \left(\frac{\Psi_1}{\Psi_{1nom}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1nom}} \right)^{1,5}, \quad (22)$$

where $P_{st\ nom}$ – losses in the magnetic circuit (all types of magnetic losses) at rated voltage and frequency;

ψ_{1nom} – nominal flux linkage.

Nominal flux linkage

$$\Psi_{1nom} = \frac{U_{1ph\ nom}}{\pi\sqrt{2}f_{1nom}} \quad (23)$$

where $U_{1ph\ nom}$ – rated phase voltage,

f_{1nom} – nominal frequency.

Mechanical losses

$$P_{mech} = P_{mech\ nom} \frac{n_2}{n_{2nom}}, \quad (24)$$

where $P_{mech\ nom}$ – mechanical losses at rated speed n_{2nom} .

In the case of self-ventilating motors, mechanical losses must be added to the ventilation losses from the built-in fan, which can be calculated from the expression

$$P_{vent} = P_{vent\ nom} \left(\frac{n_2}{n_{2nom}} \right)^3, \quad (25)$$

where $P_{vent\ nom}$ – losses on ventilation at nominal speed.

Additional losses in accordance with the requirements of standard [21] (excluding losses from higher harmonics)

$$P_{add} = 0,005P_1 \left(\frac{I_{1ph}}{I_{1ph\ nom}} \right)^2, \quad (26)$$

where $I_{1ph\ nom}$ – rated phase current.

Losses in the electric motor from the main harmonic

$$\Delta P_1 = P_{e1} + P_{e2} + P_{st} + P_{mech} + P_{vent} + P_{add} \quad (27)$$

Power on the motor shaft

$$P_2' = P_1 - \Delta P_1. \quad (28)$$

Moment on the shaft

$$M_2' = \frac{30 P_2'}{\pi n_2} \quad (29)$$

The value of the moment M_2' compare with the value M_2 , calculated by the formula (3). If the moment M_2 exceeds M_2' , it is necessary to increase the frequency f_2 (if on the contrary - the frequency must be reduced) and repeat the calculations by expressions (6)-(28). It is advisable to organize a cyclic calculation of the moment M_2' , taking the initial frequency value f_2 equal to zero, corresponding to the idling mode. The criterion for completing the cycle is the deviation M_2' from M_2 by an amount not exceeding some error (absolute or relative). The values of the motor parameters obtained in the last step of the calculations are taken as the actual parameter values.

On modern rolling stock, traction asynchronous electric motors are powered by autonomous voltage inverters, the harmonic voltage spectrum of which contains, in addition to the main component, higher harmonics. It is believed that the currents caused by them do not create a useful moment on the shaft, but cause additional losses in the windings and magnetic circuit [6-8]. When calculating the losses from the higher harmonics, it is assumed that for the higher harmonics the motor "works" in the short-circuit mode.

The current of the highest harmonic (current value) is determined by the expression

$$I_h = \frac{U_{1h}}{\sqrt{(R_{1h} + R_{2h}')^2 + (X_{1h} + X_{2h}')^2}} \quad (30)$$

where U_{1h} – the current value of the phase voltage of the highest harmonic,

R_{1h} – stator winding phase resistance in the heated state for higher harmonic taking into account current displacement;

R_{2h} – reduced resistance of the rotor winding in the heated state for a higher harmonic taking into account the displacement of the current;

X_{1h} – inductive resistance of the stator winding phase taking into account the current displacement;

X_{2h}' – the inductive resistance of the rotor is given taking into account the current displacement.

The procedure for determining the winding resistances for higher harmonics is given in [6, 9].

Losses in the stator winding from the flow of higher harmonic current

$$P_{e1h} = m I_h^2 R_{1h} \quad (31)$$

Losses in the rotor winding from the flow of higher harmonic current

$$P_{e2h} = m I_h^2 R_{2h}' \quad (32)$$

Losses in the magnetic circuit from higher harmonic voltages

$$P_{sth} = 0,02 \frac{m_1 + m_2}{m_1} P_{st} \quad (33)$$

where m_1 – stator core weight,

m_2 – rotor core weight

Total losses from higher harmonics

$$\Delta P_h = \sum_{j=1}^k (P_{e1hj} + P_{e2hj}) + P_{sth} \quad (34)$$

k – number of harmonics.

Total losses in the electric motor

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_h \quad (35)$$

Power consumed by the traction inverter

$$P_{TM} = P_2' + \Delta P$$

Efficiency of the electric motor

$$\eta = \frac{P_2'}{P_2' + \Delta P} \quad (36)$$

Power consumed by the traction electric drive from the intermediate circuit (DC links)

$$P_{TS} = P_M + \Delta P_I, \quad (37)$$

where ΔP_I – total power losses in the traction converter.

Calculating the power loss in the traction converter is an independent task. Examples of analytical solutions can be found in [23, 24]. Methods for determining losses in the inverter, which are based on digital modeling, are proposed in [25, 26].

When calculating the power P_{TS} must take into account the power supply scheme of traction motors.

On modern rolling stock power supply of auxiliary systems is also carried out from the intermediate circuit. Therefore, the total power consumed in the intermediate circuit can be represented as

$$P_d = P_{TS} + P_{AUX} \quad (38)$$

where P_{AUX} – the total capacity of consumers of auxiliary systems (including losses), which are fed from the intermediate circuit.

The current of the intermediate circuit is determined by the expression

$$I_d = \frac{P_d}{U_d}, \quad (39)$$

where U_d – intermediate circuit voltage.

For rolling stock that is powered by a DC catenary, the mains current is defined by the expression

$$I_c = \frac{\Sigma P_d + \Delta P_{IN}}{U_c}, \quad (40)$$

where ΣP_d – total power consumed by the load of intermediate circuits,

ΔP_{IN} – losses in input converters,

U_c – voltage in the catenary.

It should be noted that the use of the input converter on the rolling stock leads to the appearance of higher harmonics in the mains current, which must be taken into account when assessing the energy efficiency of the electric traction system. Formula (40) gives the value of the "useful" component of the mains current.

For rolling stock powered by AC mains, the active component of mains current is determined by the expression

$$I_A = \frac{1}{K_{TR} K_i} \frac{\Sigma P_d + \Delta P_{TR} + \Delta P_{IN} + \Delta P_F + \Delta P_R}{U_c}, \quad (41)$$

where ΔP_{TR} – losses in the traction transformer,

ΔP_F – losses in the dual frequency filter,

ΔP_R – losses in the mains choke,

K_{TR} – traction transformer transformation coefficient,

K_i – coefficient that depends on the ratio of DC in the intermediate link and the input current 4QS-converter.

Since 4QS-converters operating with modulated voltage are used on rolling stock with asynchronous traction drive, higher harmonic voltages and currents must be taken into account when calculating losses in the transformer and mains choke.

As in the case of direct current, the mains current will be higher harmonic, due to the operation of 4QS-converters. They must be taken into account when assessing the energy efficiency of the electric traction system.

The main harmonic of the mains current

$$I_c = \sqrt{I_A^2 + I_R^2}, \quad (42)$$

where I_R^2 – reactive current, the value of which is set by the control system 4QS-converter.

The following indicators are used to assess energy efficiency in the standards for electric rolling stock:

efficiency – for all types of electric rolling stock;

power factor for the electric rolling stock of alternating current and dual power supply when working from the catenary of alternating current.

Efficiency of direct current electric rolling stock and dual power supply when working from a direct current network

$$\eta_{DC} = \frac{P_k}{U_c I_c} \quad (43)$$

Efficiency for electric rolling stock of alternating current and double power supply at work from a contact network of alternating current

$$\eta_{AC} = \frac{P_k}{U_c I_A} \quad (44)$$

Power factor

$$\cos\varphi = \frac{I_A}{I_c} \quad (45)$$

Thus, the above algorithm allows to calculate the traction and energy characteristics of the electric rolling stock with asynchronous traction drive for the entire traction area.

To illustrate the operation of this algorithm, we calculate the traction and energy characteristics of the shunting electric locomotive, the applications of which have a number of advantages [27]. The data required for the calculation are given in table 1. Calculations are performed for the case of operation from a direct current catenary. Since the calculation of losses in the motor from higher harmonic voltage and current, as well as the calculation of losses in the inverter and input converter are quite complex, to simplify the test calculation, we assume that these losses are 2% of power on the motor shaft.

Table 1. Input data for calculation

Parameter	Unit of measurement	Value
Rated power of the traction motor	kW	200
Rated line voltage	V	290
The highest line voltage	V	530
Rated frequency	Hz	12,5
Nominal speed	rpm	240
Nominal moment	Nm	6500
Steel losses in nominal mode	kW	3,0

End of table 1

Mechanical losses in nominal mode	kW	0,5
Resistance of the stator winding at a temperature of 20 ° C	Om	0,0121
Inductance of the stator winding phase	mH	0,42
Resistance of the rotor	Om	0,0102
Inductance of rotor scattering is given	mH	0,369
Nominal flux leakage	Wb	2,01
Intermediate circuit voltage	V	600
Contact network voltage	V	3000
Power of consumers' own needs	kW	80
Number of axles	–	2
Efficiency of a traction gearbox	%	98,0
Transmission ratio of the traction gearbox	–	5,067
Diameter of the drive wheel	v	1,05

The results of the calculations are shown in Fig. 1-3, which shows the limiting traction and current characteristics, as well as the dependence of the efficiency of the electric locomotive on speed. By performing the calculation of the above procedure, you can get the characteristics of the locomotive for any point of the traction area.

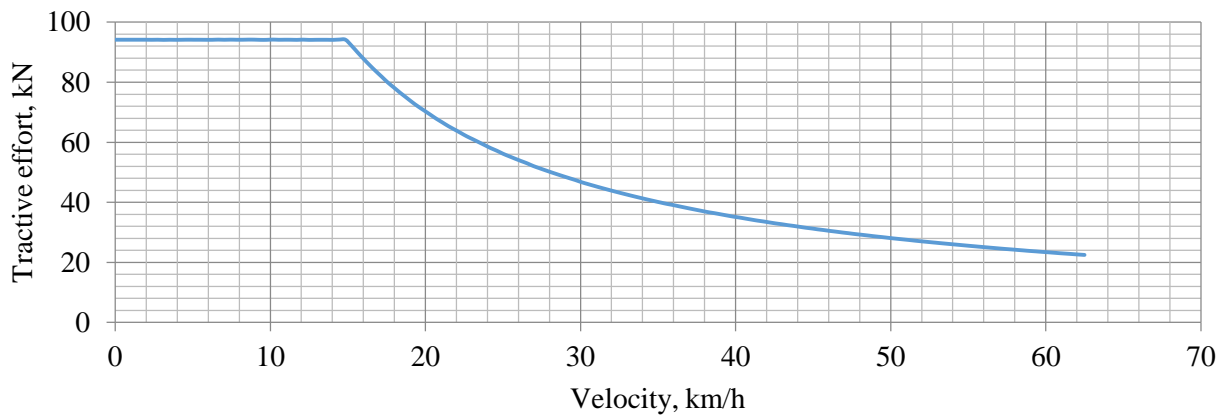


Fig. 1. Traction characteristics of the electric locomotive

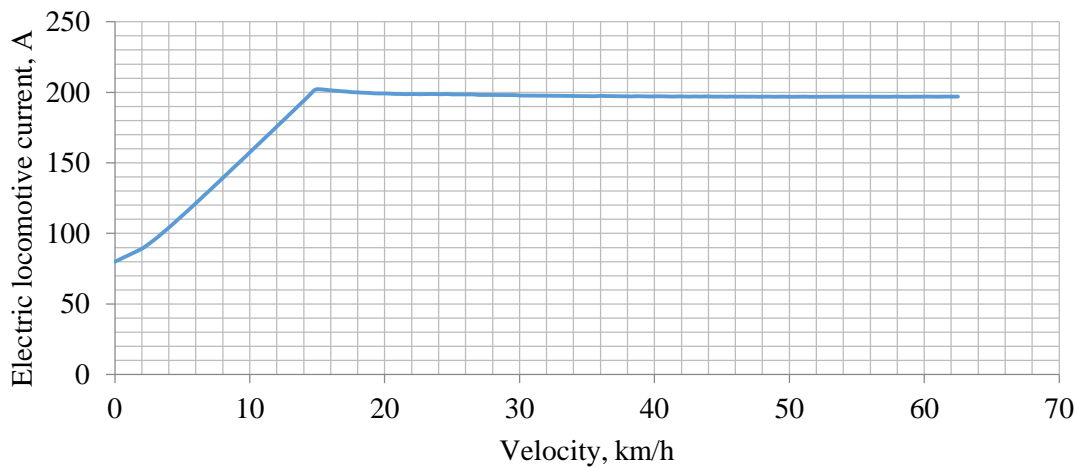


Fig. 2. Current characteristics of the electric locomotive

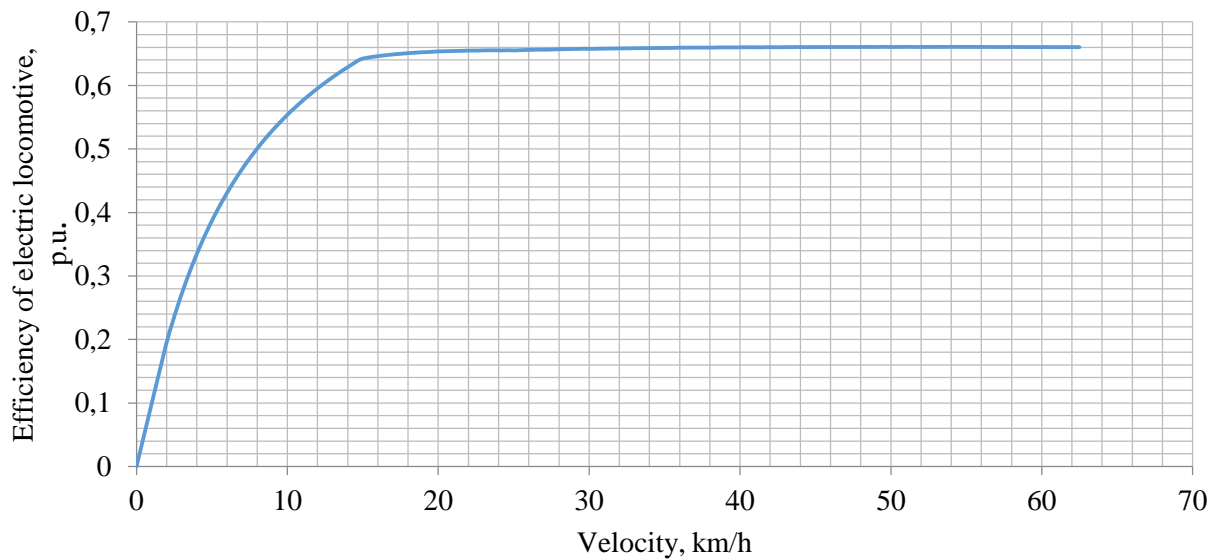


Fig. 3. Dependence of electric locomotive efficiency on speed

The analysis of the dependences in Fig. 1-3 shows that the characteristics have two parts, the limit of which is about a speed of 15 km / h. This speed corresponds to the transition from the zone of operation with a constant torque to the zone of operation with a constant power. This explains why in the second zone the current and efficiency of the electric locomotive do not change.

Conclusions. The algorithm for calculating the traction and energy characteristics of an electric rolling stock with an asynchronous traction drive is proposed in the article. The method is based on the calculation of electromechanical characteristics of asynchronous traction motor and calculations of power losses in the components of the traction drive. Further improvement of the proposed algorithm is associated with the refinement of the calculation of losses in semiconductor converters and traction transformers.

REFERENCES

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 03.03.2021 roku № 179 "Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku" [On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-nacionalnoyi-eko-a179> (data zvernennia: 04.11.2021) [in Ukrainian].
2. Dmytryenko V. D. (2013) *Modelyrovanye y optymyzatsyia protsessov upravlenyia dvyzhenyem dyzel-poezdov : monohrafiya [Modeling and optimization of diesel train traffic control processes: monograph]* / V. D. Dmytryenko, A. Yu. Zakovorotnyi ; Nats. tekhn. un-t "Kharkov. polytekhn. yn-t". – Kharkov : NTMT, 2013. – 248 s [in Russian].
3. Baranov L.A., Erofeev E.V., Meleshyn Y.S., Chyn L.M (2011). *Optymyzatsyia upravlenyia dvyzhenyem poezdov. Uchebnoe posobie [Optimization of train control]*, Moscow, 164 s. [in Russian].
4. *Pravyla tiahovykh raschetov dlia poezdnoi raboty [Traction calculation rules for train operation]*. – M.: Transport, 1985. – 287 s [in Russian].
5. *Nakaz №206-TsZ. Pravyla tiahovykh rozrakhunkiv dlia poiznoi roboty po elektrovozakh ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EES5K, teplovozhakh TEP150, TEM103, dyzel-poizdakh DEL-02, elektropoizdakh EPL2T, EPL9T (TsT-0199) [Rules of traction rozrakhuniv for poiznoi robots on electric locomotives ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2EEC5K, diesel locomotives TEP150, TEM103, diesel trains DEL-02, electric trains EPL2T]* – Vved. 2010-12-22. – Kyiv, 2010. – 78 s. [in Ukrainian].
6. Kurbasov, A. S (1987). *Proektyrovanye tiahovykh elektrodvyhatelei [Design of traction motors]*, M. : Transport – 243 s. [in Russian]
7. Shcherbakov V.H (1998). *Tiahovye elektrodvyhately elektrovozov [Traction motors for electric locomotives]*. – Novochoerkassk: Ahentstvo Nautylus, – 672 s.: yl. [in Russian]
8. Yu. A. Bakhvalov, A. A. Zaryfian, V. N. Kashnykov [y dr.]; pod red. E. M. Plokhova (2001) *Modelyrovanye elektromekhanicheskoi systemy elektrovoza s asynkhronnym tiahovym dvyhatelem [Modeling the electromechanical system of an electric locomotive with an asynchronous traction motor]*, M. : Transport, 286 s. [in Russian]

9. Riabov E. S (2016). *Analiz poter v tiahovom asynkronnom dvyhatele pry razlychnykh rezhymakh pytanyia* [Analysis of losses in a traction induction motor under various power supply modes]/ Evraziyskiy Soiuz Uchenykh. – 2016. – №12 (33). – S. 55-65 [in Russian].
10. Liubarskyi B. H. (2014) *Teoretychni osnovy dlia vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnoho peretvorennia enerhii elektrorukhomoho skladu. – Dysertatsiia na zdobuttia naukovoho stupenia doktora tekhnichnykh nauk za spetsialnistiu 05.22.09. - «Elektrotransport». [Theoretical basis for the selection and assessment of promising systems for the electro-mechanical re-development of the energy of the electric warehouse. - Dissertation for the scientific level of Doctor of Technical Sciences for specialty 05.22.09. - "Electrotransport".]* Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Kharkiv, 2014. 368 s.
11. Anaïs Maroteaux (2016). *Study of analytical models for harmonic losses calculations in traction induction motors*, Master thesis. Stockholm, 2016, 92 p.
12. Jan Rens, Lode Vandenbossche, Ophélie Dorez (2020). *Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses*. World Electric Vehicle Journal 11, 24; doi:10.3390/wevj11010024
13. Duan N., Ma X., Lu S., Wang S., Wang S. (2021) *Simulation Calculation of Loss of Induction Traction Motor*. In: Chen W., Yang Q., Wang L., Liu D., Han X., Meng G. (eds) *The Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 743. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6609-1_54
14. J. V. Gragger, A. Haumer, C. Kral and F. Pirker (2008). *Efficient Analysis of Harmonic Losses in PWM Voltage Source Induction Machine Drives with Modelica*. Modelica 2008, Mar. 3rd – 4th, 2008.
15. L. Di Leonardo, M. Popescu, M. Tursini and M. Villani (2019). *Finite Elements Model Co-Simulation of an Induction Motor Drive for Traction Application*, IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019, pp. 1059-1065, doi: 10.1109/IECON.2019.8926853.
16. G. Von Pfingsten, S. Steentjes and K. Hameyer (2017). *Operating Point Resolved Loss Calculation Approach in Saturated Induction Machines*, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2538-2546, March 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2597761.
17. L. Livadaru, A. Munteanu, A. Simion and C. Cantemir (2015). *Design and finite element analysis of high-density torque induction motor for traction applications*. 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2015, pp. 211-214, doi: 10.1109/ATEE.2015.7133766.
18. Goolak, S., Gerlici, J., Tkachenko, V., Saponova, S., 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. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>
19. Goolak Serge, Gubarevych Oleg, Yermolenko Eduard, Slobodyanyuk Maxim, Gorobchenko Oleksandr (2020). *Mathematical Modeling of an Induction Motor for Vehicle*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(2 (104)), 25-34, 2020. doi: 10.15587/1729-4061.2020.199559
20. Goolak Sergey, Liubarskyi Borys, Saponova Svitlana, Tkachenko Viktor, Riabov Ievgen, Glebova Marina (2021). *Improving a Model of the Induction Traction Motor Operation Involving Non-Symmetric Stator Winding*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2021, 4(8(112)), 45–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236825>
20. P. Kopylov, B. K. Klokov, V. P. Morozkyn, B. F. Tokarev ; pod red. Y. P. Kopylova. (2018) *Proektyrovanye elektrycheskykh mashyn : uchebnyk dlia bakalavrov : dlia studentov elektromekhanichnykh y elektroenergetichnykh spetsyalnostei vuzov* [Design of electrical machines: a textbook for bachelors: for students of electromechanical and electric power specialties of universities] 4-e yzd., pererab. y dop. - Moskva : Yurait, - 766 s. [in Russian]
21. DSTU HOST 2582:2016 (HOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ). *Mashyny elektrychni obertovi tiahovi. Zahalni tekhnichni umovy - Vpershe (zi skasuvanniam v Ukraini HOST 2582-81)*.
22. A. L. Holubenko, V. M. Novykov, H. H. Basov, V. A. Tulup, E. Kh. Tasanh (2011). *Raschët tiahovo-energeticheskikh kharakterystyk teplovozov : monografyia* [Calculation of traction and energy characteristics of diesel locomotives: monograph]; Vostochnoukr. nats. un-t ym. V. Dalia. - Luhansk : Noulydzh, 422 s [in Russian].
23. Yu. P. Honcharov, M. V. Panasenko ta in. / Za red. Yu. P. Honcharova. (2007). *Statychni peretvoriuvachi tiahovoho rukhomoho skladu: Navch. posibnyk Static conversions of the traction rolling stock: Navch. Posibnik*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2007. - 192 s. [in Ukrainian].
24. V.V. Yvakhno, V.V. Zamaruev, O.V. Ylyna (2014). *Vybor y raschet sylovykh poluprovodnykovykh pryborov poluprovodnykovoho preobrazovatelja elektrycheskoi enerhyy : ucheb.-metod. Posobyie* [Selection and calculation of power semiconductor devices of a semiconductor converter of electrical energy: textbook-method. allowance], Kh.: NTU «KhPY», 72 s [in Russian].
25. Demydov O. V. (2021) *Enerhoefektyvnyi bezreduktorny tiahovy pryvod prymiskoho elektropoizdu na bazi synkronnoho dvyhuna z postiinymy mahnitamy : dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.22.09 : haluz znan 27 / Oleksandr Viktorovych Demydov ; nauk. kerivnyk Liubarskyi B. H. [Energy-efficient gearless traction drive of a suburban electric train based on a synchronous engine with permanent magnets: dis. ... cand. tech. Science: special. 05.22.09: branch of knowledge 27 / Alexander Viktorovich Demidov; Science. head Lyubarsky BG]* ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv, 146 s. [in Ukrainian].
26. R. Menon, N. A. Azeez, A. H. Kadam and S. S. Williamson (2018). *Energy loss analysis of traction inverter drive for different PWM techniques and drive cycles*. 2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), pp. 201-205, doi: 10.1109/IESES.2018.8349874.

27. Ye.S.Riabov, L.V.Overianova, S.O.Hulak, L.Iu. Kondratieva (2021). Otsinka zastosuvannia manevrovykh elektrovoziv [Evaluation of the use of shunting electric locomotives] / Materialy pershoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Prohresyvni tekhnolohii zasobiv transportu», 23-24 veresnia 2021 r. Kharkiv-Myrhorod: UkrDUZT, 2021. s.161-162. [in Ukrainian].

Рябов Євген^{1*}, Сапронова Світлана², Ткаченко Віктор³, Гулак Сергій⁴, Keršys Robertas⁵

¹ 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 Кафедра «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

³ Кафедра «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

⁴ 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>

⁵ Кафедра транспортної техніки, Каунаський технологічний університет, 56, вул. Студентська, Каунас, LT-51424, Литва. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7785-722X>

РОЗРАХУНОК ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Розглянуто питання визначення тягово-енергетичних характеристик електрорухомого складу з асинхронним тяговим електроприводом. Відзначено, що такий рухомий склад може працювати у будь-якій точці тягової області, наслідком чого є необхідність визначення характеристик рухомого складу для у всій тяговій області. Детально розглянуто розрахунок характеристик тягового асинхронного електродвигуна, які є базовими для визначення тягово-енергетичних характеристик електрорухомого складу. Запропоновано процедуру, яка базується на розрахунку схеми заміщення асинхронного електродвигуна. Розглянуто розрахунок втрат потужності, обумовлених вищими гармонійними напруги та струму. Наведено приклад розрахунку тягово-енергетичних характеристик маневрового електровозу постійного струму з тяговим асинхронним електроприводом.

Ключові слова: тяговий асинхронний електропривод, електрорухомий склад, асинхронний двигун, тягові характеристики.

Ігор Мартинов^{1*}, Юрій Калабухін², Альона Труфанова³

¹ Професор, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

² 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>

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

КОНЦЕПЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА

У статті розглянуті питання концептуального підходу до визначення життєвого циклу пасажирського вагона. Парк пасажирських вагонів АТ Укрзалізниця в основному складають моделі, розроблені та виготовлені у 70-90 роки минулого століття на вагонобудівних заводах Німеччини та Росії. Вони застаріли як морально, так і фізично. Це обумовлює необхідність оновлення парку пасажирських вагонів за рахунок придбання вагонів як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Але в сучасних умовах користувача нової техніки цікавить не тільки ціна придбання, а й витрати після продажу, що відображається у вартості життєвого циклу.

Для пасажирського вагона запропоновано використовувати каскадну модель життєвого циклу. Визначено етапи життєвого циклу пасажирського вагона за умови експлуатації на залізницях України. Вважається, що він буде складатися з п'яти етапів. Розглянуті складові кожного етапу життєвого циклу пасажирського вагона.

Для транспортної компанії, яка має намір експлуатувати пасажирський вагон, витрати перших трьох стадій опосередковано виражені у початковій вартості вагону – ціні придбання.

Вартість життєвого циклу (ВЖЦ) пасажирського вагона буде визначатися підсумовуванням індивідуального відтоку грошових коштів (витрат) на кожному тимчасовому етапі (кроці розрахунку) терміну служби техніки. Оцінка вартості життєвого циклу технічних систем залізничного транспорту може здійснюватися на будь-якій стадії життєвого циклу.

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

Вступ. Термін служби переважної більшості вантажних та пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця» істотно перевищив нормативні значення. Згідно з даними філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця» 67 % інвентарного парку відпрацювали свій ресурс. Переважна більшість пасажирських вагонів була збудована у 70-80 роки минулого століття. Вони неодноразово проходили деповські та капітальні ремонти, а також капітально-відновлювальний ремонт з подовженням терміну служби. Витрати на підтримку працездатності пасажирських вагонів за цей термін істотно перевищують витрати на придбання нового рухомого складу.

В практиці закупівель у Західній Європі всі тендерні пропозиції, які пов'язані з рухомих складом залізниць, наряду з багатьма критеріями вибору рішення обов'язково застосовується

критерій вартості життєвого циклу. Ці питання стандартизовані та є обов'язковими для виконання виробниками залізничного рухомого складу. Але деталізація та вдосконалення методик розрахунків вартості життєвого циклу продовжується. Це обумовлено тим, що наявність більш об'єктивної методики оцінки вартості життєвого циклу технічних засобів дає більше можливостей контролювати ринок. Завдання мінімізації сумарних витрат на здійснення життєвого циклу залізничної техніки, налагодження схеми ціноутворення, а також підвищення надійності та безпеки техніки, що експлуатується, є важливим як для її виробників, так і споживачів. Для вагобудівної промисловості мінімізація таких витрат підвищує конкурентоспроможність продукції і, отже, стимулює розширення ринку збуту та збільшення прибутку. Тобто це дозволить створити умови, що стимулюють виробників розвивати свою продукцію. Для операторів залізниць при цьому підвищується економічна ефективність її експлуатації. Тому відпрацювання методик оцінки вартості життєвого циклу рухомого складу є ключовим напрямом забезпечення високого рівня конкурентоспроможності продукції.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Дослідження життєвого циклу залізничного рухомого складу присвячено ряд публікацій як в нашій країні, так і за її межами.

Залізничний рухомий склад має обмежену тривалість свого існування на ринку, тобто він має свій життєвий цикл. Державним стандартом [1] встановлені стадії життєвого циклу та викладені загальні умови до процесів та змісту робіт протягом життєвого циклу.

Інформація про етапи життєвого циклу залізничного рухомого складу є вкрай важливою для підприємств, що займаються виготовленням рухомого складу. Вона дає можливість визначити ряд важливих показників ефективності його використання. Фахівцями УкрДУЗТ у монографії [2] викладено основні положення методології визначення життєвого циклу та його вартості щодо тягового рухомого складу. У науковій статті [3] надано 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.

В європейському суспільстві рішення, які приймаються щодо обслуговування та ремонту залізничного рухомого складу, багато в чому залежить від того, на якому етапі життєвого циклу знаходиться технічний об'єкт. Тому особливий інтерес представляють собою нормативні документи [4, 5], розроблені робочою групою Союзу європейської залізничної промисловості (UNIFE). Вони являють собою керівництво по розрахунку вартості життєвого циклу для країн Європейської спільноти.

В роботах [6, 7] розглянуті питання визначення вартості життєвого циклу рухомого складу та обґрунтовано науковий підхід до прогнозування витрат на утримання технічних об'єктів.

Аналіз концепцій життєвого циклу дозволяє вжити ряд заходів щодо зміни обсягів виробництва, обслуговування, ремонту, утилізації, які дають змогу мінімізувати витрати, досягти максимального прибутку і в кінцевому рахунку – продовжити найбільш прибуткові етапи життєвого циклу залізничного рухомого складу. Як приклад, автором монографії [8] розглянуто проблему оптимальної організації життєвого циклу виробів на прикладі машинобудівної галузі, в основі якої лежить поняття економічно обґрунтованого терміну служби машини. Розроблено принципи та запропоновано розрахункові методики оптимізації етапів проектування, виготовлення, експлуатації та утилізації виробу.

У дослідженнях [9, 10] подані теоретичні та методологічні аспекти оцінки вартості життєвого циклу технічних систем та практики прийняття рішень по управлінню життєвим циклом технічних систем на основі визначення його вартості.

У статті [11] авторами виконано техніко-економічне обґрунтування переходу до системи технічного обслуговування та ремонту за технічним станом із застосуванням індикаторного контролю граничних станів вузлів вантажних вагонів. При цьому встановлено, що за песимістичним прогнозом можна досягти зменшення вартості життєвого циклу напіввагона моделі 12-7023.

Концепція життєвого циклу є основоположною для успішного впровадження комплексного

підходу надійності, ризиків, вартості життєвого циклу на залізничному транспорті. В роботі [12] розглядається обґрунтування правомірності застосування байєсівської моделі (БМ) для розрахунків показників надійності вантажного вагона на етапах життєвого циклу. На підставі експериментальних даних були визначені показники надійності деталей і вузлів вантажних вагонів. Методика, яка була представлена, дозволяє використовувати адаптовані БМ для оцінювання показників надійності вантажного вагона на етапах життєвого циклу, а також оптимізувати міжремонтний термін і кількість ремонтів протягом життєвого циклу моделі вагона, при цьому забезпечується облік конструктивних особливостей.

Слід зазначити, що всі проаналізовані роботи розглядають загальні питання визначення життєвого циклу залізничного рухомого складу. Поза увагою дослідників залишились питання визначення характеру та закономірностей аналізу життєвого циклу пасажирських вагонів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є формування концептуального підходу до визначення поняття життєвого циклу пасажирського вагона в умовах експлуатації Української залізниці.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

провести аналіз існуючих моделей життєвого циклу та запропонувати відповідну модель щодо життєвого циклу пасажирського вагона;

сформувати концепцію життєвого циклу пасажирського вагона;

систематизувати склад основних етапів життєвого циклу пасажирського вагона.

Матеріали та методи дослідження. Під життєвим циклом об'єкта залізничного транспорту розуміють послідовність етапів, кожен із яких містить завдання, протягом усього терміну служби – від вихідної концепції до виведення з експлуатації та утилізації. Життєвий цикл зумовлює структуру планування, управління, контролю та перевірки для всіх аспектів функціонування об'єкта, включаючи надійність та безпеку. Метою дослідження життєвого циклу є аналіз ресурсів, що використовуються при виготовленні, використанні та утилізації виробу.

Тривалість життєвого циклу рухомого складу являє собою період між формуванням концепції його виготовлення та використання та вилученням з обігу. Для одиниць рухомого складу залізниці тривалістю життєвого циклу зазвичай вважають термін їхньої служби. Він визначається як повна календарна тривалість експлуатації одиниці рухомого складу до її виключення зі складу основних фондів. Виходячи з цього, основними елементами життєвого циклу залізничного рухомого складу є:

- виявлення потреб ринку та можливостей постачальників;
- генерація ідей, їх фільтрація, ідентифікація;
- технічно-економічна експертиза;
- науково-дослідні роботи та (на їх підставі) дослідно-конструкторські роботи;
- маркетингові дослідження;
- підготовка виробництва;
- виробництво та збут;
- експлуатація;

Стосовно пасажирських вагонів можна прийняти, що вони мають п'ять стадій життєвого циклу:

- формування концепції вагона;
- проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт;
- виготовлення вагону, якому передують всі види підготовки виробництва;
- експлуатація вагона з проведенням супутніх заходів щодо навчання персоналу, оновлення ремонтної бази для забезпечення своєчасного та якісного ремонту та технічного обслуговування;

- вилучення (ліквідація, утилізація).

Моделі життєвого циклу технічного об'єкта можуть бути різними. Це обумовлено як їх різноманітністю, так і специфікою їх використання. Незважаючи на те, що життєві цикли для кожного окремо взятого випадку можуть суттєво відрізнятися, але існують деякі загальноприйняті моделі, які можуть стати базовою основою. Так, для програмного

забезпечення доцільно використання моделей, які відрізняються своєю циклічністю та мають вигляд спіралі («спіральна модель») [13]. Особливість цієї моделі полягає в тому, що кожна фаза відображає свою ефективність та ризики, які пов'язані зі зовнішніми факторами. Кожен виток спіралі передбачає створення фрагмента (компонента) чи версії програмного продукту. На них уточнюються цілі та характеристики проекту, визначається його якість та плануються роботи наступного витка спіралі.

Інкrementна розробка є процесом часткової реалізації всієї системи та поступового нарощування функціональних можливостей [14]. Цей підхід дозволяє зменшити витрати до досягнення рівня вихідної продуктивності. Найбільш актуальним та обґрунтованим її використанням інкрементної моделі буде у тому випадку, коли передбачається складна та масштабна робота з великою кількістю дрібних складових та реалізація відбувається частинами.

V-подібна модель життєвого циклу спрямована на спрощення розуміння складнощів, які пов'язані з розробкою. Її доцільно застосовувати, коли особливо важливе безперервне функціонування системи.

Проведений аналіз принципів особливостей моделей життєвого циклу свідчить, що для нашого випадку найбільш підходить модель каскадного типу. Ця модель відображає потік послідовних фаз аналізу, проектувань та реалізації. Стосовно життєвого циклу залізничних вагонів каскадна модель має суттєві переваги: вона доступна для розуміння; проста і зручна у застосуванні, оскільки процес розробки виконується поетапно; стадії моделі досить добре визначені та зрозумілі, відрізняється стабільністю вимог; визначає процедури контролю якості. Тобто по кожній дії визначається певний перелік завдань (рис. 1).

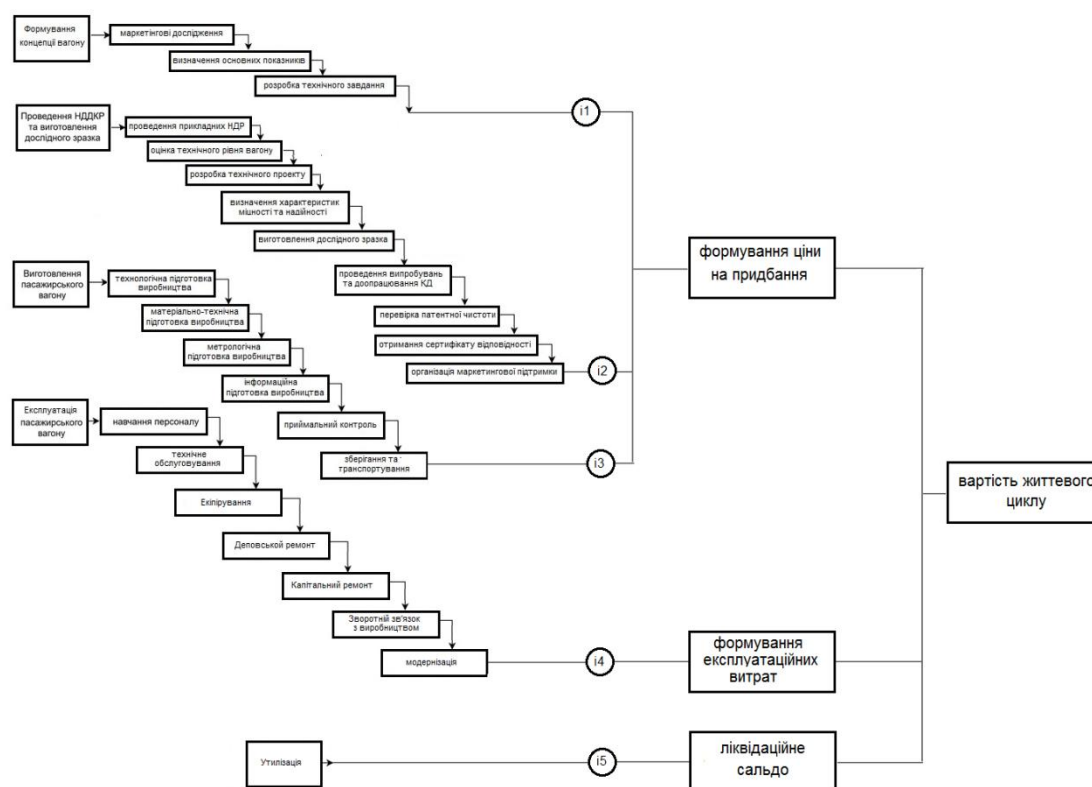


Рис. 1. Каскадна модель життєвого циклу пасажирського вагона

Аналізуючи подану каскадну модель, необхідно зазначити, що етап формування концепції

вагону включає в себе процеси проведення маркетингових досліджень як замовника, так і постачальника вагону (аналіз пасажиропотоків, визначення наявності поточної або перспективної потреби у вагонах даного типу). Після цього відбувається формування вихідних технічних вимог до вагону (визначення основних вимог до міцності, надійності, плавності руху, пожежної безпеки, естетичні та ергономічні показники, нормування вимог до якості та екологічної безпеки). На підставі отриманих результатів формується та узгоджується технічне завдання на розробку та виготовлення вагону. Далі проводиться конкурс (тендер) серед підрядників (постачальників) на розробку та виготовлення вагону та розробляється проект договору створення вагону.

Етап «Проведення НДДКР та виготовлення дослідного зразка» включає процеси проведення фундаментальних, пошукових та прикладних науково-дослідних робіт для визначення шляхів і принципів раціонального створення нового (модернізованого) вагону, детального прогнозування вартості життєвого циклу вагону. Ці роботи повинні виконуватися із залученням передових досягнень науковців у галузі вагонобудування, виконання ДКР з розробки та створення дослідних зразків нового (модернізованого) залізничного рухомого складу, проведення всіх видів випробувань та корегування конструкторської документації за їх результатами.

Оцінка технічного рівня вагону вирішує такі завдання:

- обґрунтування вимог, що закладаються у технічне завдання на розробку продукції та нормативно-технічну документацію;
- прийняття рішень про постановку продукції на виробництво;
- обґрунтування доцільності заміни чи зняття своєї продукції з виробництва;
- формулювання пропозицій щодо експорту та імпорту

Конструкторська документація (КД) необхідна всіх етапах життєвого циклу вагона – починаючи з його проектування і виробництва та закінчуючи експлуатацією, ремонтом, утилізацією. Вона містить у собі всі дані, необхідні та достатні для виготовлення, контролю, приймання, постачання, експлуатації та ремонту вагона, що розробляється.

За результатами попереднього етапу відповідними фахівцями розрахунковими методами виконується перевірка міцності та надійності елементів конструкції вагона, що розробляється. Проведені розрахунки дають можливість вже на даному етапі скорегувати окремі елементи конструкції вагона та приступити до виготовлення дослідного зразку.

Дослідний зразок – це зразок продукції, виготовлений за новою розробленою робочою документацією [15]. Він створюється відповідно до всіх заявлених вимог і повинен виконувати всі функції, зумовлені кресленнями та технічним завданням. Основною метою його виготовлення є перевірка шляхом випробувань відповідності заданим технічним вимогам з метою ухвалення рішення щодо можливості постановки на виробництво та використання за призначенням.

Основою для виготовлення дослідного зразка, випробування його на відповідність нормам та контролю якості є конструкторська документація. Під час розробки експериментального зразка до неї вносяться різні корективи, виходячи з результатів випробування. Тільки після внесення необхідних поправок допускається масове чи серійне виготовлення виробів.

Дослідні зразки продукції піддають контрольним випробуванням. Попередні випробування – це випробування, які проводяться з метою попередньої оцінки відповідності дослідного зразка продукції вимогам технічного завдання (ТЗ), а також визначення готовності дослідного зразка до приймальних випробувань.

Приймальні випробування – це випробування, які проводяться з метою оцінки всіх певних ТЗ характеристик продукції, перевірки та підтвердження відповідності дослідного зразка продукції вимогам ТЗ в умовах, максимально наближених до умов реальної експлуатації (застосування, використання) продукції, а також для прийняття рішень щодо можливості промислового виробництва та реалізації продукції [15].

Процес проведення пошуку на патентну чистоту належить до науково-дослідних дослідно-конструкторських робіт, розробки нових об'єктів, проектування підприємств та інших об'єктів капітального будівництва, а також розробки проектів стандартів.

Патентна чистота – це юридична властивість об'єкта інтелектуальної власності, що полягає в

тому, що він може бути вільно використаний в цій країні без небезпеки порушення патентів, що діють на її території, що належать третім особам [15]. Мета пошуку на патентну чистоту – виявити використані в об’єкті ознаки запатентованого винаходу, незважаючи на відмінності в інших ознаках.

Під час перевірки на патентну чистоту перевіряється конструкція вагону взагалі, оцінці піддаються все (чи більшість) реалізованих у ньому технічних рішень. Пошук проводиться по кожній країні окремо. Приймаються до уваги патентні закони, правила та судова практика всіх країн, щодо яких проводиться пошук.

Після завершення попередніх робіт органом з сертифікації залізничного транспорту України, уповноваженим на виконання робіт в державній Системі сертифікації УкрСЕПРО, проводиться сертифікація пасажирського вагона. Далі виробником проводиться маркетингові заходи щодо забезпечення реалізація вагона.

Етап «Виготовлення пасажирського вагона» включає в себе підготовку щодо забезпечення готовності підприємства до виробництва та випуску (постачання) у заданому обсязі нового (модернізованого) пасажирського вагона відповідно до вимог технічного завдання та конструкторської документації, створення або удосконалення технологічних процесів його виготовлення, а також процес припинення виробництва (зняття з виробництва) залізничного рухомого складу. В цей етап входять технологічна, метрологічна та інформаційна підготовка виробництва; матеріально-технічне постачання (закупівлі); вхідний контроль та здійснення виробничого процесу виготовлення від настановної та головної контрольної серії до встановленого потоку продукції; забезпечення ідентифікації продукції; приймальний контроль та проведення випробувань готової продукції; аналіз, використання та утилізація продукції, що не відповідає вимогам; коригування технології та виробничого процесу; підготовка продукції до транспортування та зберігання; технічна допомога споживачам в обслуговуванні, ремонті та утилізації продукції.

Наступний етап «Експлуатація пасажирського вагона» складається із заходів щодо впровадження вагона в експлуатацію з проведенням супутніх заходів щодо навчання персоналу та підготовкою ремонтної бази. Цей етап включає процеси прийняття транспортною компанією (підрозділом) вагона, введення його в робочий парк вагонів для безпосереднього використання відповідно до призначення (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.

Технічне обслуговування характеризується процесами, спрямованими на своєчасну заміну частини обладнання вагонів на нове для покращення його споживчих властивостей [16].

Для пасажирських вагонів встановлено такі види технічного обслуговування:

- ТО-1 – виконується перед відправленням у рейс у пунктах формування та обороту, а також на шляху прямування;
- ТО-2 – виконується перед початком літніх та зимових перевезень;
- ТО-3 – єдина технічна ревзія основних вузлів пасажирських вагонів через 6 місяців після побудови, планового ремонту або попередньої ревізії з відчепленням від поїзда в пунктах формування.

Крім перелічених видів технічного обслуговування (ТО) може також проводитися поточний ремонт (ПР) з відчепленням вагона від складу поїзда на шляху прямування або в пунктах формування та обороту.

До поточного утримання пасажирських вагонів входить: технічний огляд, поточний ремонт, екіпірування, санітарна обробка та обслуговування вагонів на шляху прямування.

Технічний огляд здійснюється у парках прибуття, формування та відправлення. Робота ПТО здійснюється залежно від чинного розкладу руху пасажирських поїздів. Ці пункти мають забезпечити якісну підготовку складів у рейс. Персонал ПТО несе повну відповідальність за безпечний та безвідчипний рух оброблених складів протягом усього рейсу.

Екіпірування пасажирських вагонів полягає в санітарному огляді, вологій дезінфекції та дезінсекції за встановленим графіком, зовнішнім обмиванням, внутрішнім прибиранням, заміною використаної білизни чистим, постачанням водою, знімним інвентарем, а в холодний час і паливом. Всі ці роботи виконують спеціалізовані бригади екіпіровки. Вагони постачають водою з водорозбірних колонок на екіпірувальних пунктах станцій формування та обороту складів або на приймально-відправних коліях проміжних станцій; паливом (вугіллям) забезпечують з настанням опалювального сезону, а опалюють при зниженні температури зовнішнього повітря до +10 °С.

Білизною, постільним приладдям, інвентарем, обладнанням пасажирські потяги (вагони) забезпечують контори обслуговування пасажирів. При екіпіруванні в першу чергу вагони постачають матрацами, подушками, потім ковдрами та постільною білизною, знімним інвентарем, настільними іграми (шашки, доміно, шахи), чаєм, цукром, печивом та іншими предметами чайної торгівлі.

ДР (деповський ремонт) – це плановий ремонт вагонів, що проводиться між капітальними ремонтами, з метою відновлення їх працездатності, з заміною чи ремонтом деяких складових частин, а також модернізацією, за необхідності, окремих вузлів.

Капітальні ремонти (КР-1, КР-2) повинні виконуватися на вагоноремонтних заводах з метою відновлення технічного стану вагонів шляхом заміни несправних складових частин та деталей відремонтованими або новими, а також, за необхідності, модернізація окремих вузлів. Вони відрізняються один від одного обсягом робіт, що виконуються.

Діяльність по забезпеченню зворотного зв'язку з виробництвом полягає у збиранні інформації про роботу пасажирських вагонів в експлуатації, визначення «вузьких місць» в конструкції для поліпшення роботи вагона.

При модернізації можливе виконання робіт, які забезпечують подовження терміну служби вагонів. Модернізація може також проводитись з метою покращення техніко-економічних показників пасажирських вагонів.

На останньому етапі «Утилізація» проводять комплекс документованих організаційно-технологічних заходів щодо списання одиниці залізничного рухомого складу, ліквідації та видалення відходів складових частин залізничного рухомого складу зі складанням опису складових частин, що підлягають зняттю із залізничного рухомого складу та придатних для повторного використання.

Вартість життєвого циклу (ВЖЦ) пасажирського вагона буде визначатися підсумовуванням індивідуального відтоку грошових коштів (витрат) на кожному тимчасовому етапі (кроці розрахунку) терміну служби техніки.

Для транспортної компанії, яка має намір експлуатувати пасажирський вагон, витрати перших трьох стадій опосередковано виражені у початковій вартості вагону – ціні придбання.

Витрати на експлуатацію (річні експлуатаційні витрати) – це поточні витрати на експлуатацію рухомого складу та складних технічних систем. Вони розраховуються відповідно до номенклатури доходів та витрат за видами діяльності транспортної компанії та складаються з витрат на енергоресурси та витратні матеріали, утримання експлуатаційного персоналу, очищення та обмивання рухомого складу, технічне обслуговування, поточні, капітальні та непланові ремонти.

У складі річних експлуатаційних витрат на утримання експлуатаційного персоналу враховуються витрати на оплату праці працівників вагонних депо, пунктів екіпірування.

У складі доходів за період експлуатації залізничного транспортного засобу необхідно врахувати доходи від безпосередньої експлуатації вагона та його ліквідаційну вартість.

Продуктивність рухомого складу збільшується за рахунок оновлення парку, покращення його характеристик, зменшення витрат на виробництво та експлуатацію; для кожного виду рухомого складу – індивідуально. При цьому заходи щодо збільшення продуктивності вагонів повинні відповідати економічній ефективності роботи транспорту.

Для рухомого складу залізничного транспорту річні експлуатаційні витрати на ремонт групуються за такими економічними елементами:

- матеріальні витрати;
- витрати на оплату праці;
- відрахування на соціальні заходи;
- амортизація;
- інші операційні витрати.

До складу одноразових витрат входять вартість одиниці рухомого складу (ціна придбання) та супутні капітальні вкладення (інвестиції), які необхідно здійснювати при впровадженні їх в експлуатацію.

Ліквідаційна вартість рухомого складу визначається на кінцевому етапі їх використання. До неї входять витрати на виведення з експлуатації та утилізацію: кошти, що отримуються від вторинного використання запасних частин та металобрухту; витрати, пов'язані з демонтажем обладнання, що не підлягає ремонту змінних частин та деталей; витрати на транспортування.

Вартість життєвого циклу рухомого складу залізниць залежить від багатьох факторів, які визначаються виробником, оператором рухомого складу, оператором інфраструктури, а також компанією, яка обслуговує рухомий склад.

Вартість життєвого циклу технічних систем залізничного транспорту включає витрати одноразового (інвестиції) та поточного характеру (експлуатаційні витрати) за термін служби (термін корисного використання), а також ліквідаційні витрати, пов'язані з виключенням об'єкта з експлуатації.

Оцінка вартості життєвого циклу технічних систем залізничного транспорту може здійснюватися на будь-якій стадії життєвого циклу. Однак потреба в такій оцінці виникає, перш за все, на етапі придбання при порівнянні з аналогами та на етапі експлуатації при моніторингу економічних показників з метою підтвердження початкових оцінок вартості життєвого циклу.

Вартість життєвого циклу (LCC) технічної системи залізничного транспорту за такого підходу визначається за формулою:

$$LCC = C_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^T (I_t + \Delta K_t - L_t) \cdot \eta_t, \quad (1)$$

де $C_{\text{пр}}$ – ціна придбання технічної системи (первісна вартість), тис. грн.;

I_t – річні експлуатаційні витрати технічної системи, тис. грн.;

ΔK_t – супутні одноразові витрати, пов'язані з впровадженням технічної системи в експлуатації, тис. грн.;

L_t – ліквідаційна вартість технічної системи (ліквідаційне сальдо), тис. грн.;

η_t – коефіцієнт дисконтування;

t – поточний рік експлуатації;

T – термін корисного використання, який встановлюється відповідно до технічних вимог або іншої нормативної документації, років.

З позиції формування грошових потоків вартість життєвого циклу технічних систем залізничного транспорту є сумою індивідуального впливу коштів на кожному тимчасовому етапі терміну їх використання. Слід зазначити, що у разі необхідності адаптації інфраструктури компанії до параметрів нового вагону питомі витрати на її здійснення (тобто в розрахунку на один вагон) враховуються як складові вартості життєвого циклу.

До складу одноразових витрат входять вартість вагону (ціна придбання) та супутні капітальні вкладення (інвестиції), які необхідно здійснювати під час впровадження в експлуатацію.

До супутніх належать витрати:

на обладнання деповської та заводської ремонтних баз, у тому числі витрати на придбання

додаткового випробувального та ремонтного обладнання, діагностичної та перевіркової апаратури, спеціального інструменту, розширення наявних площ тощо;

на збільшення протяжності станційних колій (у разі підвищення вагових норм складів);

на навчання обслуговуючого персоналу (у разі, якщо ці витрати не включені в контрактну вартість об'єкта) та ін.

Річні експлуатаційні витрати визначаються відповідно до [17] та складаються з наступних елементів витрат: оплата праці; відрахування на соціальні заходи; матеріальні витрати; амортизація та інші витрати.

Ліквідаційна вартість технічної системи визначається кінцевому етапі її використання. До її складу входять витрати на виведення з експлуатації та утилізацію: кошти, які отримують від вторинного використання запасних частин та металобрухту, витрати, пов'язані з демонтаж обладнання, що не підлягає ремонту змінних частин і деталей, витрати на транспортування та інші витрати.

Слід зазначити, найбільш очевидна частина витрат (придбання вагона) є меншою частиною вартості життєвого циклу. Більша частина сукупних витрат припадає на витрати з технічного обслуговування та експлуатації вагонів та на момент покупки є неочевидною. Мінімізація вартості життєвого циклу вагону веде до підвищення чистої дисконтованої вартості проекту щодо її придбання та відповідно підвищує капіталізацію компанії. Таким чином, визначення вартості життєвого циклу вагона вимагає наявності докладної інформації про витрати на придбання та експлуатацію та технічне обслуговування технічних систем. За оцінками експертів вартість експлуатації вагонів та їх підтримання у працездатному стані виявляється вищою за вартість придбання у кілька разів.

Концепція вартості життєвого циклу пасажирського вагона при обґрунтуванні управлінських рішень на основі параметричної моделі дозволяє об'єктивно оцінити умови ефективності її впровадження, а також провести аналіз чутливості окремих елементів за зміни кон'юнктури ринків споживаних ресурсів, постачальників, капіталу та ін.

Висновки. На підставі аналізу світового досвіду використання різних моделей життєвого циклу та сучасного підходу до оновлення залізничної техніки запропонована каскадна модель життєвого циклу пасажирського вагона.

Запропонована концепція життєвого циклу пасажирського вагона. Визначено основні етапи життєвого циклу пасажирського вагона. Враховано особливості експлуатації та утримання в технічно справному стані пасажирських вагонів за умов залізниць України.

Концепція життєвого циклу пасажирського вагона, яку запропоновано, дозволить в подальшому систематизувати технічні, технологічні, економічні та екологічні аспекти формування вартості життєвого циклу з метою мінімізації витрат, що пов'язані з втіленням та експлуатацією зразків нової техніки, а також визначити її лімітну ціну.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ГОСТ 31538-2016. Цикл життєвий залізничного рухомого складу. Загальні вимоги. (ГОСТ 31538- 2012 IDT). [Чинний від 2016-10-01]. Київ : Держстандарт України, 2016. 10 с. (Національні стандарти України).
2. Методы оценки жизненного цикла подвижного состава железных дорог : монография / Э. Д. Тартаковский и др. Луганск : Ноулидж, 2011. 174 с.
3. Понтисселли Кристиан. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава. От теории к практике. // Техника железных дорог. 2009. №4 (8). С. 19-24.
4. UNIFE, Guideline for Life Cycle Cost, Vol. 1, Terms & Definitions for Rolling Stock, 1997.
5. UNIFE, Guideline for Life Cycle Cost, Vol. 2, Terms & Definitions for Rolling Stock, 2001.
6. Achieving Availability Cost-effectively in complex Systems, P. Dersin (ALSTOM Transport); Tutorial, RAMS 2009, Fort Worth, TX, USA.
7. 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.
8. Петрушин С. И. Техноэкономика. Оптимизация жизненного цикла изделий машиностроения : Монография. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2010. 139 с.
9. Терешина Н. П., Подсорин В. А. Управление жизненным циклом технических систем на железнодорожном транспорте : учебник для вузов. Москва : Вега-Инфо, 2012. 316 с.

10. Подсорин В. А. Оценка жизненного цикла подвижного состава : учеб.-метод. пособие. Москва : МГУПС (МИИТ), 2016. 34 с.
11. Шапошник В. Ю. Теоретичні дослідження процесу зміни технічного стану вантажних вагонів під час експлуатації. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2018. № 4 (76). С. 134–141.
12. Мямлін С. В., Скалозуб Л. А., Мурадян Л. А. Адаптивні байєсівські моделі оцінювання показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу. // 36. наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 182. С. 80-90.
13. Лаврищева К. М. Програмна інженерія. Київ : Академперіодика, 2008. 319 с.
14. Kossiakoff A., Sweet W. N., Seymour S. J., Biemer S. M. Systems Engineering Principles and Practice. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. 599 с.
15. ДСТУ ГОСТ 15.902-2017 Система разработки и постановки продукции на производство. Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство (ГОСТ 15.902-2014, IDT). [Чинний від 2017-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2017. 31 с. (Національні стандарти України).
16. Вагонное хозяйство : учебник / П. А. Устич и др. Москва : Маршрут, 2003. – 560 с.
17. 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. Tsykl zhyttievyi zaliznychnoho rukhomoho skladu. Zahalni vymohy. [Life cycle of railway rolling stock. General requirements]. (2016). DSTU GOST 31538-2016 from June 1, 2016. Kyiv: Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].
2. Tartakovskiy, E. D. Grishchenko, S. G., Kalabukhin, Yu. E., & Falendysh, A. P. (2011). *Metody otsenki zhiznennogo tsikla podvizhnoho sostava zheleznykh dorog* [Methods for assessing the life cycle of rolling stock of railways]. Luhansk: Noulydzh [in Russian].
3. Pontysselly Krystyan. (2009) Stoymost zhyznennoho tsykla zheleznodorozhnoho podvizhnoho sostava. Ot teoryy k praktyke [Railway rolling stock life cycle cost. From theory to practice]. *Tekhnika zheleznykh dorog – Railway engineering*, 4 (8), 19-24. [in Russian].
4. UNIFE, Guideline for Life Cycle Cost, Vol. 1, Terms & Definitions for Rolling Stock, 1997.
5. UNIFE, Guideline for Life Cycle Cost, Vol. 2, Terms & Definitions for Rolling Stock, 2001.
6. Achieving Availability Cost-effectively in complex Systems, P. Dersin (ALSTOM Transport); Tutorial, RAMS 2009, Fort Worth, TX, USA.
7. 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.
8. Petrushin, S. I. (2010). *Tekhnioekonomika. Optimizatsiya zhiznennogo tsikla izdelii mashinostroeniya* [Technoeconomics. Optimization of the life cycle of mechanical engineering products]. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [in Russian].
9. Tereshina, N. P., & Podsorin V. A. (2012). *Upravlenie zhiznennym tsiklom tekhnicheskikh sistem na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik dlya vuzov* [Life cycle management of technical systems in railway transport: a textbook for universities]. Moskva: Vega-Info [in Russian].
10. Podsorin, V. A., & Kharitonova A. V (2016). *Otsenka zhyznennoho tsykla podvizhnoho sostava* [Rolling stock life cycle assessment]. Moskva: MHUPS (MIIT) [in Russian].
11. Shaposhnik, V. Yu. (2018). Teoretichni doslidzhennya protsesu zmini tekhnichnoho stanu vantazhnykh vagoniv pid chas ekspluatatsii [Theoretical studies of the process of changing the technical condition of freight cars during operation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 4 (76), pp. 134-141 [in Ukrainian].
12. Myamlin, S. V., Skalozub, V. V., & Muradyan, L. A. (2018). Adaptivni baiesivski modeli otsynuyannya pokaznykiv nadiinosti vantazhnykh vagoniv na etapakh zhittevoho tsiklu [Adaptive Bayesian models for assessing the reliability of freight cars at the stages of the life cycle] *Zbirnik naukovykh prats Ukrainського derzhavnogo universitetu zaliznychnoho transportu. – Collected scientific works of Ukrainian state university of railway transport*, 182, pp. 80-90 [in Ukrainian].
13. Lavrishcheva, K. M. (2008). Programna inzheneriya [Software engineering]. Kyiv: Akadempriodika [in Ukrainian].
14. Kossiakoff A., Sweet W. N., Seymour S. J., Biemer S. M. Systems Engineering Principles and Practice. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. 599 с.
15. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Zheleznodorozhnyiy podvizhnoy sostav. Poryadok razrabotki i postanovki na proizvodstvo [System of development and launching into manufacture. Railway rolling stock. Procedure of development and launching into manufacture]. (2016). DSTU GOST 15.902-2017 from July 1, 2017. [in Ukrainian].
16. Ustich, P. A., Haba I. I., Ivashov V. A., Orlov M. V., & Ivanov A. A. (2003). Vagonnoe hozyaystvo [Wagon economy]. Moskva: Marshrut [in Russian].
17. *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].

Martynov Igor Sc.D.

(Professor of Department Wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport)

Alyona Trufanova Ph.D.

(Associate Professor of Department Wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport)

Yuri Kalabukhin Sc.D.

(Professor of Department Marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport)

THE CONCEPT OF THE PASSENGER CAR LIFE CYCLE

The article deals with the issues of a conceptual approach to determining the life cycle of a passenger car. The fleet of passenger car mainly consists of models developed and manufactured in the 70-90s of the last century at car plants in Germany and Russia. They are obsolete both morally and physically. This necessitates the renewal of the passenger car fleet by purchasing cars of both domestic and foreign production. In modern conditions, the user of new technology is interested not only in the purchase price, but also in the after-sales costs. This is reflected in the life cycle cost.

It is proposed to use a cascade life cycle model for a passenger car. The stages of the life cycle of a passenger car during operation on the railways of Ukraine have been determined. The components of each stage of the life cycle of a passenger car are considered.

For a transport company that intends to operate a passenger car, the costs of the first three stages are directly expressed in the initial cost of the car - the purchase price.

The life cycle cost (LCC) of a passenger car will be determined by summing up the individual outflow of funds (expenses) at each specific stage (calculation step) of the service life of the equipment. The life cycle assessment of the technical system of railway transport can work at any stage of the life cycle.

Keywords: *passenger car, life cycle, operating costs, maintenance, depot repairs.*

УДК 625.282:625.032.07

Світлана Сапронова¹, Віктор Ткаченко², Надія Брайковська³, Євген Зуб⁴

¹ Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-1665>

² 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>

³ Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-4020>

⁴ Кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: orcid.org/0000-0001-6560-0662

Автор, відповідальний за листування: doc.sapronova@gmail.com

НАУКОВИЙ ПІДХІД ДО МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ КОЛІСНИХ ПАР РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Величину життєвого циклу коліс рухомого складу визначає періодичність технічного обслуговування, в процесі якого здійснюється обточка для відновлення профілів поверхонь кочення, або заміна повністю зношених коліс. Від технічного стану коліс локомотивів та вагонів залежить безпека руху. На технічне обслуговування та ремонт колісних пар припадає близько 30% всіх витрат підрозділів з ремонту рухомого складу Укрзалізниці. Технології ремонту коліс засновані на повному відновленні профілів коліс шляхом обточки, з використанням якої, їх життєвий цикл зменшується, а витрати збільшуються на 20% і більше. На залізницях України використовується застаріла, необґрунтована, неефективна система контролю формування поверхонь кочення в експлуатації. Тому існує необхідність створення науково обґрунтованого підходу до методів подовження життєвого циклу коліс локомотивів та вагонів при забезпеченні безпеки руху залізничного рухомого складу. Відповідно до запропонованого наукового підходу, профіль коліс відновлюється за оптимальними параметрами, що забезпечує подовжений життєвий цикл колісних пар. В результаті розробленого наукового підходу на 15...25% збільшиться життєвий цикл колісних пар і значно зменшаться витрати залізниці на їх ремонт.

Ключові слова: колісна пара, життєвий цикл, рухомий склад, відновлення, оптимізація, ремонтний профіль.

Вступ. Величину життєвого циклу коліс рухомого складу визначає періодичність технічного обслуговування, в процесі якого здійснюється обточка для відновлення профілів поверхонь кочення, або заміна повністю зношених коліс. Від технічного стану коліс локомотивів та вагонів залежить безпека руху.

Від допускових значень таких показників зносу, як товщина гребеня, параметр крутості гребеня і товщина бандажа суттєво залежать важливі техніко-економічні експлуатаційні показники роботи рухомого складу, а саме: пробіг колісних пар між обточками бандажів, сумарна кількість обточок бандажів за їх експлуатаційний життєвий цикл, загальний ресурс бандажів. Тому існує необхідність створення науково обґрунтованих методів визначення оптимальних ремонтних профілів, що забезпечить зменшення витрат на утримання і ремонт і подовження експлуатаційного життєвого циклу бандажів коліс локомотивів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Головною задачею практично всіх відомих досліджень зношування гребенів коліс було збільшення пробігів колісних пар між

обточками – міжремонтних пробігів, а також сумарних пробігів колісних пар за життєвий цикл бандажів за рахунок зменшення інтенсивності зношування. Технологічний знос під час відновлення коліс, при цьому, зовсім не враховується. Відповідно до [1, 11, 12] при досягненні хоча б одним з параметрів профілю (товщина гребеня, параметр крутості гребеня) одного з коліс колісної пари свого мінімально-допустимого значення колесо обточують. При цьому профіль повністю відновлюється і набуває геометрію нового ремонтного профілю [2, 3, 10, 13, 14, 15].

Більшість існуючих методів оптимізації профілю залізничних коліс мають на меті зниження зносу з врахуванням показників зносу [9, 16-18].

Укрзалізниця використовує стандартні (виробничі) профілі, які формуються на нових колісних парах і бандажах, і ремонтні профілі (табл. 1), які створюють на бандажах при відновленні профілю при першій і наступних обточках. Найбільш поширеними з ремонтних профілів є локомотивний і мотор-вагонний профілі ЗАТ «МІНТЕК». При досягненні на одному з коліс колісної пари мінімальної товщини бандажа вони замінюються на нові із виробничим профілем ДСТУ 11018:2005 [3].

Перехід зі стандартного профілю на ремонтний більш привабливий через те, що при такому варіанті відновлення має місце менша втрата товщини бандажа (табл. 1).

Таблиця 1. Втрата товщини гребеня за одну обточку при різних варіантах відновлення профілів, мм і прогнозована кількість обточок за життєвий цикл

Первинний профіль	Відновлюваний профіль	
	ДСТУ 11018:2005	ЗАТ «МІНТЕК»
ДСТУ 11018:2005	18,1/2	8,9/4
ЗАТ «МІНТЕК»	18,2/2	11,4/3

За даними експлуатації інтенсивність підрізу гребенів як у період припрацювання, так і середня між обточками у ремонтних профілів нижча ніж у стандартного профілю. Це можна пояснити тим, що геометрія ремонтних профілів ближча до природно-зношених, припрацьованих.

Існує велика кількість способів відновлення коліс локомотивів, в якій виділимо три основних види: механічне відновлення бандажів коліс одно - і багатолезовим інструментом за копіром, або програмою; відновлення профільним інструментом; комбіноване відновлення. Повна характеристика цих способів відображена в табл. 2.

Ще з 60-х років минулого сторіччя для відновлення профілів коліс рухомого складу використовувалась фасонна фреза [4], в якій були встановлені рядками циліндричні різальні пластини, розташовані у відповідності з профільною лінією фрези, адекватною профілю колеса. Ножі цієї фрези закріплювались в корпусі за допомогою клинів і заживних гвинтів. Твердосплавні пластини у процесі їх зношування повертали навколо своїх вісів, чим досягалося повне використання кругової різальної кромки (кожна пластинка без переточки працювала в 20 позиціях).

На базі вищезазначеної фрези ЗАТ «МІНТЕК» була розроблена нова фасонна фреза для відновлення профілю колеса рухомого складу залізничного транспорту [5], яка використовується в більшості локомотивних депо Укрзалізниці з 2000 року. Під час обточки профілю колісних пар процес різання починається врізанням різальних пластин ножа. В залежності від провертання фрези в роботу послідовно вступають ножі, які здійснюють знімання шару металу.

Фрези працюють в комплекті з двох штук – правої і лівої, які одночасно обробляють обидва колеса колісної пари. Колісно-фрезерні верстати КЖ-20 найпоширеніші в локомотивних депо України. При обточуванні бандажів забезпечується одержання точного профілю і рівності діаметрів коліс по поверхні кочення бандажа відповідно до сучасних вимог відновлення фасонного профілю коліс під локомотивом.

В результаті обточки бандажів знімається значний шар металу, що є основною причиною скорочення життєвого циклу бандажів в експлуатації. Фасонна фреза, яка використовується на

цих станках має значну вартість. В процесі її експлуатації ножі дуже часто доводиться міняти. Не всі депо можуть дозволити собі часту заміну деталей фрези і тому часто верстати КЖ-20М знаходяться в неробочому стані.

Таблиця 2. Характеристика способів відновлення профілів коліс локомотивів

Механічне відновлення бандажів коліс одно багатозалізним інструментом за копіром або програмою	Відновлення профільним інструментом	Комбіноване відновлення
<ul style="list-style-type: none"> - точіння за копіром, або програмою одним або декількома різакми, встановленими з послідовним зміщенням вздовж вісі колеса, або по різних сторонах колеса; - точіння за копіром, або програмою одною або декількома обергальними головками різакми, які встановлено послідовним зміщенням вздовж вісі колеса, або по різних сторонах колеса; - точіння за копіром, або програмою одною або декількома дисковими фрезами, які встановлено послідовним зміщенням вздовж вісі колеса, або по різних сторонах колеса; - точіння за копіром, або програмою одною або декількома торцевими фрезами, які встановлено послідовним зміщенням вздовж вісі колеса, або по різних сторонах колеса 	<ul style="list-style-type: none"> - точіння одним, або декількома широкими різакми з подачею в радіальному або тангенціальному напрямку; - точіння спіральною протяжкою зовнішнього або внутрішнього торкання; - фрезкування одною, або декількома фасонними фрезами зовнішнього або внутрішнього торкання; - врізне профільне високошвидкісне шліфування фасонним кругом зовнішнього або внутрішнього торкання; - фрезкування комплектом фрез, встановлених із зміщенням вздовж осі колеса; - відновлення поверхні кочення обкатним інструментом 	<ul style="list-style-type: none"> - відновлення з попередньою термообробкою шляхом індукційного нагріву струмами високої частоти поверхні обода; - відновлення з термообробкою для відновлення фізико-механічних властивостей матеріалу поверхні обода колеса; - відновлення з попереднім наплавленням і наступною термообробкою наплавленого шару на ободі колеса; - відновлення з одночасним плазмовим нагріванням шару, який зрізається

Для відновлення профілю бандажів використовуються колесо-токарні верстати двох типів: напільні – з викочуванням колісних пар з-під локомотива і підпільні – без викочування колісних пар з-під локомотива. З огляду на ефективність ремонтних підприємств і залізничних депо перевагу слід віддати підпільним верстатам. Колесо-токарні верстати використовуються, як для обточування поверхні кочення коліс під час планових ремонтів (для підтримки нормованого профілю колеса протягом всього терміну служби), так і для усунення повзунів і інших поточних дефектів. На токарних верстатах з ЧПУ можна також в автоматичному режимі вимірювати геометричні параметри зношених коліс і розраховувати оптимальну товщину шару металу, що знімається, для отримання нормативного профілю колеса.

Підпідлоговий (підрейковий) колісно-токарний верстат А-41 (Trading House, London) призначений для обточки колісних пар без викочування в умовах локомотивного депо [6]. Колісно-токарний верстат UBE-150-N– двох-супортний спеціальний верстат для обточування профілів коліс залізничного рухомого складі. Колісну пару укочують на верстат і викочують після обточки по рейках.

Технологія відновлення профілів поверхонь кочення коліс шляхом наплавлення гребенів вперше було впроваджено на технологічному транспорті ВАТ «Северсталь». Сьогодні технологія відновлення профілів бандажів плазмовим наплавленням досить розповсюджена. Наплавлення зношених гребенів дозволяє приблизно в півтора рази скоротити зняття металу бандажів при обточуванні для отримання нормального профілю і подовжити термін служби бандажа [7].

Аналіз існуючих методів відновлення профілів коліс дає можливість зробити висновок про необхідність створення нових більш економічних і науково обґрунтованих методів відновлення ремонтних профілів з оптимальними параметрами.

Мета і завдання дослідження. Метою є наукове обґрунтування методів збільшення життєвого циклу колісних пар рухомого складу залізниць. Для цього поставлено задачі дослідження впливу параметрів ремонтних профілів коліс локомотивів на експлуатаційні витрати їх утримання і розробку наукового підходу до визначення оптимальних ремонтних профілів коліс локомотивів та розробка цільової функції для оптимізації профілів.

Матеріали і результати дослідження. Дослідження динаміки показників зношування поверхонь кочення коліс дозволили зробити висновок про недоцільність повного відновлення профілю поверхні кочення колеса в ситуації, коли при досягненні мінімально-допустимого значення одним з параметрів інші параметри мають значний запас. У такому випадку більш доцільним було б застосування неповного репрофілювання, завдяки якому відновлюється тільки той параметр, який досяг граничного значення. На цьому принципі заснований метод неповного репрофілювання поверхонь кочення бандажів [8]. Метод відновлення профілю бандажа шляхом неповного обточування, дозволяє збільшити експлуатаційний життєвий цикл бандажів приблизно в 20...40%.

Вибір оптимальних ремонтних профілів поверхонь кочення коліс локомотивів, заснований на оптимізації за мінімумом питомих експлуатаційних витрат на одиницю життєвого циклу бандажів.

Новий підхід заснований на отриманій залежності середньої інтенсивності зносу гребеня I_{cp} від параметра крутості відновленого профілю (qR) (рис. 1).

Тут і далі оптимальні параметри відновленого профілю будуть позначатися жирним шрифтом у круглих скобках: (br) і (qR).

Запропонований підхід полягає в тому, що при обточуванні замість повного відновлення профілю бандажів виконується їх часткове відновлення, при якому товщина гребеня (br) і параметр крутості (qR) визначаються, як оптимальні, і набувають значень відповідно (br) і (qR). На рис. 1, у координатах br – qR , показано схеми повного і часткового (неповного) відновлення профілів бандажів. Лінії «а», «б», «в», «г», «д», аналогічно означають певні обмеження можливих значень параметрів br і qR . Точка $[C](br, [qR])$ відповідає параметрам зношеного профілю у момент прийняття рішення про обточку. Точка $C^*(br^*, qR^*)$ – параметрам профілю при повному відновленні. Точка $(C)(br, (qR))$ – оптимальним параметрам при неповному відновленні.

Значення (br) і (qR) вибираються як оптимальні для наступної цільової функції

$$\frac{V_{жц}}{L_{жц}} = f [(qR), (br)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $\frac{V_{жц}}{L_{жц}}$ – питомі експлуатаційні витрати на одиницю експлуатаційного життєвого циклу бандажа; $V_{жц}$ – експлуатаційні витрати на придбання, формування, ремонт й утримання бандажів протягом експлуатаційного життєвого циклу; $L_{жц}$ – експлуатаційний життєвий цикл.

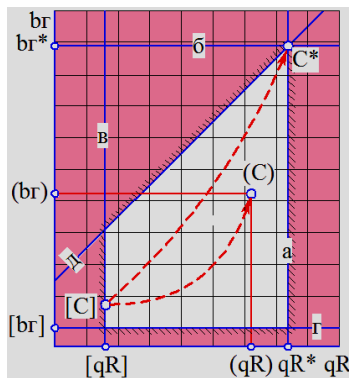


Рис. 1. Схема повного і неповного відновлення параметрів профілю коліс

За одиницю експлуатаційного життєвого циклу бандажа прийнято пробіг бандажа протягом 10^4 км.

Експлуатаційні витрати за функцією (1) мають наступну структуру:

$$V_{\text{жц}} = f(\Pi, V_{\text{ф}}, V_{\text{м}}, V_{\text{о}}, n), \quad (2)$$

в яку входять: Π – вартість пари бандажів; $V_{\text{ф}}$ – витрати на формування колісної пари; $V_{\text{м}}$ – вартість монтажних робіт з заміни колісної пари; $V_{\text{о}}$ – вартість обточки бандажів колісної пари; n – кількість обточок протягом експлуатаційного життєвого циклу.

Кількість обточок, які витримує бандаж протягом експлуатаційного життєвого циклу залежить від товщини нового бандажа d^* , мінімально-допустимої товщини бандажа $[d]$ та середніх значень експлуатаційного і технологічного зносів на момент обточування – $\bar{\delta}_e$ і $\bar{\delta}_T$

$$n = \frac{d^* - [d]}{\bar{\delta}_e + \bar{\delta}_T}. \quad (3)$$

Функціональна залежність технологічного зносу $\bar{\delta}_T$ від параметрів профілю, що відновлюється (b_{Γ}) і (qR) – $\bar{\delta}_T = f[(qR), (b_{\Gamma})]$ – визначається у процесі автоматизованого вимірювання параметрів зношеного профілю.

Експлуатаційний життєвий цикл складається з міжремонтних пробігів і визначається функцією

$$L_{\text{жц}} = n \cdot \{(qR) - [qR]\} \cdot I_{\text{ср}}[(qR)]. \quad (4)$$

Залежності середньої інтенсивності зносу гребеня $I_{\text{ср}}$ від параметра крутості відновленого профілю (qR) визначається функцією (рис. 2)

$$I_{\text{ср}}[(qR)] = -\sqrt{18 - [(qR) - 5,5]^2} + 4,5. \quad (5)$$

Для здійснення неповного обточування автором запропоновано фасонну фрезу аналогом якої є фасонна фреза ЗАО «МІНТЕК» [5].

На рис. 3 показано профілі «МІНТЕК» до і після неповного обточування за допомогою фрези. До обточування профіль мав наступні параметри: $b_{\Gamma} = 24,6$ мм; $qR = 5,2$ мм; $\delta = 1,9$ мм. Після обточування параметри профілю стали: $b_{\Gamma} = 24,6$ мм; $qR = 8,5$ мм; $\delta = 0,8$ мм.

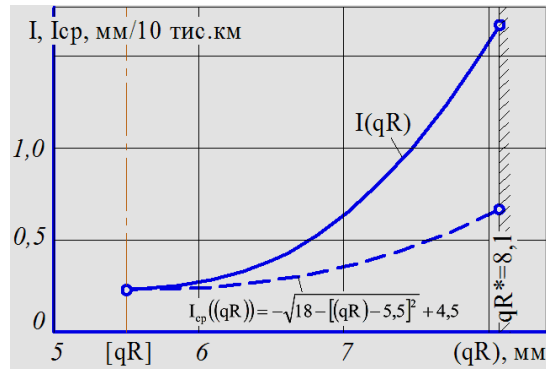


Рис. 2. Залежності інтенсивності зносу гребеня I і середньої інтенсивності зносу гребеня $I_{ср}$ від параметра крутості відновленого профілю (qR)

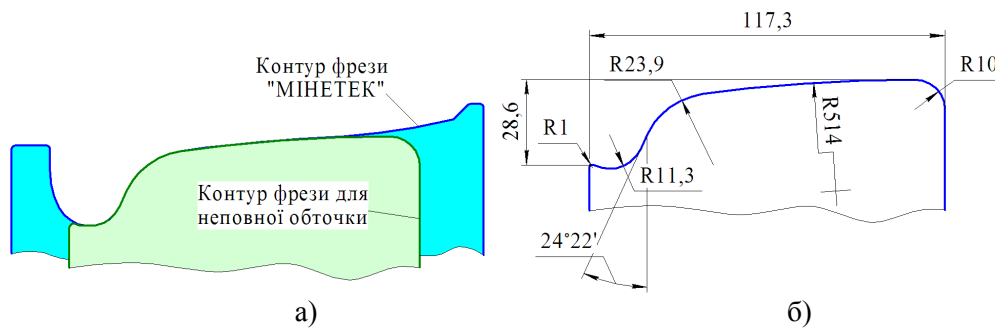


Рис. 3. Контури фасонної фрези для неповного обточування і фасонної фрези «МІНЕТЕК»

а) співвідношення контурів фрез; б) кресленик фрези для неповного обточування

На рис. 4 подано приклад неповного обточування зношеного профілю «МІНЕТЕК» за допомогою запропонованої фрези.

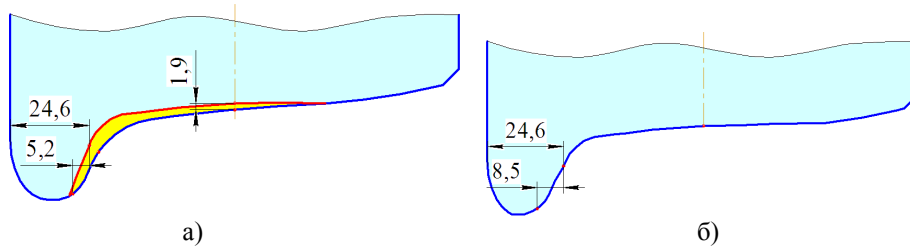


Рис. 4. Зношені профілі «МІНЕТЕК»:

а) до обточування; б) після неповного обточування за допомогою фрези



Рис. 5. Схема неповного обточування зношеного профілю «МІНТЕК»

Основними технологічними параметрами неповного обточування є поперечне зміщення ΔX і подача інструмента ΔY . Технологічні параметри ΔX і ΔY вибираються таким чином, щоб забезпечити оптимальні значення (b_g) і (qR) .

Використання цього методу дає можливість зменшити технологічний знос поверхні кочення коліс колісної пари, і тим самим збільшити її життєвий цикл на 15...25%.

Висновки. Повне відновлення профілю поверхні кочення колеса в ситуації, коли при досягненні мінімально-допустимого значення одним з параметрів інші параметри мають значний запас є недоцільним. Науковий підхід до вибору оптимального ремонтного профілю коліс локомотивів забезпечує мінімальні питомі витрати на утримання колісних пар протягом експлуатаційного життєвого циклу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція з формування, ремонту й утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм. Відомчий нормативний документ 32.0.07.001.2001 (нова редакція). Київ: Державна адміністрація залізничного транспорту України. Укрзалізниця, 2011. 168 с.
2. Yann Bezin a and Björn A. Pålsson. (2021). A Hybrid Multi-Criteria Decision Making Model for Defect-Based Condition Assessment of Railway Infrastructure. *Vehicle system dynamics*. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1942079>.
3. Сапронова, С.Ю. Технологічний знос бандажів коліс локомотивів, як фактор впливу на їх ресурс. *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля*. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. №2 (120). С. 292–295.
4. Сотніков, К.М., Морозов, В.О. Технічне обслуговування та ремонт вагонів: навчальний посібник. Харків. ТО «Ексклюзив», 2014. 204с.
5. Пат. 25091 Україна. МПК В 23 С 5/11, 5/14. Фасонна фреза для відновлення профілю колеса рухомого складу залізничного транспорту / Колот В. О., Малиновський М. Д., Лишаєв Г. П., Сергієчко М. І., Кортун С. А., Колот О. В.; заявник і патентовласник ЗАТ «МІНТЕК», Державна адміністрація залізничного транспорту України. № 97041796 ; заявл. 16.04.97 ; опубл. 25.12.98. Бюл. № 6.
6. RAFAMET S.A. Железнодорожное оборудование. 2009. URL: <http://www.8e.ru/firms/f1471.php>.
7. Технологическая инструкция по плазменному упрочнению гребней колесных пар тягового подвижного состава. К.: Министерство транспорта. Укрзалізниця, 1998. 8 с.
8. Johansson, A. & Nielsen J.O. (2003). Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations. *Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit*, 217, 135–146.
9. Shevtsov, I.Y., Markine, V.L. & Esveld C. Shape Optimisation of Railway Wheel Profile under Uncertainties. 12. URL: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/354.pdf>
10. Сапронова, С.Ю., Ткаченко, В.П., Зуб, Є.П. Ресурсозбереження при відновленні коліс рухомого складу залізниць. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля*. Северодонецьк: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2017. №3[233]. С.183-189. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2017_3_36

11. Правила технічного обслуговування, ремонту та формування колісних пар вантажних вагонів СТП 04-001:2015, затверджених наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 11.11.2015 № 483-Ц. К.: Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2015.
12. Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар ЦВ-ЦЛ-0062. Київ: Київське ПКТБ по вагонах, 2005. 103 с.
13. Grassie, S.L. (1996). Models of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies: results of benchmark test. *Veh Syst Dyn*, 25, 243–262.
14. Enblom R. & Berg M. (2005). Simulation of railway wheel profile development due to wear - influence of disc braking and contact environment. *Wear*, 258, 1005–1063.
15. Зуб Є.П., Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П. Аналіз систем моніторингу параметрів зносу колісних пар рухомого складу залізниць. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. Вип. 1(33). Т.1. С. 107-117. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-1-10>
16. Ignesti, M., Innocenti, A., Marini, L., Meli, E. & Rindi, A. (2013). Development of a wear model for the wheel profile optimisation on railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 51, 1363–1402. URL.: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423114.2013.802096>
17. Ye, Y., Qi, Y., Shi, D., Sun, Y., Zhou, Y. & Hecht, M. (2020). Rotary-scaling fine-tuning (RSFT) method for optimizing railway wheel profiles and its application to a locomotive. *Railway Engineering Science*. 28, 160–183. URL.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-020-00212-z>
18. Polach, O. & Nicklisch, D. (2016). Wheel/rail contact geometry parameters in regard to vehicle behaviour and their alteration with wear. *Wear*. 366-367, 200–208. URL.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164816300199?via%3Dihub>
19. Kassa, E., Andersson, C. & Nielsen J.C.O. (2006). Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout. *Veh Syst Dyn*, 44(3), 247–258.

REFERENCES

1. Instruksiya z formuvannya, remontu y utrymannya kolisnykh par tyahovoho rukhomoho skladu zaliznyts' Ukrayiny kolyi 1520 mm. Vidomchyy normatyvnyy dokument 32.0.07.001.2001 (nova redaktsiya). [Instruction on formation, repair and maintenance of wheel pairs of traction rolling stock of the railways of Ukraine of a track of 1520 mm. Departmental normative document 32.0.07.001.2001 (new edition)]. Kyiv: Derzhavna administratsiya zaliznychnoho transportu Ukrayiny. Ukrzaliznytsya [State Administration of Railway Transport of Ukraine. Ukrzaliznytsia], 2011. 168 s. [in Ukrainian].
2. Yann Bezin a and Björn A. Pålsson. (2021). A Hybrid Multi-Criteria Decision Making Model for Defect-Based Condition Assessment of Railway Infrastructure. *Vehicle system dynamics*. URL.: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1942079>.
3. Sapronova, S.Yu. (2008). Tekhnolohichnyy znos bandazhiv kolis lokomotyviv, yak faktor vplyvu na yikh resurs [Technological wear of locomotive wheel tires as a factor influencing their resource]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu im. V. Dalya [Bulletin of the East Ukrainian National University. V. Dahl]*, 2 (120). 292–295. [in Ukrainian].
4. Sotnikov, K.M., Morozov, V.O. (2014). Tekhnichne obsluhovuvannya ta remont vahoniv: navchal'nyy posibnyk [Maintenance and repair of wagons: a textbook]. Kharkiv. TO «Eksklyuzyv», 2014. 204 p. [in Ukrainian].
5. Patent 25091 Ukrayina. MPK V 23 S 5/11, 5/14. Fasonna freza dlya vidnovlennya profilyu kolesa rukhomoho skladu zaliznychnoho transport [Shaped mill for restoration of a profile of a wheel of a rolling stock of railway transport] / Kolot V. O., Malynovs'kyi M. D., Lyshayev H. P., Serhiyechko M. I., Kortun S. A., Kolot O. V.; zayavnyk i patentovlasnyk ZAT «MINETEK», Derzhavna administratsiya zalizn. transp. Ukrayiny. № 97041796 ; zayavl. 16.04.97; opubl. 25.12.98. Byul. № 6. URL.: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=49334> [in Ukrainian].
6. RAFAMET S.A. Railway equipment. 2009. URL.: <http://www.8e.ru/firms/f1471.php>.
7. Tekhnologicheskaya instruksiya po plazmennomu uprochneniyu grebney kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava [Technological instruction for plasma hardening of wheelset flanges of traction rolling stock]. K.: Ministry of transportation. Ukrzaliznytsya, 1998. 8 p. [in Russian].
8. Johansson, A. & Nielsen J.O. (2003). Out-of-round railway wheels-wheel-rail contact forces and track response derived from field tests and numerical simulations. *Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit*, 217, 135–146.
9. Shevtsov, I.Y., Markine, V.L. & Esveld C. Shape Optimisation of Railway Wheel Profile under Uncertainties. 12. URL.: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/354.pdf>
10. Sapronova, S.Yu., Tkachenko, V.P., & Zub, Ye.P. (2017). Resursozberezhennya pry vidnovlenni kolis rukhomoho skladu zaliznyts' [Resource conservation in the restoration of wheels of railway rolling stock]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu im. V.Dalya [Bulletin of the East Ukrainian National University. V.Dal]*. Syeverodonets'k: Vydvo SNU im. V.Dalya, 2017. №3[233]. 183-189. URL.: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2017_3_36 [in Ukrainian].
11. Pravyla tekhnichnoho obsluhovuvannya, remontu ta formuvannya kolisnykh par vantazhnykh vagoniv STP 04-001:2015, zatverdzhennykh nakazom Derzhavnoyi administratsiyi zaliznychnoho transportu Ukrayiny vid 11.11.2015 № 483-TS. K.: Derzhavna administratsiya zaliznychnoho transportu Ukrayiny [State Administration of Railway Transport of Ukraine], 2015. [in Ukrainian].
12. Instruksiya z ohlyadu, obstezhennya, remontu ta formuvannya vahonnykh kolisnykh par TSV-TSL-0062. Kyiv: Kyivivs'ke PKTB po vahonakh, 2005. 103 p. [in Ukrainian].

13. Grassie, S.L. (1996). Models of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies: results of benchmark test. *Veh Syst Dyn*, 25, 243–262.
14. Enblom R. & Berg M. (2005). Simulation of railway wheel profile development due to wear - influence of disc braking and contact environment. *Wear*, 258, 1005–1063.
15. Zub, Ye.P., Sapronova, S.Yu. & Tkachenko, V.P. (2019). Analiz system monitorynhu parametriv znosu kolisnykh par rukhomoho skladu zaliznyts' [Analysis of systems for monitoring the parameters of wear of wheel pairs of railway rolling stock]. *Zbirnyk naukovykh prats' DUIT. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi» [Collection of scientific works of DUIT. Transport Systems and Technologies series]*, 2019, 1(33), 1. 107-117. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-33-1-10>
16. Ignesti, M., Innocenti, A., Marini, L., Meli, E. & Rindi, A. (2013). Development of a wear model for the wheel profile optimisation on railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 51, 1363–1402. URL.: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423114.2013.802096>
17. Ye, Y., Qi, Y., Shi, D., Sun, Y., Zhou, Y. & Hecht, M. (2020). Rotary-scaling fine-tuning (RSFT) method for optimizing railway wheel profiles and its application to a locomotive. *Railway Engineering Science*. 28, 160–183. URL.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-020-00212-z>
18. Polach, O. & Nicklisch, D. (2016). Wheel/rail contact geometry parameters in regard to vehicle be-haviour and their alteration with wear. *Wear*. 366-367, 200–208. URL.: <https://www.sciencedirect.com/science/article /abs/pii /S0043164816300199?via%3Dihub>
19. Kassa, E., Andersson, C. & Nielsen J.C.O. (2006). Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout. *Veh Syst Dyn*, 44(3), 247–258.

*Svitlana Sapronova*¹, *Viktor Tkachenko*², *Nadiya Braikovska*¹, *Yevgen Zub*¹

¹ Department Railway carriage and Railway carriage property, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

² Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine

SCIENTIFIC APPROACH TO THE METHODS OF INCREASING THE LIFE CYCLE OF WHEELS OF RAILWAY VEHICLES

The value of the life cycle of rolling stock wheels is determined by the frequency of maintenance, in the process of which the turning is carried out to restore the profiles of the rolling surfaces, or the replacement of completely worn wheels. Traffic safety depends on the technical condition of the wheels of locomotives and wagons. Maintenance and repair of wheelsets accounts for about 30% of all costs of Ukrzaliznytsia's rolling stock repair units. Wheel repair technologies are based on the complete restoration of wheel profiles by turning, using which, their life cycle is reduced, and costs increase by 20% or more. The railways of Ukraine use an outdated, unreasonable, inefficient system of control over the formation of rolling surfaces in operation. Therefore, there is a need to create a scientifically sound approach to methods of extending the life cycle of the wheels of locomotives and wagons while ensuring the safety of railway rolling stock. According to the proposed scientific approach, the wheel profile is restored to optimal parameters, which provides an extended life cycle of wheelsets. As a result of the developed scientific approach the life cycle of wheel pairs will increase by 15... 25% and the expenses of the railway for their repair will considerably decrease.

Keywords: wheel pair, life cycle, rolling stock, restoration, optimization, repair profile.

Юрій Щербина¹

¹ Доцент, Кафедра «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9574-2757>

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

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГІДРАВЛІЧНОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛИВАНЬ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА

Основою сучасної методології дослідження рейкових транспортних засобів є математичне моделювання. Математична модель повинна враховувати такі властивості як просторовий характер руху окремих рухомих частин досліджуваного об'єкту, нелінійні характеристики пружно-дисипативних елементів системи, випадковий характер збурень, які передаються на гідравлічний апарат, властивості рідини, як робочого тіла. Гідравлічний гаситель коливань являє собою гідравлічний циліндр з штоком та системою калібрувальних отворів і клапанів, які спрацьовують в залежності від режиму роботи. Для опису характеристики роботи гідравлічного амортизатора, як правило, використовується класичний закон течії рідини через дросельний отвір, заснований на законах Бернуллі і рівнянні витрати рідини [1]. Використання такої закономірності для сучасних конструкцій пристроїв гасіння коливань вагонів не відповідає опису дійних процесів, які відбуваються за типовими умовами експлуатації. До особливостей робочих процесів пасивних гасителів коливань слід віднести взаємодію робочої рідини з рухомими деталями та її течію по каналах і через калібровані отвори з місцевим штучним опором. Окрім того, внаслідок постійних перепадів тиску через зміну напрямків руху рідини виникають пульсації, які слід враховувати при проектуванні конструкції для більш ефективної роботи пристрою. У статті представлена розроблена узагальнена математична модель гідравлічного гасителя коливань пасажирського вагона типу НЦ-1100, яка враховує нестационарні гідромеханічні процеси, що дозволяє провести дослідження впливу робочих параметрів на характеристики роботи апарату.

Ключові слова: гідравлічний гаситель коливань, математична модель, гідромеханічні процеси, параметри робочого тіла.

Вступ. Проектування і дослідження гідравлічних гасителів коливань пасажирських вагонів передбачає наявність математичного опису робочих процесів – розробку математичної моделі, визначення параметрів, які забезпечують встановлені характеристики і надають змогу їх оптимізувати за необхідними критеріями. Особливість робочих процесів, які відбуваються в гідравлічному гасителі коливань зумовлено взаємодією робочої рідини з рухомими елементами пристрою і її спрямованим рухом по каналам і робочим камерам з місцевим опором. В гідравлічному гасителі коливань внаслідок зворотно-поступального руху при стисканні робочої рідини відбуваються постійні зміни тиску, витрати рідини як робочого тіла, в залежності від зусилля, що передається на шток апарату від зовнішнього навантаження через елементи кріплення. Поєднання складних нестационарних гідромеханічних процесів, що виникають в гідравлічному гасителі коливань та загалом впливають на його працездатний стан при діючих режимах навантажень, потребує ретельного вивчення з застосуванням наближеної математичної моделі розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. На візках пасажирських вагонів найбільш широко застосовуються гідравлічні гасителі коливань пасивного типу. Дослідженню роботи гідравлічних апаратів присвячені праці [1 – 4].

У статті [1] приведені узагальнені конструктивні схеми гасителів коливань різних типів і результати експериментальних досліджень впливу частоти змін тиску робочої рідини в гідроприводі на ефективність роботи гасителів. Показані результати досліджень дозволяють визначити діапазон частот, в якому доцільно використовувати окремий тип гасителя. Проте, слід відмітити відсутність математичних моделей і аналітичні залежності, що дозволяють визначити робочі параметри гідравлічного апарату, а також встановити їх вплив на коефіцієнт гасіння коливань.

В роботі [2] приведені гідравлічні і розрахункові схеми гідроприводу з гасителями пульсацій тиску робочої рідини різних типів. Математичні моделі гасителів отримані шляхом їх декомпозиції на узагальнені структурні елементи (гідравлічні вузли) і розрахунку нестационарних гідродинамічних процесів за допомогою методу Фур'є. Приведені математичні моделі дозволяють досліджувати вплив конструктивних і робочих параметрів гідроприводів і параметрів робочої рідини на коефіцієнт підсилення пульсацій, однак вони не дозволяють визначати перехідні процеси в каналах і камерах, що при значних частотах коливань і значній довжині камер і каналів може призвести до суттєвої похибки.

Автор статті [3] описує метод розрахунку коефіцієнта підсилення (гасіння) гідравлічного вібраційного контуру, у якому цей коефіцієнт отриманий шляхом диференціації гідравлічного вібраційного контуру на наступні структурні елементи: канали і камери, з використанням операторних хвильових опорів. Приведена математична модель дозволяє досліджувати вплив конструктивних і робочих параметрів інтерференційного перетворювача пульсацій і параметрів робочої рідини на коефіцієнт підсилення (гасіння) пульсацій. Проте в даній статті відсутні відомості стосовно визначення перехідних процесів в каналах і камерах гідравлічного пристрою при установлених режимах роботи.

Існуючі на сьогоднішній день підходи до створення та подальшого аналізу складних гідромеханічних систем до яких належить гідравлічний гаситель коливань мають недостатньо чітко окреслені конструктивні схеми, які не відповідають існуючим технічним рішенням. При моделюванні роботи пристрою, як правило, розглядаються відокремлені структурні частини всього апарату, що не надає повного уявлення про перехідні процеси, які відбуваються у загальному контурі. З метою створення і удосконалення роботи гідравлічних пристроїв на стадії проектування [4] слід враховувати зміни робочих параметрів об'єкта при різних умовах експлуатації, мати можливість оптимізувати роботу гідравлічного апарату на стадії попереднього розрахунку, оцінювати ризики від перевантажень клапанної системи для встановлення граничних режимів роботи, визначати його працездатність за умов зміни конструкції.

Мета і завдання дослідження. Метою написання статті є опис створеної узагальненої математичної моделі пасивного гідравлічного гасителя коливань пасажирського вагона за аналогом типу НЦ-1100, яка дозволить провести дослідження робочих процесів, встановити вплив на них конструктивних змін і робочих параметрів. Відповідно до аналізу проведених досліджень перед автором цієї статті поставлено наступне завдання: розробити і описати узагальнену математичну модель гідравлічного амортизатора, яка відобразить нестационарні гідромеханічні процеси, характерні для конкретної конструкції апарату та замкнутого контуру системи в цілому.

Матеріали та методи дослідження. Вивченню процесів в елементах гідравлічних пристроїв гасіння коливань з метою визначення характерних вихідних параметрів роботи апаратів передували дослідження нестационарного періодичного руху робочої рідини в трубопроводах гідравлічних систем [5-9]. Такі процеси мають місце в гідравлічних приводах та їх елементах, де відбувається стиснення робочого тіла (рідини). Стійкість роботи гідравлічних клапанів, які мають гідравлічні апарати, з метою підтримання в заданих межах тисків або витрат рідини

значною мірою визначається нестационарними гідромеханічними процесами, що протікають в трубопроводах цих систем, каналах і камерах гідравлічних пристроїв [15-17].

В праці [5] нестационарний ламінарний, симетричний дії осі, ізотермічний процес руху робочої рідини в круглому трубопроводі з абсолютно жорсткими стінками представлений одним рівнянням в циліндричних координатах:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial r} - \frac{1}{v_t} \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho v_t} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

де ρ – щільність робочої рідини;

v_t – кінематичний коефіцієнт густини робочої рідини;

r – радіус трубопроводу;

$\frac{\partial p}{\partial x}$ – градієнт тиску.

Градієнт тиску змінюється за таким законом:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -a_p \sin \omega t, \quad (2)$$

де a_p – амплітуда пульсацій тиску;

ω – частота коливань.

Вирішення рівняння (1) може бути виконано аналітично за допомогою прямого і зворотного перетворення Лапласа і Бесселевих функцій. При цьому швидкість робочої рідини визначається за умови ($r=0$). Потрібно відмітити, що вихідні рівняння отримані з рівнянь Нав'є-Стокса, які в загальному випадку описують нестационарну ізотермічну течію густої рідини в каналах (повітропроводах) і камерах елементів об'ємних гідроприводів. З урахуванням того, що швидкість робочої рідини в окружному напрямку дуже мала, рівняння Нав'є-Стокса і нерозривності в циліндричній системі координат представлені у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} P_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v_t \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} \right] &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} \\ P_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v_t \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} - \frac{u_r}{r^2} \right] &= \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho r u_x) \right] = 0, \quad (4)$$

де P_x, P_r – проекції масової сили, яка приходить на одиницю маси робочої рідини;

$u_x = f(x, r, t)$ – швидкість робочої рідини по осі x ;

$u_r = f(r, x, t)$ – радіальна швидкість робочої рідини.

Рівняння (3) і (4) розглядають спільно з початковими і граничними умовами. Їх вирішення може бути реалізовано лише для окремих видів течій рідини. При цьому приймається ряд припущень, що виключають фізичні явища, які не враховуються даною математичною моделлю: відсутність кавітації і розриву робочої рідини. Окрім того слід вважати що значення температури і густини рідини є постійними і дорівнюють їх середнім значенням.

Як відомо, гідравлічні гасителі коливань перетворюють кінетичну енергію руху окремих частин візка та кузова вагона в потенційну енергію стиснення робочої рідини в порожнинах корпусу та теплову енергію внаслідок перетікання рідини крізь місцеві гідравлічні опори [10, 11]. При цьому основна частина перетвореної кінетичної енергії розсіюється.

Зміна робочого ходу гасителя коливань виконується примусово в процесі руху рейкового екіпажу, з яким з'єднані верхні і нижні вузли кріплення апарату.

Розглянемо узагальнену розрахункову схему гідравлічного гасителя коливань, приведену на рис.1.

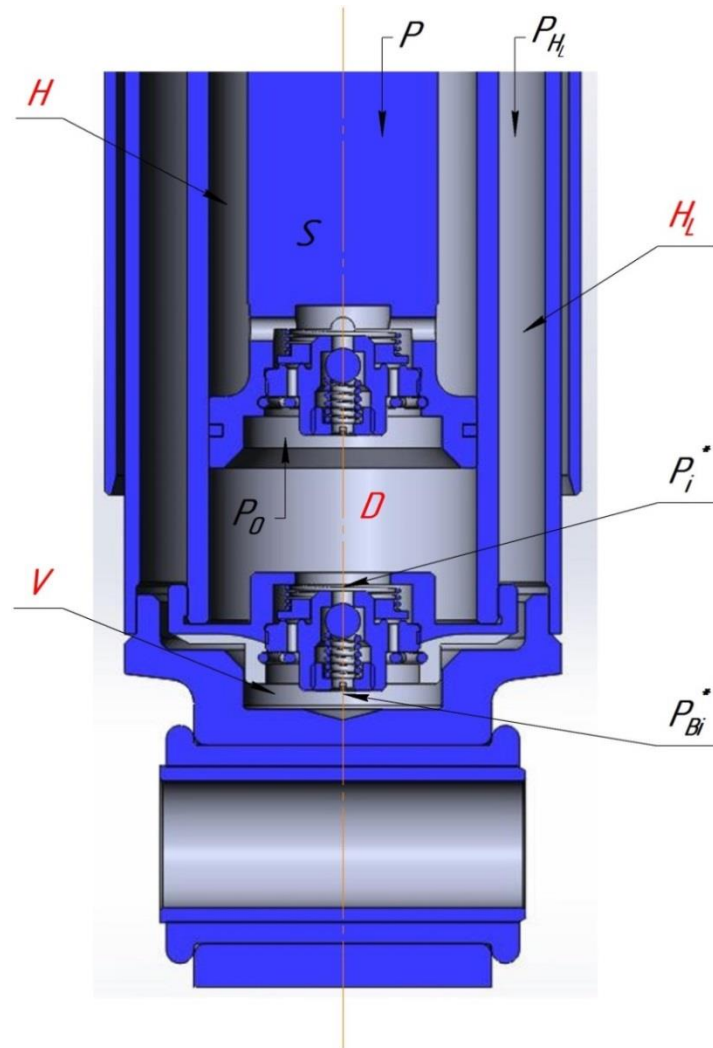


Рис. 1. Узагальнена розрахункова схема гідравлічного гасителя коливань пасажирського вагона

На схемі представлений корпус гідравлічного гасителя коливань типу НЦ-1100 з рухомим штоком, який витискає робоче тіло (рідину) з нижньої камери циліндра D до верхньої камери H і камер корпусу H_L . В кожній з камер, які з'єднані системою клапанів є отвори, за допомогою яких рідина перетікає з однієї камери до іншої при ході стиснення і розтягу. Сила P , яка діє на шток S , подолавши опір в'язкого тертя створює в камері D з рідиною тиск p_0 , що становить:

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= P_0 / F_0 \\ P_0 &= (P + H_L) / (1 + f_0 \operatorname{sign} S_0 \dot{S}_0) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де P_0 – сила, що діє на шток S площиною F_0 з нижньої сторони камери циліндра D ;

P – сила, яка стискає гаситель коливань, або сила опору його стисненню;

P_{H_L} – сила, яка діє на поршень зі сторони верхньої камери циліндра H_L ;

f_0 – коефіцієнт сили тертя при переміщенні S_0 штока S .

Сила P , яка діє на шток може бути розрахована за такою формулою:

$$P = Z_k S_k + \beta_k |S_k| \dot{S}_k, \quad (6)$$

де Z_k – жорсткість силового елемента k ;

β_k – коефіцієнт в'язкого опору його деформації;

S_k – сумарна деформація пружно-в'язких елементів конструкції, розташованих послідовно з гасителем коливань.

$$S_k = S - \sum_{i=1}^{n_k} k_i S_i \operatorname{sign} S, \quad (7)$$

де S – величина ходу стиснення гасителя коливань;

S_i – величина стиснення гасителя коливань, зумовлена перетіканням рідини з нижньої порожнини циліндра D до порожнини корпусу H_L .

Силі P_{ei}^* відповідає приведена до площі штока сила P_{ei} , що дорівнює:

$$P_{ei} = P_{ei}^* F_0 / F_i, \quad (8)$$

де F_i – площа камери під нижнім клапаном.

При перетіканні рідини через отвори виникає перепад тиску Δp , який визначає витрати Q^v (зміни об'єму) або витрати $Q^m = \rho Q^v$ (зміни маси) рідини за одиницю часу. Витрати по об'єму можуть бути розраховані за допомогою співвідношення:

$$Q^v = \mu f \sqrt{2|\Delta p|/p} \operatorname{sign} \Delta p, \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт витрат;

f – площа перетину отвору;

ρ – густина рідини.

Коефіцієнт витрат залежить від числа Рейнольдса і визначається за формулою:

$$\operatorname{Re}_e = (d/v) \sqrt{2|\Delta p|/p}, \quad (10)$$

де d – характерний розмір отвору;

v – кінематичний коефіцієнт густини.

Канали перетікання рідини з однієї камери до іншої можуть складатися з послідовно розташованих гідравлічних опорів, які характеризуються величиною f_{ij} площини перетину дроселюючого отвору і коефіцієнтом μ_{ij} об'ємних витрат і віднесених до каналів в камеру V . Індекс j відповідає порядковому номеру гідравлічного опору в даному каналі.

Об'ємні витрати рідини Q_i^v з камери D в камеру V складатимуть:

$$Q_i^v = \left(\sum_j \mu_{ij} f_{ij} \right) \sqrt{2|p_0 - p_i|/\rho_i} \operatorname{sign}(p_0 - p_i), \quad (11)$$

де ρ_i – густина рідини в камері V .

$$\rho_i = \rho(1 + V_i(p_i, t)), \quad (12)$$

де ρ – густина рідини при $p = 0,1$ МПа і температурі $t = 0^\circ\text{C}$;

$V_i(p_i, t)$ – відносна зміна начального об'єму рідини внаслідок зміни тиску і початкової температури перед її стисненням;

p_i – перевищення тиску над атмосферним;

t – початкова температура рідини.

Відносна зміна об'єму рідини $\Delta V_p / V_p$ при можливих змінах початкових температур не перевищуватиме 0,1%. Тому вважатимемо, що $V_i(p_i, t)$ буде відбуватись внаслідок стиснення. Модуль об'ємної пружності рідини залежить від тиску і температури і може бути записаний у вигляді:

$$E_p = dp / dV, \quad (13)$$

При розрахунках гідравлічного гасителя коливань необхідно розглядати два значення модуля об'ємної пружності рідини: модуль пружності $E_{p.i.}$ при ізотермічному процесі, коли температура при стисненні зберігається постійною (повільне або статичне навантаження), і модуль пружності $E_{p.a.}$ при адиабатичному процесі, коли температура рідини при стисненні змінюється і теплообміном в досліджуваному інтервалі часу Δt можна знехтувати.

Модуль пружності при ізотермічному процесі для масла АМГ-10 як робочу рідину, можна представити у вигляді:

$$E_{p.i.} = (67 + 0,44t - 0,4p)^{-1} \cdot 10^5, \quad (14)$$

Для адиабатного процесу модуль $E_{p.a.}$ становитиме:

$$E_{p.a.} = 18,4 \cdot 10^2 (1 - 4,4 \cdot 10^{-3}t) (1 + 8,2 \cdot 10^{-3}p), \quad (15)$$

Відносна зміна начального об'єму рідини $V_i(p_i, t)$ матиме вираз:

$$V_i(p_i, t) = \int_0^p E_{p.i.}^{-1}(p, t) dp, \quad (16)$$

Для масла АМГ-10 вираз буде мати вигляд:

$$V_i = (67 + 0,44t - 0,2p) p \cdot 10^{-5}, \quad (17)$$

Враховуючи що значення V_i не є значним, при наближених розрахунках можна вважати:

$$\left. \begin{aligned} V_i &\approx (67 + 0,44t) p \cdot 10^{-5} = (p / E_{p.i.}) \\ E_{p.i.} &\approx (67 + 0,44t)^{-1} \cdot 10^5 \text{ МПа} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

Аналогічно:

$$V_a = (82 E_{p.a.})^{-1} \cdot 10^{-4} \ln(1 + 8,2 \cdot 10^{-3}p), \quad (19)$$

Наближено матимемо:

$$\left. \begin{aligned} V_a &\approx p / E_{p.a.} \\ E_{p.a.} &\approx 18,4 \cdot 10^2 (1 - 4,4 \cdot 10^{-3}t) \text{ МПа} \end{aligned} \right\}, \quad (20)$$

Розрахунки свідчать що використання формул (18) і (20) приводять до похибки у визначенні V при $p = 100$ МПа, яка становить менше 5%.

Тоді, вираз (12) можна представити у вигляді:

$$\rho_i = \rho (1 + p_i / E_p), \quad (21)$$

Витрати рідини по масі з камери D визначимо таким чином:

$$Q_o^m = F_0 \rho_0 v_0 = \sum_{i=1}^N \rho_i Q_i^v = \sum_{i=1}^N F_i \rho_i v_i^*, \quad (22)$$

де v_i^* – швидкість переміщення поршня в i -й камері.

Після інтегрування виразу отримаємо:

$$F_0 \rho_0 S_0^* = \sum_{i=1}^N F_i \rho_i S_i^*, \quad (23)$$

де S_0^* – переміщення штока в камері D внаслідок витіснення рідини з камери.

Повне переміщення штока складатиме:

$$S_0 = S_0^* + \Delta S_0, \quad (24)$$

де ΔS_0 – додаткове переміщення штока внаслідок об'ємного стиснення рідини в камері D .

$$\Delta S_0 = (m_0 / \rho_0^0 F_0) - (m_0 / \rho_0 F_0), \quad (25)$$

$$m_0 = \rho_0^0 F_0 (\bar{l} - S_0^*), \quad (26)$$

де m_0 – маса рідини в камері D ;

ρ_0^0 – відстань між штоком і нижньою частиною гасителя коливань у вихідному положенні.

Враховуючи до уваги вираз (21) отримаємо після перетворень:

$$\Delta S_0 = (p_0 E_{p0}^{-1} - p_0^0 E_{p00}^{-1})(l - S_0^*) / (1 + p_0 E_{p0}^{-1}), \quad (27)$$

де E_{p0} і E_{p00} – значення модулів об'ємної пружності рідини в камері D при тисках p_0 і p_0^0 відповідно.

Підставимо цей вираз в формулу (25) і замінимо переміщення приведеними значеннями:

$$S_i = F_i S_i^* / F_0, \quad (28)$$

Тоді

$$S_0 = \sum_{i=1}^N \frac{(1 + p_0^0 E_{p00}^{-1})(1 + p_i E_{pi}^{-1})}{(1 + p_0 E_{p0}^{-1})^2} S_i + \frac{p_0 E_{p0}^{-1} - p_0^0 E_{p00}^{-1}}{1 + p_0 E_{p0}^{-1}} \bar{l}, \quad (29)$$

Коефіцієнт при S_i у формулі (29) наближено дорівнює одиниці. Так як стискання рідини суттєво виражене при значеннях $p_0 \gg p_0^0$, розкладемо її на більш прості формули:

$$S_0 = \sum_{i=1}^N S_i + p_0 \bar{l} \bar{E}_p^{-1}, \quad (30)$$

$$\bar{E}_p = \bar{E}_{p0} + \bar{p}_0, \quad (31)$$

$$E_p = E_p(\bar{p}_0, t), \quad (32)$$

де \bar{p}_0 – середнє очікуване значення тиску;

E_p – модуль об'ємної пружності рідини, який відповідає тиску \bar{p}_0 при температурі t для ізотермічного або адіабатичного процесів в залежності від розглянутого навантаження - повільного або швидкого.

Для проведення розрахунків формули (30), (31) і (32) можна представити наступним чином:

$$S_0 = \sum_{i=1}^N S_i + S_{0i} / k_p, \quad (33)$$

$$k_p = \bar{E}_p F_0 / l, \quad (34)$$

При чисельному інтегруванні елемент гідравлічного гасителя коливань з коефіцієнтом жорсткості k_p розглядається як пружний елемент, розташований послідовно з елементом n з коефіцієнтом жорсткості k_x , при цьому в формулі (6) значення k_x буде замінено значенням

$k_k^* = k_k k_p / (k_k + k_p)$, а замість суми в формулі (33) використовується сума $S_0 = \sum_{i=1}^N S_i$.

Для розрахунку S_0 необхідно визначити значення S_i . Для цього використаємо формулу (11).

Після перетворень отримаємо диференційні рівняння виду:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_i &= \sqrt{\beta_i^{-1} |S_0 - j_i|} \operatorname{sign}(S_0 - j_i), \quad j_i = P_{Bi} (1 + k_i \operatorname{sign} S_i \dot{S}_i) \\ \text{якщо } &((0 < S_i < \Delta_i) \cap (|S_0 - P_{Bi}| > k_i P_{Bi})) \cup \\ &\cup ((S_i = 0) \cap (S_0 > (1 + k_i) P_{Bi}(0))) \cup ((S_i = \Delta_i) \cap (S_0 < (1 - k_i) P_{Bi}(\Delta_i))), \\ \text{інакше } &\dot{S}_i = 0; \\ &i = 1, \dots, N. \end{aligned} \right\}, \quad (35)$$

де P_{Bi} – приведена величина сили відновлення;

Δ_i – обмеження переміщення штока;

k_i – коефіцієнт сил тертя в манжетах ущільнення.

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &= 0,5 F_0^3 \rho_i \left(\sum_j \mu_{ij} f_{ij} \right)^{-2}; \\ \rho_i &= \rho (1 + \bar{\rho}_i E_p^{-1}). \end{aligned} \right\}, \quad (36)$$

де μ_{ij} – приведений коефіцієнт витрат, який залежить від загального перепаду тиску на окремо взятому елементі гідравлічного опору.

Елемент гідравлічного опору включає в себе набір послідовно діючих місцевих гідравлічних опорів (опори, які зумовлюють перепад тиску внаслідок зміни перетинів отворів по довжині каналу, наявність клапанів, заслінок і т. д.). Приведений коефіцієнт витрат або приведений коефіцієнт опору $\mu_{ij}^{-2} = \xi_{ij}$ елемента може бути визначений за допомогою виразу:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^{n_j} (f_{ij}^m / f_{ij}^k)^2 \xi_{ij}^k = l_{ij} \int_0^{l_{ij}} (f_{ij}^m / f_{ij}(x))^2 \xi_{ij}(x) dx, \quad (37)$$

де f_{ij}^m – найменша по довжині елемента площа перетину отвору;

$f_{ij}^k, f_{ij}(x)$ – площини отвору каналу в перетині з номером k або з координатою x по довжині даного елемента гідравлічного опору;

$\xi_{ij}^k, \xi_{ij}(x)$ – коефіцієнти гідравлічного опору цих перетинів.

Отвори, які створюють гідравлічні опори, підрозділяють на насадки і діафрагми (отвори в тонкій стінці) [5]. Для отворів типу «насадка» при $\frac{l_{om}}{d_2} > 1$ значення ξ наближено визначаються за допомогою формули для $10^2 < \operatorname{Re}_p < 15 \cdot 10^4$ як:

$$\xi = [1,23 + 58 \operatorname{Re}_p^{-1} l_{om} / d_2]^2 + \lambda l_{om} / d_2, \quad (38)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує тертя рідини при проходженні крізь отвори.

Для отворів типу «діафрагма» при $\frac{l_{om}}{d_2} \ll 1$ рекомендується визначати коефіцієнт ξ за допомогою формул:

$$\xi = (1,4 + 1,5 \operatorname{Re}_p^{-1})^2, \quad \text{якщо } 25 < \operatorname{Re}_p < 300, \quad (39)$$

$$\xi = (0,592 + 0,27 \operatorname{Re}_p^{-1/6})^{-2}, \quad \text{якщо } 300 < \operatorname{Re}_p < 10^4, \quad (40)$$

$$\xi = (0,592 + 5,5 \operatorname{Re}_p^{-1/2})^{-1}, \quad \text{якщо } 10^4 < \operatorname{Re}_p, \quad (41)$$

При визначенні коефіцієнтів сил гідравлічного опору за допомогою формул (38) - (41) потрібно мати на увазі що значення які визначаються є лише наближеними оцінками, так як ці формули враховують випадки стаціонарних безкавітаційних течій [12, 13]. Якщо виникає кавітація (особливо при незначних протидіючих тисках), коефіцієнти ξ зростають, досягаючи значень $\xi = 2,6$ для насадок. Теоретично і експериментально доведено, що значення ξ для насадок у випадках, коли тиск на виході отворів менший, ніж $0,42$ від тиску на їх вході, а також у випадках, коли тиск прикладається раптово, може бути таким же як у випадку отвору в тонкій стінці, тобто розраховуватись за формулами (39) – (41) і досягати значень $2 \dots 2,8$. Окрім того, течія рідини через отвори елементів дроселювання гідравлічного гасителя коливань не є стаціонарною, так як мають місце порівняно швидкі зміни швидкості течії і перепаду тиску.

Конструкція гідравлічного гасителя коливань типу НЦ-1100 є такою, що коефіцієнт гідравлічного опору елемента β_i є функцією значень S_0, S_i, P_{Bi} , а також прискорення руху амортизуючого тіла.

Таким чином, оцінюючи попередньо значення параметрів, можна вирішити рівняння (35) і розрахувати S_0 за допомогою формули (33). Значення S_i розраховуються за допомогою формули (8) по заданим функціям $P_{Bi}(s_i)$, структура яких визначається конструкцією штока.

В камері корпусу гасителя коливань H_L (рис. 1), сила $P_{Bi}(s_i)$ виникає лише при стисненні рідини в цій камері. В цьому випадку матимемо:

$$P_{Bi} \approx E_p F_0 (S_i^* / S_0 - 1) \sigma_0 (S_i^* - S_0), \quad (42)$$

$$S_i^* = F_0 S_i / F_i, \quad (43)$$

де $\sigma_0 (S_i^* - S_0)$ – одинична функція Хевісайда.

Величина сили P_g , яка долає опір гідравлічного гасителя коливань руху може бути визначена за формулою:

$$P_g = -\beta \frac{[(h_0 + \Delta)\dot{\Delta} + (d_0 + \delta)\dot{\delta}]^2}{(h_0 + \Delta)^2} \text{sign}[(h_0 + \Delta)\dot{\Delta} + (d_0 + \delta)\dot{\delta}], \quad (44)$$

де $\Delta, \dot{\Delta}$ – відповідно відносні переміщення і швидкість відносних переміщень робочого тіла вздовж осі Z ;

$\delta, \dot{\delta}$ – відповідно відносні переміщення і швидкість відносних переміщень робочого тіла вздовж осі Y .

h_0, d_0 – відстані вдовж осей Z і Y відповідно між точками кріплення гасителя в початковий момент часу.

Проекції цієї сили на осі координат складатимуть:

$$\left. \begin{aligned} P_{gz} &= P_g \frac{h_0 + \Delta}{\sqrt{(h_0 + \Delta)^2 + (d_0 + \delta)^2}} \\ P_{gy} &= P_g \frac{d_0 + \delta}{\sqrt{(h_0 + \Delta)^2 + (d_0 + \delta)^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (45)$$

З приведених вище формул виходить, що коефіцієнт β непружного опору гасителя деформаціям залежить від температури рідини гасителя коливань [14]. Якщо вважати, що процес тепловіддачі є квазістаціонарним, тобто нехтувати кількістю теплоти, що витрачається на нагрів корпусу гасителя коливань і його деталей, або навпаки – брати до уваги ці витрати, збільшуючи коефіцієнт тепловіддачі, то температура рідини в гасителі коливань може бути оцінена з урахуванням визначення потужності сил непружного опору пристрою:

$$W = P_g \dot{S} = \beta \dot{S}^3 = \alpha \Delta t, \quad (46)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

Δt – різниця температур t_p робочої рідини і $t_{зовн}$ зовнішнього середовища.

З рівняння (46) отримуємо формулу зміни температури робочої рідини гасителя коливань:

$$\Delta t = \frac{\beta}{\alpha} |\dot{S}|^3, \quad (47)$$

Для випадку стаціонарних гармонійних коливань з амплітудою A і циклічною частотою ω отримуємо:

$$\Delta t = \frac{4\beta\omega^3}{3\pi\alpha} A^3, \quad (48)$$

Визначення температури робочої рідини дозволяє встановити відповідне значення коефіцієнта гідравлічного опору гасителя коливань.

Висновки. Запропонована узагальнена математична модель гідравлічного гасителя коливань на базі конструкції гасителя типу НЦ-1100 дозволяє враховувати конструктивні особливості та умови його роботи і може бути використана для моделювання та розрахунку гідромеханічних процесів з застосуванням програмно-апаратних комплексів. Дана модель може використовуватись для аналізу працездатності конструкції гідравлічного апарату залежно від фізичних властивостей робочого тіла в складі моделі просторових коливань рейкового екіпажу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скворчевский Е. А., Усатый А. П. Гасители колебаний давления в гидравлических системах // Вестник машиностроения. 1980. № 4. С. 14-15.
2. Ушкалов В. Ф., Резников Л. М., Иккол В. С. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств. Киев: Наук. думка, 1989. 240 с.
3. Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Математичні моделі і розрахункові дослідження гідравлічних гасителів і підсилювачів пульсацій тиску // Східно - Європейський журнал передових технологій. 2004. №5(11). С. 88-93.
4. Іщенко В.М., Шатаєв В.М., Щербина Ю.В. Підходи з конструктивного удосконалення гідравлічного амортизатора типу НЦ-1100 візків пасажирських вагонів. // Вагонний парк. 2017. №11-12 (128-129). С.38-42.
5. Попов Д. Н. Нестационарные гидромеханические процессы. Москва: Машиностроение, 1982. 240 с.
6. Кузнецов В. В., Ананьев К. А. Гидромеханика и основы гидравлики. (Теоретический курс с примерами практических расчетов): учеб. пособие. Кемерово, 2013. 264 с.
7. Головин А. Н. Гасители гидравлических систем. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. №5. С.136-143.
8. Молочников В. М., Мазо А. Б., Малюков А. В., Калинин Е. И., Михеев Н. И., Душина О. А., Паерелий А. А. Особенности формирования вихревых структур в отрывном течении за выступом в канале при переходе к турбулентности // Теплофизика и аэромеханика. 2014. No 3. С. 325-334.
9. Жданов А. В. Математическая модель позиционного гидропривода. // Вестник СибАДИ, 2016. выпуск 3 (49), С.87-93.
10. Yu Rao, Feng Bo Li, Bernhard Weigand. Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Flow Friction in Channels With Dimples of Different Shapes. J. Heat Transfer. 2015. Vol. 137, pp. 1-10.
11. Popov I. A., Shchelchikov A. V., Zubkov N. N., Lei R. A., Gortyshov Y. F. Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. Russian Aeronautics. 2014. Vol. 57. No. 4, pp. 395-401.
12. Ramashanakar Paswan, J. Das, N. Kumar, Ajit Kumar, Santosh Kr.Mishra, Sujit Kumar. Hydraulic circuit in damper :an overview. Applied Mechanics and Materials. 2014 Vol. 592-594(2014), pp. 2056-2060.
13. Piotr Czop, Damian Gąsiorek, Jacek Gniłka, Damian Ślawik, Grzegorz Wszolek. Fluid-structure simulation of a valve system used in hydraulic dampers. Modelowanie inzynierskie. 2012. nr 45. t.14, pp. 197-205.
14. Y. Guo, C. P. Liu, B. W. Luo. Thermal-hydraulic modelling and analysis of hydraulic damper for impact cylinder with large flow. Journal of vibroengineering. 2013. Vol. 15. Issue 3, pp. 1208-1220.
15. Hongxing Gao, Maoru Chi, Liangcheng Dai, Jungang Yang, and Xiaozhi Zhou. Mathematical Modelling and Computational Simulation of the Hydraulic Damper during the Orifice-Working Stage for Railway Vehicles. Mathematical Problems in Engineering. 2020. Vol. 2020. Article ID 1830150, pp. 1-23.
16. W. Teng, H. Shi, R. Luo, J. Zeng, and C. Huang. Improved nonlinear model of a yaw damper for simulating the dynamics of a high-speed train. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2018. Vol. 233, no. 7, pp. 651–665.

17. X. Z. Zhou, M. R. Chi, H. X. Gao et al. Research on calculation method of hydraulic damper dynamic characteristics. *Electric Drive for Locomotives*, 2018. Vol. 4, pp. 88–91.

REFERENCES

1. Skvorchevskiy, Ye.A., & Usatyy A.P. (1980). Gasiteli kolebaniy davleniya v gidravlicheskiykh sistemakh [Dampers of pressure fluctuations in hydraulic systems]. *Vestnik mashinostroyeniya – Mechanical Engineering Bulletin*, 4, 14-15 [in Russian].
2. Ushkalov, V.F., Reznikov, L.M., & Ikkol, V.S. (1989). *Matematicheskoye modelirovaniye kolebaniy rel'sovykh transportnykh sredstv [Mathematical modeling of oscillations of rail vehicles]*. Kyiv: Nauk. dumka [in Ukrainian].
3. Andrenko, P.M., & Dmytriyenko, O.V. (2004). Matematychni modeli i rozrakhunkovi doslidzhennya hidravlichnykh hasyateliv i pidsylyuvachiv pul'satsiy tysku [Mathematical models and computational studies of hydraulic dampers and pressure pulsation amplifiers]. *Skhidno – Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11), 88-93 [in Ukrainian].
4. Ishchenko, V.M., Shataev, V.M., & Shcherbyna, Y.V. (2017). Pidkhodi z konstruktyvnoho udoskonalennya hidravlichnoho amortyzatora typu NTS-1100 vizkiv pasazhyr'skykh vahoniv [Approaches to constructive improvement of hydraulic shock absorber type HLI-1100 carriages of passenger cars]. *Wagon park №11-12 (128-129)*, 38-42. [In Ukrainian].
5. Popov, D.N. (1982). *Nestatsionarnyye gidromekhanicheskiye protsessy [Non-stationary hydromechanical processes]*. Moscow: Mashinostroyeniye [in Russian].
6. Kuznetsov V.V., Anan'yev K.A. (2013) *Gidromekhanika i osnovy gidravliki. (Teoreticheskyy kurs s primerami prakticheskikh raschetov): ucheb. posobiye. [Hydromechanics and the basics of hydraulics. (Theoretical course with examples of practical calculations): textbook]*. Kemerovo [in Russian].
7. Golovin, A.N. (2019). Gasiteli gidravlicheskiykh system [Dampers for hydraulic systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk №5*, 136-143. [in Russian].
8. Molochnikov, V.M., Mazo, A.B., Malyukov, A.V., Kalinin, Ye.I., Mikheyev, N.I., Dushina, O.A., & Payereliy, A.A. (2014). Osobennosti formirovaniya vikhrevykh struktur v otryvnom techenii za vystupom v kanale pri perekhode k turbulentnosti [Features of the formation of vortex structures in a separated flow behind a rib in a channel during the transition to turbulence]. *Teplofizika i aeromekhanika, No 3*, 325-334. [in Russian].
9. Zhdanov A.V. (2016). Matematicheskaya model' pozitsionnogo gidroprivoda [Mathematical model of a positional hydraulic drive]. *Vestnik SibADI, vypusk 3 (49)*, 87-93. [in Russian].
10. Yu Rao, Feng Bo Li, & Bernhard Weigand. (2015). Experimental and Numerical Study of Heat Transfer and Flow Friction in Channels With Dimples of Different Shapes. *J. Heat Transfer Vol. 137*. 1-10. [in English].
11. Popov, I.A., Shchelchikov, A.V., Zubkov, N.N., Lei, R.A., & Gortyshov, Y.F. (2014). Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. *Russian Aeronautics. Vol. 57. No. 4*. 395–401. [in English].
12. Ramashanakar, Paswan, J., Das, N., Kumar, Ajit, Kumar, Santosh, Kr.Mishra, & Sujit, Kumar. (2014). Hydraulic circuit in damper :an overview. *Applied Mechanics and Materials Vol. 592-594(2014)*. 2056-2060. [in English].
13. Piotr, Czop, Damian, Gąsiorek, Jacek, Gniłka, Damian, Sławik, & Grzegorz, Wszolek. (2012). Fluid-structure simulation of a valve system used in hydraulic dampers. *Modelowanie inżynierskie nr 45. t.14*. 197-205. [in English].
14. Y., Guo, C.P., Liu, & B.W., Luo. (2013). Thermal-hydraulic modelling and analysis of hydraulic damper for impact cylinder with large flow. *Journal of vibroengineering. Vol. 15. Issue 3*. 1208-1220. [in English].
15. Hongxing, Gao, Maoru, Chi, Liangcheng, Dai, Jungang, Yang, & Xiaozhi, Zhou. (2020). Mathematical Modelling and Computational Simulation of the Hydraulic Damper during the Orifice-Working Stage for Railway Vehicles. *Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2020. Article ID 1830150*. 1-23. [in English].
16. W., Teng, H., Shi, R., Luo, J., Zeng, & C., Huang. (2018). Improved nonlinear model of a yaw damper for simulating the dynamics of a high-speed train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol. 233, no. 7*. 651–665. [in English].
17. X. Z., Zhou, M.R., Chi, & H.X., Gao et al. (2018). Research on calculation method of hydraulic damper dynamic characteristics. *Electric Drive for Locomotives. Vol. 4*. 88–91. [in English].

*Iurii Shcherbyna*¹

¹ Assistant professor, Department of Wagons and Wagon Institution, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF THE GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDRAULIC EXTINGUISHER OF OSCILLATIONS OF THE PASSENGER CAR

The study of the processes associated with the use of working fluids in the elements of hydraulic drives was preceded by studies of the unsteady periodic movement of the working fluid in the pipelines

of hydraulic systems. Such processes take place in hydraulic drives and their elements, and are associated with the compressibility of the working fluid. The stability of the operation of hydraulic valves, which are supplied to hydraulic systems in order to maintain, within the required limits, pressures or flow rates, is also largely predetermined by non-stationary hydro mechanical processes occurring in the pipelines of these systems, channels and chambers of hydraulic devices. The peculiarities of the working processes of passive vibration dampers of passenger cars include the interaction of the working fluid with moving parts and its flow through the channels and through the calibrated holes with local artificial resistance. For in-depth analysis of changes in operating parameters, it is necessary to use a mathematical model that should reflect the processes that occur during the operation of the hydraulic device. In the presented article the generalized mathematical model of the hydraulic damper of fluctuations of the passenger car of the HЦ-1100 type is developed. This model takes into account the special operating conditions of the hydraulic shock absorber, which allows you to study the impact of operating parameters on the performance of the device.

Keywords: *hydraulic vibration damper, mathematical model, hydro mechanical processes, parameters of the working fluid.*

Альона Ловська¹, Олексій Фомін^{2*}, Дмитро Скуріхін³, В'ячеслав Бондаренко⁴

¹ Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

² Кафедра Вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, Україна, 04071. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

³ Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

⁴ Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4019-4017>

* Автор, відповідальний за листування: fomin1985@ukr.net

КОМБІНАТОРНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ ВІДМОВ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВАГОНІВ

Підтримка високого рівня обслуговування систем електрообладнання пасажирських вагонів вимагає проведення досліджень у галузі удосконалення методів і засобів технічного діагностування. Електронні пристрої автоматичного регулювання та захисту, які розміщуються у розподільному щиті вагона є одними з найвідповідальніших елементів у системі електрообладнання, що забезпечують її надійну, ефективну та безпечну експлуатацію. При розрегулюванні у процесі експлуатації пристроїв автоматичного регулювання та захисту, напруга та струм у мережі електрообладнання може перевищувати допустимий рівень, що приводить до виходу з ладу споживачів електроенергії, акумуляторної батареї та генератора. Крім того, самі напівпровідникові прилади є дуже чутливими до короточасних перевантажень, в яких навіть при незначних перевантаженнях виникає пробій або обрив струмопровідного шару. Сучасні тенденції розвитку вітчизняного та зарубіжного парку пасажирських вагонів свідчать про різке ускладнення елементної бази вагонів. Більшою мірою це стосується систем електрообладнання вагонів, де всі функції управління, контролю і діагностики виконує електроніка. Підтримка високого рівня обслуговування таких систем вимагає проведення досліджень в області вдосконалення методів і засобів технічного діагностування. З цією метою авторами розроблений метод побудови оптимальних контрольних і діагностичних тестів, в основі якого лежить комбінаторний підхід. Метод легко реалізується на ЕОМ.

Ключові слова: вагони, електрообладнання, відмова, контроль технічного стану, оптимізація, тести, комбінаторний підхід

Вступ. Електрообладнання пасажирського вагона складне і працює в важких умовах експлуатації, на нього діють значні динамічні зусилля та атмосферні впливи, тому для гарантування надійності роботи до нього висувують високі вимоги.

Електронні пристрої автоматичного регулювання та захисту, які розміщуються у розподільному щиті вагона є одними з найвідповідальніших елементів у системі електрообладнання, що забезпечують її надійну, ефективну та безпечну експлуатацію. Так, наприклад, у разі несправності апаратури регулювання заряду акумуляторної батареї, можливий вихід її з ладу внаслідок постійного недозарядження або перезарядження. При розрегулюванні у процесі експлуатації пристроїв автоматичного регулювання та захисту, напруга та струм у мережі електрообладнання може перевищувати допустимий рівень, що приводить до виходу з ладу споживачів електроенергії, акумуляторної батареї та генератора. Крім того, самі напівпровідникові прилади є дуже чутливими

до короткочасних перевантажень, в яких навіть при незначних перевантаженнях виникає пробій або обрив струмопровідного шару.

Сучасні тенденції розвитку вітчизняного та зарубіжного парку пасажирських вагонів свідчать про різке ускладнення елементної бази вагонів. Більшою мірою це стосується систем електрообладнання вагонів, де всі функції управління, контролю і діагностики виконує електроніка. Підтримка високого рівня обслуговування таких систем вимагає проведення досліджень в області вдосконалення методів і засобів технічного діагностування.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для забезпечення безпеки руху на залізниці науковці всього світу працюють над вдосконаленням методів і засобів технічного діагностування та контролю технічного стану рухомого складу та його частин. Шляхи забезпечення безпеки руху та вдосконалення контролю технічного стану колісних пар розглядаються у роботах [1 - 4], гальмівних систем рухомого складу у [5, 6], гасників коливань ходових частин у праці [7]. Цікаві також дослідження присвячені моніторингу роботи виконавчих пристроїв систем нахилу кузовів вагонів [8] та системі контролю цілісності поїзда [9]. В роботах [10, 11] досліджені надійність та акустичні параметри роботи кліматичних систем пасажирських вагонів. Сучасний стан та виклики у питаннях енергозабезпечення пасажирських вагонів викладені у праці [12].

Питання обґрунтування стратегії технічного обслуговування рейкового рухомого складу, зокрема пасажирських вагонів висвітлені у роботах [13 - 15].

Одним із прикладів реалізації комп'ютерної системи контролю технічного стану системи електрообладнання пасажирських вагонів є Поїзна автоматизована інформаційно-діагностична система «ВИД» (ПАІДС «ВИД») [16]. Дана система контролює аналогові та дискретні сигнали електрообладнання вагонів, а при виході їх за допустимі межі інформує начальника поїзда про несправність або відмову. На рис. 1 зображені дискретні сигнали всіх пасажирських вагонів поїзда, що згруповані за підсистемами, колір сигналу відповідає стану системи.

Електроснабжение										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Режим управления "Автоматический"	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Режим управления "Ручной"	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Нормальный режим н/в магистрали	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Питание в магистраль	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Питание от магистрали	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1 ступень	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2 ступень	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3 ступень	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Сеть 380 В, 50 Гц	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Авария	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Авария генератора	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Замыкание фазы генератора на корпус	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Обрыв фазы генератора	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Отказ ограничителя	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Защита ограничителя	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
R изоляции н/в магистрали (шина "+") < 20 кОм	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
R изоляции н/в магистрали (шина "-") < 20 кОм	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

↑
Предыдущая группа

↓
Следующая группа

Esc
Закреть окно

Рис. 1. Вікно ПАІДС «ВИД» для контролю технічного стану системи електрообладнання вагона

Питання побудови оптимальних контрольних та діагностичних тестів для систем більш ранніх комплексів електрообладнання розглянуті в дисертаційному дослідженні [17].

Експлуатація пасажирських вагонів показала, що визначальним видом відмов електронних блоків є параметричні відмови, які пов'язані з порушенням налаштування блоків у процесі експлуатації внаслідок вібрації, старіння елементів, температурних перевантажень і ін. Враховуючи даний факт, основний акцент дослідження спрямований саме на оптимізацію методів контролю та діагностування електронних блоків.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методу побудови оптимальних контрольних і діагностичних тестів для систем електрообладнання пасажирських вагонів, який можна легко реалізувати на ЕОМ, за рахунок чого скоротиться час на тестування та підвищиться експлуатаційна готовність рухомого складу.

Матеріали та методи дослідження. Аналіз відомих методів побудови оптимальних тестів показав, що їх можна розбити на дві групи: точні і наближені. Перша група методів ефективна для відносно невеликої кількості перевірок і несправностей, друга - має більш широкі можливості по кількості перевірок і несправностей, але має ряд обмежень і якість рішення виходить значно гірше оптимального.

Одним із шляхів вирішення даної задачі є підвищення ефективності точних методів. Для цього пропонується новий підхід до побудови контрольних і діагностичних тестів, в основі якого лежить зведення задачі побудови тестів до класу комбінаторних задач.

У загальному випадку задача побудови оптимальних контрольних і діагностичних тестів зводиться до розв'язання задачі мінімального покриття матриці станів. Згадані вище методи засновані на побудові і наступному перетворенні до диз'юнктивної нормальної форми (ДНФ) логічної функції виду

$$F(G) = D_i(G) \wedge \dots \wedge D_k(G) \quad (1)$$

де $D_i(G)$ – диз'юнкція перевірок, що виявляють i -й стан системи;

k – число технічних станів контрольованої системи.

З ростом числа технічних станів контрольованої системи і числа допустимих елементарних перевірок дана задача стає трудомісткою. Наприклад, при побудові мінімального діагностичного тесту за допомогою точного алгоритму при $k = 20$ логічна функція має 190 множників. У зв'язку з цим виникає завдання розробки більш ефективного методу побудови оптимальних тестів, який добре формалізується і зручний для реалізації на ЕОМ.

В основі розробленого методу лежать такі положення:

- розглядається множина перевірок $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ як множина логічних змінних, де n – число допустимих елементарних перевірок;

- послідовність значень змінних g_1, g_2, \dots, g_n є комбінацією перевірок;
- значення змінних комбінації перевірок вказують на її склад: якщо i -а перевірка входить в комбінацію, то $g_i=1$ і $g_i=0$ в іншому випадку. Наприклад, якщо для $g=6$ комбінація перевірок має вигляд 001011 , це означає, що розглядаються перевірки з номерами 3, 5 і 6;

- рангом комбінації перевірок (r) є кількість вхідних в неї перевірок. Наприклад, комбінація виду 1100101 має ранг $r = 4$;

- вартістю комбінації перевірок є сума вартостей входить в комбінацію перевірок;
- залежно від виду комбінації перевірок, диз'юнкції перевірок D приймають значення "0" або «1», причому $D_i = 1$, якщо хоча б одна з перевірок, що входить в комбінацію, входить в диз'юнкцію D_i , і $D_i = 0$ - в іншому випадку. Наприклад, для комбінації перевірок ($n=6$) 001100 диз'юнкція виду $g_1 \vee g_3 \vee g_6$ дорівнює «1». В результаті тотожних перетворень функція $F(G)$ перетворюється в ДНФ;

- кон'юнкції, що входять до ДНФ, розглядаються як комбінації перевірок, які є рішеннями рівняння виду $F(G) = 1$.

Таким чином, завдання пошуку оптимальних тестів може бути сформульовано таким чином: знайти таку комбінацію перевірок G , що $F(G) = 1$ і вартість (C) комбінації перевірок мінімальна ($C < C_{min}$).

Для вибору оптимального тесту необхідно сформулювати варіанти комбінацій перевірок і вибрати з них варіант, що задовольняє зазначеним вище умовам. Проілюструємо процес пошуку оптимального тесту на прикладі. Нехай необхідно сформулювати варіанти комбінацій

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

перевірок для системи електрообладнання пасажирського вагона і вибрати оптимальний варіант за вартістю. Матриця технічних станів системи наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Матриця технічних станів системи електрообладнання вагона

G\A	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
g ₁	0	1	1	0	0
g ₂	1	0	0	1	1
g ₃	0	0	1	1	0
g ₄	1	1	0	1	0

C _i
3
2
4
1

У стовпчиках таблиці 1 розташовується множина непрацездатних технічних станів системи електрообладнання a_k (приймаємо $k = 5$), в рядках - множина елементарних перевірок g_n (приймаємо $n = 4$). Кожна з перевірок дозволяє контролювати певний технічний стан системи. Прийнято наступні позначення непрацездатних технічних станів: a_1 - несправні джерела електрообладнання, a_2 - несправні електронні блоки, a_3 - несправні споживачі, a_4 - несправна мережа освітлення і a_5 - несправне опалення. C_i - умовні вартості перевірок g_1 і g_4 .

У таблиці 2 наведені варіанти комбінацій перевірок, значення вартості варіанта, значення функції $F(G)$ і значення C_{min} , отримані на відповідному етапі. Оптимальним є тест під номером 12. Його вартість дорівнює 5. Тобто для контролю системи електрообладнання вагона необхідно виконати першу (g_1) і другу (g_2) перевірки.

Таблиця 2. Побудова оптимального тесту для системи електрообладнання вагона за допомогою розробленого методу

№	G	F(G)	C	C _{min}
1	0001	0		
2	0010	0		
3	0011	0		
4	0100	0		
5	0101	0		
6	0110	0		
7	0111	1	7	7
8	1000	0		
9	1001	0		
10	1010	0		
11	1011	0		
12	<u>1100</u>	1	5	5
13	1101	1	6	5
14	1110	1	9	5
15	1111	1	10	5

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

У наведеному прикладі комбінації перевірок формуються послідовно відповідно до номеру. Бінарний код, відповідний до комбінації перевірок, є бінарним еквівалентом десяткового номера комбінації. Наведений спосіб генерації комбінацій перевірок є найбільш простим, але малоефективним. Пояснимо на прикладі.

Загальна кількість комбінацій перевірок довжиною g дорівнює $2^g - 1$ і може бути розбита на групи, в залежності від рангу комбінації. Для розглянутого вище прикладу підмножини комбінацій перевірок, що мають однаковий ранг, мають вигляд:

$$\begin{aligned}r=1: & \{1000, 0100, 0010, 0001\} \\r=2: & \{1100, 1010, 1001, 0110, 0101, 0011\} \\r=3: & \{1110, 1101, 1011, 0111\} \\r=4: & \{1111\}\end{aligned}$$

Якщо генерацію здійснювати в порядку збільшення рангу (табл. 3), то оптимальний результат буде отримано на 5 кроці. Отже, вибір способу генерації комбінацій перевірок впливає на час пошуку оптимального варіанта.

Таким чином, можна зробити висновок про можливість скорочення часу побудови оптимального тесту для системи електрообладнання вагона шляхом: зменшення кількості розглянутих варіантів (відкидаючи комбінації перевірок, які не є рішенням) і вибору оптимальної стратегії пошуку.

Таблиця 3. Залежність кроку пошуку оптимального тесту від рангу

№	r	G	$F(G)$	C	C_{\min}
1	1	1000	0		
2		0100	0		
3	1	0010	0		
4		0001	0		
5	2	<u>1100</u>	1	5	5
6		1010	0		
7		1001	0		
8		0110	0		
9		0101	0		
10		0011	0		
11	3	1110	1	9	5
12		1101	1	6	5
13		1011	0		
14		0111	1	7	5
15	4	1111	1	10	5

Експериментальне дослідження розробленої стратегії пошуку оптимального тесту

Метою експериментального дослідження є оцінка ефективності доопрацьованого методу побудови оптимальних тестів засобів діагностування електронних блоків пасажирських вагонів.

У загальному випадку, задача побудови оптимальних контрольних та діагностичних тестів для системи електрообладнання пасажирських вагонів зводиться до рішення задачі мінімального покриття матриці. Тому надалі не будемо виділяти «контрольний тест» чи «діагностичний тест», а будемо говорити «тест».

Для кожної обраної комбінаторної конфігурації тесту необхідно визначити чи є вона рішенням. Це виконується шляхом перевірки двох умов:

- а) реалізуєності, тобто $F(G)=1$;
- б) мінімізації вартості, тобто $B < B_{\min}$

Перевірка кожної з цих умов вимагає певного часу. Тому правильно обрана стратегія пошуку оптимального тесту, що полягає у визначенні послідовності перевірки вищевказаних двох умов, дозволяє скоротити час пошуку. Завдяки цьому можливо підвищити ефективність розробленого методу. Враховуючи вищевикладене, за критерій ефективності методу прийнято час пошуку оптимального тесту.

Аналіз факторів, що впливають на час перевірки вищевказаних умов показав, що час перевірки умови реалізуєності залежить від n та k і різко збільшується з ростом їх значень, а час перевірки умови мінімізації вартості залежить тільки від n .

У ході експерименту було встановлено, що час перевірки вартості комбінаторної конфігурації складає для $n = 5 \dots 20$ від 0,001 мкс до 0,012 мкс (рис. 2), що приблизно у два рази менше часу аналізу реалізуєності.

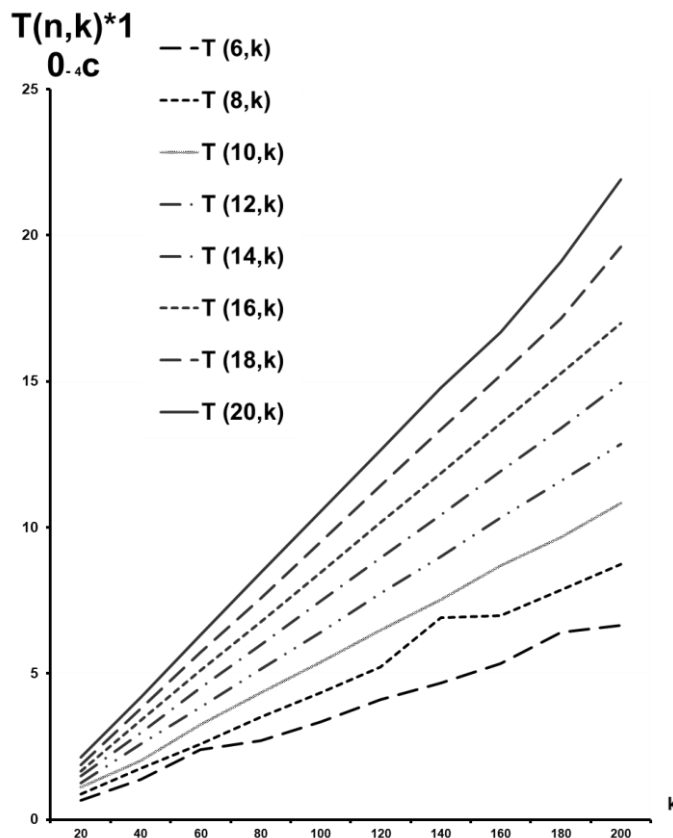


Рис. 2. Залежність часу перевірки умови $F(G)=1$ від кількості перевірок та несправностей системи

n – кількість перевірок ($n=5 \div 20$);
 k – кількість несправностей ($k=20 \div 200$).

Отже, у процесі генерації варіантів тестів спочатку необхідно перевіряти виконання умови мінімізації вартості, а у випадку її виконання – перевіряти умову реалізуємість. Ефективність такого відбору варіантів тестів росте зі збільшенням кількості n і k .

Висновки. Експериментально досліджена ефективність доопрацьованого методу діагностування. Критерієм ефективності методу є час пошуку оптимального тесту. Обрана стратегія, при котрій спочатку перевіряється вартість тесту, а потім реалізуємість логічної функції $F(G)$, дозволяє скоротити час проектування тесту приблизно у 2 рази. Отримано функціональні залежності часу пошуку оптимального тесту від кількості перевірок та несправностей електрообладнання.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених “Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів”, яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

ЛІТЕРАТУРА

1. Domin, R., Domin, I., Cherniak, G., Mostovych, A., Konstantidi, V., & Gryndei, P. Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the ukrainian railways // Archives of Transport, 2016 №40(4), P.15-27. doi:10.5604/08669546.1225459
2. Yiwei, Z., Shaopu, Y., Yongqiang, L., Yingying, L., & Pengfei, L. A new semi-active control strategy and its application in railway vehicles // Advances in Applied Nonlinear Dynamics, Vibration and Control, 2021. doi:10.1007/978-981-16-5912-6_18 Retrieved from www.scopus.com
3. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R.I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, № 4 P. 30-36. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/7)
4. Wang, H., Li, H., Li, Y., & Duan, Y. Railway wagon wheelset fault diagnosis method based on DBN // Global Reliability and Prognostics and Health Management, PHM-Shanghai 2020, doi:10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280980
5. Aimar, M., & Somà, A. Study and results of an onboard brake monitoring system for freight wagons // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, №232(5), P.1277-1294. doi:10.1177/0954409717720348
6. Lipsett, M. G., Ying, C., & Hendry, M. T. Condition monitoring of rail car air brake systems using ultrasound. Paper presented at the Advances in Technology to Support End User Mission // Proceedings of the 2016 Joint Conference/Symposium of the Society for Machinery Failure Prevention Technology and the International Society of Automation, 2016 Retrieved from www.scopus.com
7. Kojima, T., & Sugahara, Y. (2013). Fault detection of vertical dampers of railway vehicle based on phase difference of vibrations // Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute), 2013, №54(3), P. 139-144. doi:10.2219/trtrqr.54.139
8. De Martin, A., Dellacasa, A., Jacazio, G., & Sorli, M. Integrated health monitoring for the actuation system of high-speed tilting trains // International Journal of Prognostics and Health Management, 2017, №8 (Special Issue 7) Retrieved from www.scopus.com
9. Lazarescu, M. T., & Poolad, P. Asynchronous resilient wireless sensor network for train integrity monitoring // IEEE Internet of Things Journal, 2021, № 8(5), P. 3939-3954. doi:10.1109/JIOT.2020.3026243
10. Catelani, M., Ciani, L., Guidi, G., & Galar, D. (2020). A practical solution for HVAC life estimation using failure models // 17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference "Global Trends in Testing, Diagnostics and Inspection for 2030", 2020, P. 85-91. Retrieved from www.scopus.com
11. Zvolenský, P., Leštinský, L., Dungal, J., & Grencík, J. (2021). Evaluation of acoustic parameters of air conditioning of railway passenger cars // Transportation Research Procedia, 2021, №55, P. 673-677. doi:10.1016/j.trpro.2021.07.034 Retrieved from www.scopus.com
12. Skurikhin D.I. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development /Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. // In: Sierpiński G. (eds) Smart and Green Solutions for Transport Systems. TSTP 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1091, pp 114-125 Springer, Cham. (DOI:10.1007/978-3-030-35543-2_10)
13. Kovalev, S. M., Tarassov, V. B., Dolgiy, A. I., Dolgiy, I. D., Koroleva, M. N., & Khatlamadzhyan, A. E. Towards intelligent measurement in railcar on-line monitoring: From measurement ontologies to hybrid information granulation system, 2018 doi:10.1007/978-3-319-68321-8_18 Retrieved from www.scopus.com

14. Daniyan, I. A., Mpfu, K., & Adeodu, A. O. Development of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railcar industry // *Procedia CIRP*, 2020, №90, P. 109-114. doi:10.1016/j.procir.2020.02.001 Retrieved from www.scopus.com
15. Bannikov, D. A., & Sirina, N. F. Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of digital enterprise // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, №918(1) doi:10.1088/1757-899X/918/1/012168 Retrieved from www.scopus.com
16. Макаренко В. Н., Бондар С. І., Гамбарян Г. Р., Бандура І. М. Поездная автоматизированная информационно-диагностическая система "Вид" // *Залізничний транспорт України №6*, 2004. С.51-54.
17. Бондаренко В.В. Удосконалення технології технічного обслуговування та діагностування електрообладнання пасажирських вагонів : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів / В'ячеслав Володимирович Бондаренко ; Укр. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2002. 16 с.

REFERENCES

1. Domin, R., Domin, I., Cherniak, G., Mostovych, A., Konstantidi, V., & Gryndei, P. (2016). Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the ukrainian railways. *Archives of Transport*, 40(4), 15-27. doi:10.5604/08669546.1225459
2. Yiwei, Z., Shaopu, Y., Yongqiang, L., Yingying, L., & Pengfei, L. (2022). A new semi-active control strategy and its application in railway vehicles doi:10.1007/978-981-16-5912-6_18 Retrieved from www.scopus.com
3. Bondarenko V. V., Skurikhin D. I., Vizniak R.I., Ravlyuk V. H., Skurikhin V. I. (2019) Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 30-36. (DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/7)
4. Wang, H., Li, H., Li, Y., & Duan, Y. (2020). Railway wagon wheelset fault diagnosis method based on DBN. Paper presented at the 2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management, PHM-Shanghai 2020, doi:10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280980
5. Aymar, M., & Somà, A. (2018). Study and results of an onboard brake monitoring system for freight wagons. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232(5), 1277-1294. doi:10.1177/0954409717720348
6. Lipsett, M. G., Ying, C., & Hendry, M. T. (2016). Condition monitoring of rail car air brake systems using ultrasound. Paper presented at the Advances in Technology to Support End User Mission - Proceedings of the 2016 Joint Conference/Symposium of the Society for Machinery Failure Prevention Technology and the International Society of Automation, Retrieved from www.scopus.com
7. Kojima, T., & Sugahara, Y. (2013). Fault detection of vertical dampers of railway vehicle based on phase difference of vibrations. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute)*, 54(3), 139-144. doi:10.2219/rtriqr.54.139
8. De Martin, A., Dellacasa, A., Jacazio, G., & Sorli, M. (2017). Integrated health monitoring for the actuation system of high-speed tilting trains. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8(Special Issue 7) Retrieved from www.scopus.com
9. Lazarescu, M. T., & Poolad, P. (2021). Asynchronous resilient wireless sensor network for train integrity monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3939-3954. doi:10.1109/JIOT.2020.3026243
10. Catelani, M., Ciani, L., Guidi, G., & Galar, D. (2020). A practical solution for HVAC life estimation using failure models. Paper presented at the 17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference "Global Trends in Testing, Diagnostics and Inspection for 2030", 85-91. Retrieved from www.scopus.com
11. Zvolenský, P., Leštinský, L., Dungal, J., & Grecík, J. (2021). Evaluation of acoustic parameters of air conditioning of railway passenger cars. Paper presented at the Transportation Research Procedia, , 55 673-677. doi:10.1016/j.tpro.2021.07.034 Retrieved from www.scopus.com
12. Bondarenko V., Skurikhin D., Wojciechowski J. (2019) The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development // In: Sierpiński G. (eds) *Smart and Green Solutions for Transport Systems. TSTP 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1091, pp 114-125 Springer, Cham. (DOI:10.1007/978-3-030-35543-2_10)
13. Kovalev, S. M., Tarassov, V. B., Dolgiy, A. I., Dolgiy, I. D., Koroleva, M. N., & Khatlamadzhiyan, A. E. (2018). Towards intelligent measurement in railcar on-line monitoring: From measurement ontologies to hybrid information granulation system doi:10.1007/978-3-319-68321-8_18 Retrieved from www.scopus.com
14. Daniyan, I. A., Mpfu, K., & Adeodu, A. O. (2020). Development of a diagnostic and prognostic tool for predictive maintenance in the railcar industry. Paper presented at the *Procedia CIRP*, , 90 109-114. doi:10.1016/j.procir.2020.02.001 Retrieved from www.scopus.com
15. Bannikov, D. A., & Sirina, N. F. (2020). Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of digital enterprise. Paper presented at the *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, , 918(1) doi:10.1088/1757-899X/918/1/012168 Retrieved from www.scopus.com
16. Makarenko V. N., Bondar S. I., Hambaryan H. R., Bandura I. M. (2004) *Poezdnyaya avtomatyzirovannaya ynformatsyonno-dyahnostycheskaya sistema "Vyd" [Train informational and diagnostic system VYD]. Zaliznychnyy transport Ukrainy [Railway transport of Ukraine]* 6, 51-54.

17. Bondarenko V.V. (2002) Udoskonalennya tekhnolohiyi tekhnichnoho obsluhovuvannya ta diahnostuvannya elektroobladnannya pasazhyrs'kykh vahoniv [Improvement of maintenance and diagnostics technology for passenger car electrical equipment] PhD thesis. Kharkiv: UkrSURT [in Ukrainian]

Alyona Lovska¹, Oleksiy Fomin^{2}, Dmytro Skurikhin³, Viacheslav Bondarenko⁴*

^{1,3,4} Department of Railway car Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Sq. Feuerbach, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050

² Department of Railway cars and car facilities, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, Ukraine, 04071

COMBINATORY APPROACH TO FAILURE FINDING IN PASSENGER CAR ELECTRICAL EQUIPMENT SYSTEM

Maintaining a high level of maintenance of electrical equipment in passenger cars requires research in the field of improving methods and means of technical diagnostics. Electronic devices for automatic control and protection, which are located in the switchboard of the car, are one of the most critical elements in the electrical equipment system, ensuring its reliable, efficient and safe operation. If the automatic adjustment and protection devices are out of regulation during operation, the voltage and current in the electrical equipment network may exceed the permissible level, which leads to the failure of electricity consumers, a battery and a generator. In addition, the semiconductor devices themselves are very sensitive to short-term overloads, in which, even with minor overloads, a breakdown or breakage of the conductive layer occurs. Modern trends in the development of passenger car fleet indicate a sharp increase in the complexity of the element base of cars. This mainly concerns the electrical systems of cars, where all the functions of control, monitoring and diagnostics are performed by electronics. Maintaining a high level of service for such systems requires research in the field of improving methods and means of technical diagnostics. For these purposes, the authors have developed a method for constructing optimal control and diagnostic tests, which is based on a combinatorial approach. The method is easily implemented on a computer.

Keywords: cars, electrical equipment, failure, technical condition control, optimization, tests, combinatorial approach.

Valerii Kosarchuk¹, Oleksandr Agarkov^{2*}, Volodymyr Tverdomed³

¹ Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2703-3542>

² Assistant professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-6280>

³ Assistant professor, Railway Track and Track Facilities Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

*Corresponding author: agarkov_ov@gsuite.duit.edu.ua

LIFE ASSESSMENT OF RAILS BY CRITERION OF OCCURRENCE OF FATIGUE CRACKS

The paper presents modern concepts of the contact fatigue crack occurrence in the railhead. Numerical simulation of the contact interaction between rails and rolling stock wheels by finite elements method are presented. During the simulation, the problem was solved in elastic and elastic-plastic formulations. We considered R65 rail profile and standard railway wheels. The conditions for the rail-wheel interaction corresponded to train movement on the straight section of the track without slipping. The modern life assessment methodology involves the calculation of the material damage increment at each point of the element as the load varies over time, and subsequent summation of this damage. Upon reaching the ultimate value of the total damage, the structural element is believed to lose its load-carrying capacity, i.e. a crack is formed in it. Despite the substantial simplification of the real problem, the computational costs for the implementation of such methods for predicting the durability will be unnecessarily high. In this regard, we propose the simplified method of the durability calculation.

Keywords: railway transport, deformation and fracture, strength of railway structures, failure analysis, contact stresses, contact-fatigue damage, numerical simulation, finite elements method.

1. Introduction

The current stage of development of railway transport is characterized by a tightening of operating parameters (increase in the power, speeds, and load-carrying capacity of locomotives), which will inevitably lead to an increase in force and thermal effects on structural elements of the rolling stock and rail tracks. Extreme weather conditions lead to a greater number of failures of the main element of the track – the rail, the reliability of which affects not only traffic safety, but also the economic performance of railways. Contact-fatigue damage and wear of the railhead are among the main causes of rail failures [1 – 3]. Such damage leads to the formation of surface and internal cracks in the railhead, the formation mechanisms and kinetics of which differ from each other. The development of surface cracks, followed by peeling of particulate material, is one of the main mechanisms of the railhead wear upon contact with the wheels of rolling stock. As regards internal cracks, the mechanism of their formation and propagation depends entirely on the nature of changes in the stress-strain state of the railhead during operation, as well as the purity of the rail material, and the availability of technical defects. Such cracks (longitudinal, oblique, lateral ones) can emerge at a depth of 4-16 mm from the running surface. Most often this occurs in the areas of stress concentration caused by the presence of various types of inclusions or technical defects. It is now established that the main cause of the internal cracks is the accumulation of plastic strains under the action of cyclic stresses. Such

cracks are of particular concern, as their further propagation and penetration into the railhead can lead to a complete destruction of the rail.

Considering that the presence of internal cracks at the early stages of their propagation can hardly be diagnosed with the applied diagnostics equipment [4], the development of the methods to predict the durability of rails by the criterion of the occurrence of internal cracks is of great scientific and practical interest. Over the last 20 years, this problem has been an active area of research [5 – 12].

In this paper, the basic elements of the method for predicting the durability of rails by the criterion of the occurrence of internal contact fatigue cracks based on the use of the kinetic theory of damage and the structural model of the elastic-plastic deformation of materials are considered. The proposed life assessment methodology involves the calculation of the material damage increment at each point of the element as the load varies over time, and subsequent summation of this damage. Upon reaching the ultimate value of the total damage, the structural element is believed to lose its load-carrying capacity, i.e. a crack is formed in it. Its further behaviour under load should be considered in the framework of the mechanics of cracks. To evaluate the durability of rails, this approach was first used in [5, 6]. Despite a number of obvious simplifications (in particular, the authors considered only cyclic loading of the contact area using distributed pressure calculated by the elastic theory of Hertz), the authors were able to calculate the kinetics of the stress-strain state of the rail for only eight load cycles. A forecast of durability was carried out by extrapolating the damage accumulation rate obtained in the last two load cycles. Given that in reality the number of load cycles until the occurrence of a crack can be from a few tens to hundreds of thousands, the accuracy of the forecast is, of course, low.

In view of the above, it becomes obvious that despite the substantial simplification of the real problem, the computational costs for the implementation of such methods for predicting the durability will be unnecessarily high. In this regard, we propose the following simplified method of the durability calculation.

2. Research Technique

The initial data for constructing the geometric model were rail R65 and a locomotive wheel with the tread diameter of 957 mm. A straight section of the track (6 m in length), along which a two-axle bogie CNII-H3-0 with the centre distance of 1850 mm moves at a slow speed (dynamic effects are not taken into account), was considered. The rails are laid with a canting of 1:20 on concrete sleepers, the laying pattern is 1680 pcs/km (a distance between sleepers is 60 cm), and the mount type is KPP-5. The axial load is 200 kN. The presented characteristics of the rail base stiffness in the longitudinal ($9,7 \cdot 10^7$ N/m) and vertical ($3,75 \cdot 10^7$ N/m) directions were taken from [13].

With regard to the characteristics of the mechanical properties of the material, the existing standards have no data on the elastic-plastic properties of the rail and wheel steels even in simple tension, especially during cyclic deformation. Therefore, all the calculations were made using the mechanical properties of carbon steel of pearlite class BS 11 [14], which is close in composition to the steel used in rails P65.

3. Numerical Results

Based on calculation of the stress kinetics within one loading block, which corresponds to the passage of one bogie through the reference section, the position of the dangerous point is located within the reference section of the rail. The dangerous point is the point on the rail cross-section, where the damage accumulated over one loading block is maximal. To calculate the damage, the combined criteria can be used [6], which have worked well in the assessment of durability of structural elements operating in contact. The position of the dangerous point in the rail cross-section indicates the place of nucleation of the future crack. The history of variation of all components of the active strain tensor during the first loading block is recorded for the dangerous point. Assuming that the plastic strain increment is low, which is true for those areas of the railhead where internal cracks are nucleated, the block cyclic loading is later modelled only for the dangerous point, using the appropriate model of elastic-plastic deformation and the established law of changes in the components of the active strain tensor. It is also believed that the rolling stock is composed of identical elements.

In this case, it is expected that the position of the dangerous point will not change. The structural model of cyclically unstable materials developed by the authors, which allows taking into account the effect of deformation trajectory patterns on the regularities in cyclic hardening, was used as a model of deformation. A detailed description of the model, relevant mathematical formulations and the method for determining parameters from the results of basic experiments are given in [15, 16]. Based on these calculations, we can determine the kinetics of damage accumulation in the dangerous point until the start point of destruction. This approach will enable an acceptable solution in terms of accuracy without using any expensive software and high-performance computing systems.

Let us consider an example of using this technique on a straight section of the track. Railway track is a complex spatial structure, which includes not only rails, but also sleepers, pads, rail fasteners and the ballast. All these components of the permanent way have a different shape, very different sizes, in addition, they are made of different materials, have different mechanical and thermal properties, and have an impact on the stress-strain state of the rails. In principle, it is possible to create a geometric model of the track, which would include all of these elements. However, it should be borne in mind that the accuracy of the solution of the boundary value problem in a finite element method is highly dependent on the size of the finite element (the accuracy increases with a decrease in the size). At the same time, with a decrease in the size the number of elements increases sharply, resulting in a significant augmentation of computation costs or inability to solve the problem with the software used. In this connection, it seems appropriate to divide the problem of track deformation under the influence of loads from the rolling stock wheels into several stages, and use different geometric patterns for each stage. In particular, when calculating stresses and strains away from the contact zone between the rail and the wheel, other elements of the permanent track structure (pads, fasteners, sleepers, etc.) can be considered as a base with the averaged mechanical properties. Observations have shown [1] that the rail sections away from the contact zone (within three sleepers on the left and right of each bogie wheel) are subjected to buckling and torsion (induced by a vertical load eccentricity). Thus, to consider the impact of both bogie wheels on the rail deflections and ignore the influence of fixing scheme on the stress-strain state of the rail, the length of a geometric model of the rail must be at least 6 m. In addition, the finite element mesh can be quite tenuous. Elastic bending strain in the rail section was calculated by the finite element method using the said geometric model. In addition, it was loaded with the moving pair of concentrated forces that correspond to axial load. To calculate the stress-strain state of the rails in the contact zone between the rail and the wheel, the finite element method was used. The geometrical model was a 600 mm long rail with a pivot bearing on the ends, which allowed considering the effect of the rail deflection on the value of the contact patch. In the central part of the rail, an area was found that was three times the size of the expected area of contact. In this region, the finite element mesh was concentrated. The problem was solved in a three-dimensional elastic-plastic formulation in two phases.

In the first phase of the calculation, the optimal size of finite elements was determined. To this end, the problem was first solved in the elastic formulation, comparing the results of the numerical solution with those of the analytical solution obtained in the case of contact between two elastic cylinders with mutually perpendicular axes (Hertz solution). Only static vertical load on a wheel (100 kN) was considered, which was applied as a uniformly distributed normal pressure on the inner surface of the wheel hub.

It was found that with the average size of finite elements in the area of condensations (i.e. the average length of the tetrahedron edges) of the order of 0.5 mm, the difference between the resulting solution and the analytical solution does not exceed 4%. In addition, the maximum contact pressure was 988 MPa; the size of the contact patch (the size of semi-axes of the ellipse) was 13.6 and 13.58 mm. The shape of the contact area was close to the circle, due to the proximity of the radii of the railhead and the wheel (rolling circle). The center of the contact patch is located on the axis of symmetry of the rail cross-section, which is explained by the coincidence of the values of the wheel taper and the rail canting.

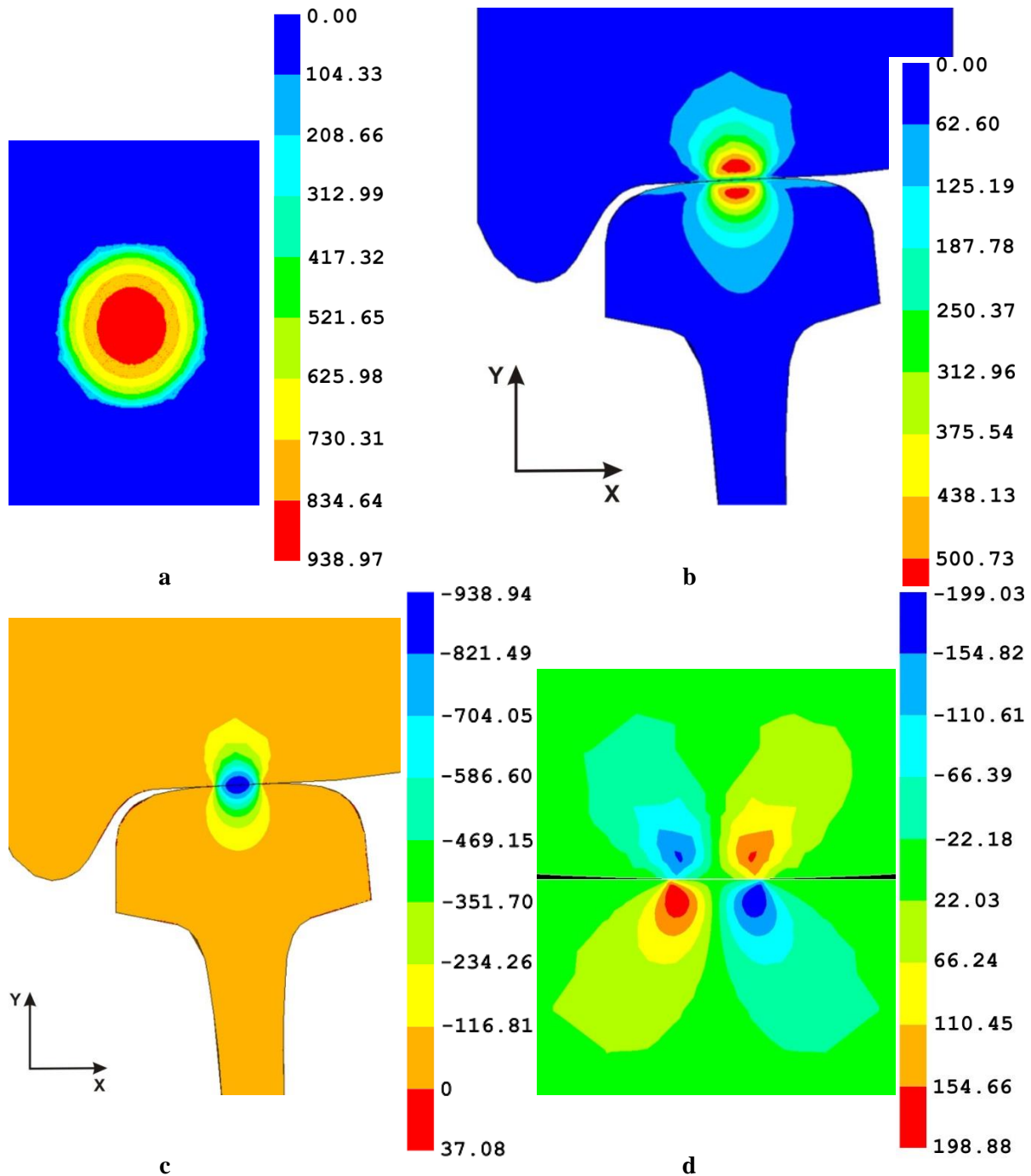


Fig.1. Some results of elastic-plastic calculation – distribution of contact pressures (a), equivalent stresses (b), normal stresses σ_y (c) and shear stresses τ_{yz} (d)

A further decrease in the size of finite elements provides for a slight improvement of the solution, but due to a significant growth in their amount, the time of the problem solution increases appreciably. In case of increasing the size of finite elements in the contact patch, the quality of the solution deteriorates greatly, and power surges can be observed, which are caused by poor surface smoothing and the appearance of false contact points.

Taking plastic strains into account leads to a certain increase in the size of the contact pad and a marked reduction of contact pressure (Fig. 1a) as compared with the elastic solution. The zone, in

which plastic deformation takes place, is located inside the railhead within a short distance from the surface. The point, at which the stress intensity has the maximum value (dangerous point), is located at a depth of 3.32 mm. The nature of the distribution of equivalent stresses is shown in Fig. 1b. All normal stresses are negative in the contact zone; the greatest of them by the absolute value is σ_y (Fig. 1c). Shear stresses in the dangerous point are not large (Fig. 1d), so the direction of the principal axes of the stress tensor in the dangerous point is close to the direction of the coordinate axes. The value of the maximum shear stress τ_{max} in the dangerous point is 269.9 MPa at the maximum shift of $\gamma_{max} = 0.412\%$.

A contribution to the total damage of the material is made both by the elastic cyclic strains resulting from the rail bending, and cyclic plastic strains in the contact zone. The latter can be accumulated due to a complex (non-proportional) loading.

4. Discussion and Generalization

Since the computational costs for the implementation of the considered methodology for assessing the durability were sufficiently large, in a first approximation we considered only damage caused by low-cycle fatigue and the rule of linear summation of damage. In addition, damage accumulated in the i -th cycle of loading [5, 6] is determined as $\Delta\omega_i = \frac{1}{(N_f)_i}$, where durability N_f at a current level of stresses and strains is found from the solution of the non-linear equation

$$(FP)_{max} = \frac{(\bar{\sigma}_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \bar{\sigma}_f \bar{\varepsilon}_f (2N_f)^{b+c}, \quad (1)$$

where $FP = \langle \sigma_{max} \rangle \frac{\Delta\varepsilon}{2} + J\Delta\tau\Delta\gamma$ is the damage parameter. Here, brackets $\langle \dots \rangle$ denote the operator $\langle x \rangle = \frac{|x|+x}{2}$; σ_{max} is the maximum stress, normal to the plane of crack propagation; $\Delta\varepsilon$ is the scope of the normal strain in the direction of σ_{max} ; $\Delta\tau$ and $\Delta\gamma$ are the scopes of shear stresses and shear strains in the plane of crack propagation; J is the material parameter, which depends on the stress state type; E is the elasticity modulus of the material. The other parameters are determined by means of approximation of the curve of the fatigue life of the material obtained under uniaxial cyclic loading (tension-compression or torsion) with the control of the strain amplitude. The plane of crack propagation (critical plane) is defined as the material plane with the highest value of the damage parameter FP . The material plane, in which maximum shear stresses are active, will be a critical plane in this case, as all principal stresses in the dangerous point are compressive. For this plane, the fatigue parameter FP , estimated by formula (1), has a maximum value of 0.2161. The orientation of this plane in the dangerous point defines the initial position of the crack. Figure 2 schematically shows the position of the critical plane relative to the coordinate axes and the direction of the wheel motion.

As a first approximation, we assume that the position of the dangerous point is not changed during loading. The fact that plastic strains are small enough confirms this hypothesis, and the problem is solved in a geometrically linear formulation. Then for the dangerous point we obtain $\alpha = 24.18^\circ$, $\beta = 88.14^\circ$, which is close to the results obtained in [5, 6].

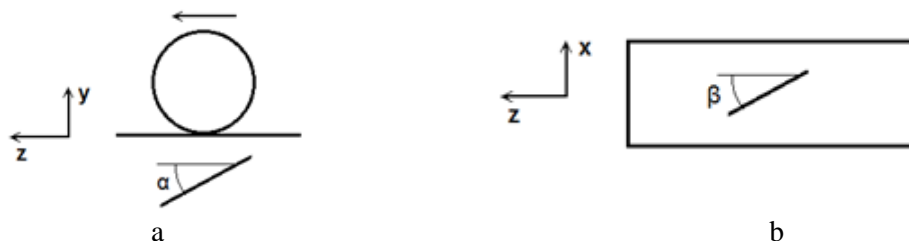


Fig. 2. Position of the crack nucleation plane with respect to the coordinate axes and the direction of the wheel motion: a – side view, b – top view

The durability of the rail (the number of cycles to failure) at a given value of $(FP)_{max}$ will be $12.2 \cdot 10^6$ cycles, which corresponds to the passage of approximately 245 million tons of gross cargo at a given axial load. This value is minimal for the durability under the operating conditions taken in this calculation, since for the cyclically hardening materials the durability will be maximal in the first cycles of loading. As the material hardening, the value of the increment of plastic strain per cycle decreases, and, therefore, the intensity of the damage accumulation declines. If we compare this estimate with a durability warranty (180 million tons of gross cargo for the rail type P65 produced by OJSC MK Azovstal), it should be noted that this estimate corresponds to the moment of the crack nucleation, but not its propagation up to the size limits. The authors are intended to consider other factors that affect the durability of rails in subsequent publications. Of course, this method of estimating the ultimate state of the rail is approximate, because it does not take into account many factors that are difficult to assess (for example anisotropy of the mechanical properties of the rail material, associated with the technology of rolling, heat treatment and straightening of the rails, the effect of vibration, the imperfections of the rail track, the parameters of the environment, and others.).

5. Conclusions

The main advantage of the developed method compared to traditional approaches (full-scale and model experiments) is the possibility to conduct numerical experiments dedicated to the effect of individual process and design factors or their combination on the theoretical life of the structural element. The results of such numerical experiments can be used to optimize the design and technological parameters of critical structural elements of railway track and rolling stock.

REFERENCES

1. Cannon, D.F. & Edel, K.-O., Grassie, S.L., Sawley, K. (2003). Rail defects: an overview. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26, 865-887.
2. Rejhart, V.A. (2001). Analiz defektov rel'sov [Analysis of rail defects]. *Put' i putevoe hozhajstvo – Track and track facilities*, 4, 22-25 [in Russian].
3. Shejman, E.L. (2007). Defekty rel'sov. Obzor zarubezhnyh izdaniy [Rail defects. Review of foreign publications]. *Put' i putevoe hozhajstvo – Track and track facilities*, 3, 29–32 [in Russian].
4. Kolotushkin, S.A. & Rejhart, V.A. (2002). Defektoskopija rel'sov yeksperimental'nogo kol'ca na sluzhbe transportnoj nauki [Flaw detection of rails of the experimental ring in the service of transport science]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bulletin*, 6, 33-36 [in Russian].
5. Ringsberg, J.W. & Bjarnehed, H., Johansson, B.L. (2000). Rolling contact fatigue of railway rails – finite element modelling of residual stresses, strains and crack initiation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 214, 7-19. <http://dx.doi.org/10.1243/0954409001531207>
6. Ringsberg, J.W. (2001). Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue*, 23(7), 575-586. [http://dx.doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00024-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00024-X)
7. Sladkowski, A. & Sitarz, M. (2005). Analysis of wheel-rail interaction using FE software. *Wear*, 258, 1217–1223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.032>
8. Kapoor, A. & Franklin, F.J. (2000). Tribological layers and the wear of ductile materials. *Wear*, 245, 204-215. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00480-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00480-4)
9. Shevtsov I. & Markine V., Esveld C. (2003). Optimal design of wheel profile for railway vehicles, *Wear*, 258, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.051>.
10. Shevtsov I. & Markine V., Esveld C. (2008). Design of railway wheel profile taking into account rolling contact fatigue and wear. *Wear*, 265, 1273–1282. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.018>.
11. Kosarchuk V. V. & Danilenko É. I., Agarkov A. V. (2020) Effect of railcar wheel tire profiles on the contact stress level in subway rails. *Strength of Materials*, 52(3), 398 – 406. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00190-x>.
12. Ma Y. W. & Markine V., Mashal A. A., Ren M. (2017). Modelling verification and influence of operational patterns on tribological behaviour of wheel-rail interaction. *Tribol. Int.*, 114, 264–281.
13. Danilenko, E.I. & Rybkin, V.V. (2006). *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoyi koliyi na micnist' i stijkist' [Rules for calculating railway track strength and stability]*. Kyiv: Transport [in Ukrainian].
14. Ringsberg, J.W. (2000). Cyclic ratcheting and failure of a pearlitic rail steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 23, 747–758. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00336.x>

15. Kosarchuk, V.V. & Agarkov, O.V. (2010). Modeljuvannja ciklichnoї nestabil'nosti materialiv pri pruzhnoplastichnomu deformuvanni [Modelling of cyclical instability of materials under elastic-plastic deformation]. *Zb. nauk. prac' DETUT. Transportni sistemi i tehnologii – Collection of Scientific Works of the State Economics and Technology University of Transport. Transport Systems and Technologies*, 16, 24 – 33 [in Ukrainian].

16. Kosarchuk, V.V. & Agarkov, O.V. (2010). Identifikacija parametriv modeli pruzhnoplastichnogo deformuvannja za rezul'tatami bazovih eksperimentiv [Identification of parameters of elastic-plastic deformations model based on the results of basic experiments]. *Zb. nauk. prac' DETUT. Transportni sistemi i tehnologii – Collection of Scientific Works of the State Economics and Technology University of Transport. Transport Systems and Technologies*, 17, 159 – 165 [in Ukrainian].

Валерій Косарчук¹, Олександр Агарков^{2*}, Володимир Твердомед³

¹ Професор, Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

² Доцент, Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

³ Доцент, Кафедра залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

ОЦІНКА ДОВГОВІЧНОСТІ РЕЙОК ЗА КРИТЕРІЄМ ВИНИКНЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН

У статті представлено сучасні концепції виникнення тріщини у головці рейки внаслідок контактної втоми матеріалу. Наведено результати чисельного моделювання контактної взаємодії рейок та коліс рухомого складу методом скінченних елементів. Задачу контактної взаємодії рейки типу R65 із стандартним залізничним колесом розглядали у пружно-пластичній постановці. Умови взаємодії відповідали руху поїзда на прямій ділянці колії без ковзання. Сучасна методологія оцінки довговічності конструкцій передбачає розрахунок приросту пошкодження у кожній точці елемента конструкції, оскільки навантаження змінюється з плином часу, і подальше підсумовування цих пошкоджень. Після досягнення граничного значення загального пошкодження вважається, що елемент конструкції втрачає свою несучу здатність, тобто в ньому утворюється тріщина. Незважаючи на істотне спрощення реальної проблеми контактної взаємодії рейок з колесами, обчислювальні витрати на впровадження таких методів прогнозування довговічності будуть надмірно високими. У зв'язку з цим запропоновано спрощений метод розрахунку довговічності рейок.

Ключові слова: залізничний транспорт, деформація і руйнування, міцність залізничної колії, аналіз руйнувань, контактні напруження, контактньо-втомні пошкодження, чисельне моделювання, метод скінченних елементів.

Ірина Воронко¹

¹Старший викладач, кафедра автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3599-6672>

¹Автор, відповідальний за листування: voronko_io@gsuite.duit.edu.ua

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-ІГРОВА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті розглядається питання надійності та захисту інформації комп'ютерних системах транспортної інфраструктури та описується синтез та аналіз диференціально-ігрових моделей та методів моделювання процесів кібернападу на сервер комп'ютерних інформаційно-діагностичних систем дистанції електропостачання залізниці. Розроблено уніфіковану диференціально-ігрову модель процесу кібернападу на мультизадачний сервер інформаційно-діагностичної комп'ютерної системи нижнього рівня залізниці, яка дозволяє отримати оптимальні стратегії захисту інформації в умовах кібератак. Представлено результати моделювання процесу кібератаки, для оцінки інтегральних показників захищеності серверу, при використанні оптимальних стратегій по кожній із функцій. Показано вигляд уніфікованої моделі комп'ютерно-інформаційної системи, та приведені графіки перехідних процесів ймовірності перебування серверу в захищеному стані та ймовірності відмови серверу по будь якій із функціональностей.

Ключові слова: захист інформації, кібернапад, кібератака, стратегія кіберзахисту, стратегія кібернападу, диференціально-ігрові моделі, графова модель.

Вступ. Стрімкий розвиток і ускладнення технічних комп'ютерних пристроїв та систем в транспортній інфраструктурі призвели до необхідності забезпечення високого рівня інформаційного захисту та надійності. До таких основних заходів можна віднести побудову систем по модульному принципу та з використанням функцій самодіагностики, що актуальним на сьогодні. Саме впровадження сучасних мікропроцесорних пристроїв в транспортній інфраструктурі будь якої галузі, в якості керуючих, дозволило на алгоритмічному рівні реалізовувати функції самодіагностики, із використанням ресурсів власного керуючого мікропроцесорного пристрою, або додаткових діагностичних вузлів на його основі.

Впровадження систем контролю та діагностики, до прикладу на електроенергетичних об'єктах залізниці, дає можливість подовжити терміни експлуатації основного обладнання, забезпечується можливість своєчасного виконання ремонтних робіт, що є обов'язковим, при врахуванні фізичної зношеності більшої частини основного енергетичного обладнання тягових підстанцій, і тим самим, забезпечуються умови безперебійної роботи залізничного транспорту. Тому в основі організації корпоративних комп'ютерних систем управління електричними мережами залізниць і, відповідно, локальних керуючих мереж систем електропостачання на рівні тягових підстанцій, лежить безперервний контроль режимних параметрів.

Аналізуючи структуру корпоративної системи моніторингу та діагностики перехідних режимів електроенергетичних систем транспортної інфраструктури [1], а саме залізничного транспорту, можна зробити висновок, що одним із ключових об'єктів по надійності є головний сервер інформаційної мережі дистанції електропостачання залізниці. Його функції полягають у формуванні єдиного інформаційного простору первинної інформації, яка отримується із Phasor

Measurement Units (PMUs) [2] тягових підстанцій дистанції електропостачання залізниці, реалізації процедур обміну інформацією з центральною корпоративною мережею, веденні баз даних первинної аварійної та комерційної інформації. Разом з тим, така мультизадачність головного серверу обумовлює складність застосовуваних системи захисту інформації (СЗІ) [3] та необхідність використання уточнених моделей захисту інформації для оцінки рівня захищеності даного елемента мережі. Так як на сьогоднішній день переважна більшість вразливостей інформаційної безпеки корпоративних комп'ютерних систем моніторингу та діагностики властива компонентам та технологіям верхніх рівнів ієрархії транспортної інфраструктури. При цьому інтегральна надійність нижнього вимірювального рівня, представленого пристроями реєстрації в основному визначається здатністю PMUs забезпечувати повну функціональність згідно специфікації, та рівнем їх ремонтпридатності для оперативного виявлення та усунення несправностей в процесі експлуатації. У фокусі уваги перебувають дослідження пов'язані з забезпеченням надійності стійкості серверів та концентраторів даних відносно зосереджених кібератак на реєстратори PMUs та програмне забезпечення корпоративної комп'ютерної системи моніторингу та діагностики електроенергетичних систем залізниці [4]. Слід відмітити, що до систем діагностики, а особливо до діагностичних систем стратегічних об'єктів енергосистем транспортної інфраструктури ставляться підвищені вимоги до показників надійності. Крім того, із можливості застосування інформації, отриманої з допомогою цифрових реєстраторів, для оперативного керування режимами енергопостачання, слідує, що забезпечення гарантованого рівня показників надійності, при мінімізації затрат на технічне обслуговування є важливою науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для вирішення задач знаходження моделей процесів нападу на інформацію мультизадачного серверу комп'ютерно-інформаційної діагностичної системи об'єктів енергосистем транспортної інфраструктури, визначення оптимальних стратегій розподілу ресурсів СЗІ та визначення гарантованого рівня захищеності інформації, доцільним є застосування теорії диференціальних ігор (ДІ) та методи теорії диференціальних перетворень (ДП) [5, 6]. Ефективність моделювання процесів кібернападу методами теорії ДІ та ДП обумовлена рядом обставин які описані в [7].

Мета і завдання дослідження. Розробити диференціально-ігрову модель процесу кібернападу на мультизадачний сервер комп'ютерно-інформаційних діагностичних систем дистанції електропостачання залізниці, яка дозволяє отримати оптимальні стратегії захисту інформації в умовах кібератак і забезпечити безперебійну роботу залізничного транспорту.

Матеріали та методи дослідження. Нехай сервер у складі системи моніторингу перехідних режимів у поточний момент часу перебуває в одному з типових станів, та під впливом інформаційних атак або під впливом методів захисту інформації змінює стани, з відповідними ймовірностями, протягом деякого часу T , що дорівнює тривалості інтервалу здійснення інформаційних атак.

$$t \in [0, T] \quad (1)$$

Для складання диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена [8, 9], побудуємо графову модель [10] процесу нападу на інформацію, при цьому ймовірності станів системи визначимо таким чином:

$P_{F0}(t)$ – ймовірність відмови серверу – порушення, або не виконання будь-якої з передбачених функцій;

$P_{F1}(t)$ – ймовірність відмови комунікації з системою нижнього рівня;

$P_{F2}(t)$ – ймовірність відмови комунікації з системою верхнього рівня;

$P_{F3}(t)$ – ймовірність відмови функцій адміністрування бази даних аварійних параметрів;

$P_{F4}(t)$ – ймовірність відмови функцій адміністрування комерційної бази даних;

$P_{S0}(t)$ – ймовірність забезпечення сервером повної функціональності;

$P_{S1}(t)$ – ймовірність забезпечення комунікаційних функцій з системою нижнього рівня;

$P_{S2}(t)$ – ймовірність забезпечення комунікаційних функцій з системою верхнього рівня;

$P_{S3}(t)$ – ймовірність забезпечення функцій адміністрування бази даних аварійних параметрів;

$P_{S4}(t)$ – ймовірність забезпечення функцій адміністрування комерційної бази даних;

$P_{SF1}(t)$ – ймовірність атаки на комунікаційні функції з системою нижнього рівня, при дії методів захисту інформації (МЗІ);

$P_{SF2}(t)$ – ймовірність атаки на комунікаційні функції з системою верхнього рівня, при дії МЗІ;

$P_{SF3}(t)$ – ймовірність атаки на функції адміністрування бази даних аварійних параметрів, при дії МЗІ;

$P_{SF4}(t)$ – ймовірність атаки на функції адміністрування комерційної бази даних, при дії МЗІ.

На рис. 1 приведено графову модель процесу інформаційної атаки на сервер.

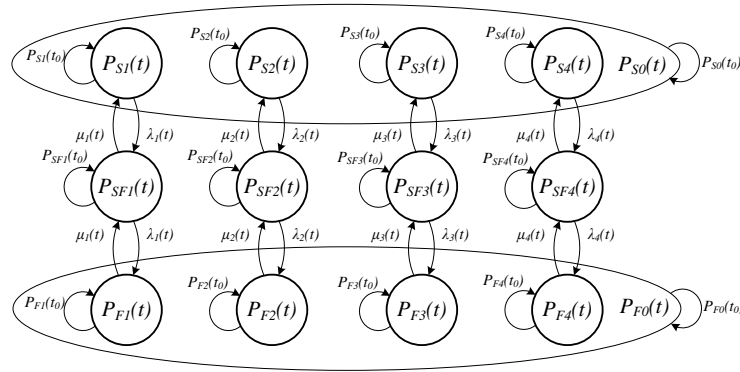


Рис. 1. Графова модель процесу інформаційної атаки

У вузлах графу вказано ймовірності станів, а над стрілками переходів, що переводять сервер зі стану в стан, відмічено інтенсивності потоків захисних дій $\mu_j(t)$ та інформаційних атак $\lambda_i(t)$, чим зазначено їх нестационарну природу, яка, в загальному випадку визначається функціональними часопараметричними залежностями.

Як видно з приведених визначень станів інформаційної системи, безвідмовна робота серверу S_0 передбачає забезпечення повної функціональності, тобто одночасного перебування системи в станах $S_1 \dots S_4$, що можна вважати незалежними подіями. Відмова серверу F_0 , по будь-якій із функціональностей, відповідно, є подією, що настає при виникненні хоча б однієї з незалежних відмов $F_1 \dots F_4$. Таким чином, для ймовірностей станів S_0 та F_0 можна записати:

$$\begin{cases} P_{S0}(t) = \prod_{i=1}^4 P_{Si}(t); \\ P_{F0}(t) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_{Fi}(t)). \end{cases} \quad (2)$$

На основі графової моделі запишемо систему диференціальних рівнянь, що описує динаміку незалежних атак на функціональність мультизадачного серверу:

$$\begin{cases} \frac{dP_{Si}(t)}{dt} = -\mu_i(t)P_{Si}(t) + \lambda_i(t)P_{SF_i}(t); \\ \frac{dP_{SF_i}(t)}{dt} = -(\lambda_i(t) + \mu_i(t))P_{SF_i}(t) + \lambda_i(t)P_{Si}(t) + \mu_i(t)P_{Fi}(t); \\ \frac{dP_{Fi}(t)}{dt} = -\mu_i(t)P_{Fi}(t) + \lambda_i(t)P_{SF_i}(t), \quad i = 1..4. \end{cases} \quad (3)$$

Для ймовірностей станів інформаційної системи слід враховувати умову нормування, що задається у вигляді виразу для повної групи подій:

$$P_{Si}(t) + P_{Fi}(t) + P_{SFi}(t) = 1, \quad i = 1..4. \quad (4)$$

Таким, чином для інтегрального розгляду процесів кібернападу на сервер слід доповнити (3) рівняннями (2) та (4), в результаті чого отримуємо математичну модель розглядуваного інформаційного конфлікту:

$$\begin{cases} P_{S0}(t) = \prod_{i=1}^4 P_{Si}(t); \\ P_{F0}(t) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_{Fi}(t)); \\ P_{Si}(t) = 1 - P_{Fi}(t) - P_{SFi}(t); \\ \frac{dP_{SFi}(t)}{dt} = -(\lambda_i(t) + \mu_i(t))P_{SFi}(t) + \lambda_i(t)P_{Si}(t) + \mu_i(t)P_{Fi}(t); \\ \frac{dP_{Fi}(t)}{dt} = -\mu_i(t)P_{Fi}(t) + \lambda_i(t)P_{SFi}(t), \quad i = 1..4. \end{cases} \quad (5)$$

Для відповідних ймовірностей станів справедливі такі початкові умови:

$$\begin{cases} P_{S0}(t_0) = 1, \quad P_{F0}(t_0) = 0; \\ P_{SF1}(t_0) = P_{SF2}(t_0) = P_{SF3}(t_0) = P_{SF4}(t_0) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь (5) дозволяє визначити розподіл ймовірностей перебування сервера в кожному стані протягом інформаційного конфлікту з урахуванням інтенсивностей потоків атак та захисних дій МЗІ.

В наслідок того, що в реальних умовах зміна стратегій сторін обумовлюється багатьма чинниками, яких в більшості випадків врахувати не має можливості, припустимо, нехай стратегії гравців розподілені за лінійними законами загального вигляду:

$$\begin{cases} \lambda_i(t) = \lambda_i \cdot t, \\ \mu_j(t) = \mu_j \cdot t, \end{cases} \quad (7)$$

де t – часовий аргумент згідно (1),

i, j – кількість переходів між станами у результаті успішних атак порушника та у наслідок дій МЗІ;

λ_i та μ_j – параметри апроксимації законів розподілу стратегій гравців.

На ресурси захисних дій μ_j та інформаційних атак λ_i накладаються обмеження вигляду:

$$\begin{cases} \lambda_{i \min}(t) \leq \lambda_i(t) \leq \lambda_{i \max}(t), \\ \mu_{j \max}(t) \leq \mu_j(t) \leq \mu_{j \max}(t), \end{cases} \quad (8)$$

де відповідно $\lambda_{i \min}(t)$, $\mu_{j \min}(t)$ – мінімальні та $\lambda_{i \max}(t)$, $\mu_{j \max}(t)$ – максимальні інтенсивності потоків інформаційних атак та захисних дій.

Інтенсивності дій гравців $\lambda_i(t)$, та $\mu_j(t)$, які визначають ресурси сторін гри, лежать у межах замкнених множин $\Lambda \in V_\lambda$ та $M \in V_\mu$, які в свою чергу обмежені в евклідовими просторами E_λ та E_μ відповідно [10-12].

Під час інформаційного конфлікту гравці намагаються досягти протилежних цілей. Гравець, або МЗІ, що захищається від атак, намагається забезпечити функціональну стійкість серверу шляхом гарантування його захищеності, а гравець, що атакує – досягнути відмови серверу від обслуговування по певній функціональності. Для цього гравець, що захищається від атаки, намагається забезпечити найменший програш за рахунок вибору такої власної стратегії $\mu_i(t)$, яка мінімізує плату за умови її максимізації іншим гравцем, що формалізується у вигляді:

$$\min_{\mu_j(t) \in V_\mu} \max_{\lambda_i(t) \in V_\lambda} I(t, P_{F0}(t), \lambda_i(t), \mu_j(t)). \quad (9)$$

Порушник максимізує плату I , при мінімізації власних втрат під час нанесення атак:

$$\max_{\lambda_i(t) \in E_\lambda} \min_{\mu_j(t) \in E_\mu} I(t, P_{F0}(t), \lambda_i(t), \mu_j(t)). \quad (10)$$

При рівності плат обох сторін (9) та (10) виконується співвідношення:

$$\min_{\mu_j(t) \in E_\mu} \max_{\lambda_i(t) \in E_\lambda} I = \max_{\lambda_i(t) \in E_\lambda} \min_{\mu_j(t) \in E_\mu} I = I^*(t, P_{F0}^{opt}(t), \lambda_i^{opt}(t), \mu_j^{opt}(t)). \quad (11)$$

Стратегії гравців $\lambda_i^{opt}(t)$ та $\mu_j^{opt}(t)$ є оптимальними для розглядуваної гри, а $P_{F0}^{opt}(t)$ є оптимальною траєкторією, яка розраховується з системи рівнянь (5) за критерієм (11). Відхилення будь-якого із гравців від своєї оптимальної стратегії, призводить до відповідних втрат в платі (11).

Отже, гарантований рівень захищеності серверу досягається за рахунок вибору гравцями оптимальних стратегій $\lambda_i^{opt}(t)$ та $\mu_j^{opt}(t)$:

$$I^*(t, P_{F0}^{opt}(t), \lambda_i^{opt}(t), \mu_j^{opt}(t)) = I^G \quad (12)$$

де I^G – ціна гри, що визначає гарантований рівень захищеності серверу.

В умовах динамічного інформаційного конфлікту, плату гри I , можна представити в інтегральному вигляді [6-13]:

$$I = \frac{1}{T} \int_{t_0}^T P_{F0}(t) dt, \quad (13)$$

при обмеженнях

$$0 \leq I \leq 1. \quad (14)$$

Інтегрування здійснюється вздовж траєкторії гри від початкового моменту часу $t = t_0$ до моменту закінчення інформаційного конфлікту $t = T$.

Представлення диференціально-ігрової моделі в області зображень. Моделювання процесу нападу на функціональність серверу з використанням (5) в аналітичному вигляді є складною математичною процедурою, яка потребує обробки великого обсягу інформації у реальному та прискореному часі.

Для моделювання процесу нападу на інформацію у реальному і прискореному часі без втрати точності вихідної моделі (5) пропонується застосування P -перетворень [14-16], що представляють собою диференціально-тейлорівські перетворення (ДТ-перетворення), вперше запропоновані академіком НАН України Пуховим Г.Є. [17, 18].

Застосування P -перетворень має переваги у скороченні обсягу обчислень чисельними методами, яка досягається за рахунок аналітичних можливостей даного операційного методу. Представлення вихідної моделі (5) в області зображень методом ДП дозволяє зберегти точність вихідної моделі при виключенні часового аргументу. В результаті чого, моделювання процесу нападу на інформацію зводиться до виконання арифметичних операцій в області зображень.

P -перетвореннями називаються функціональні перетворення виду [14, 15]:

$$X(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k x(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \Leftrightarrow x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k X(k) \quad (15)$$

де $x(t)$ – оригінал, що являє собою безперервну, що диференціюється нескінченну кількість разів і обмежену разом із всіма своїми похідними, функцію дійсного аргументу t ;

$X(k)$ – позначення диференційного зображення оригіналу, що представляє собою дискретну (гратчасту) функцію цілочисельного аргументу, де $k = 0, 1, 2, \dots$;

H – масштабний коефіцієнт, що має розмірність аргументу t і часто обирається рівним відрізка часу, на якому розглядається функція $x(t)$.

В перетвореннях (15) в лівій частині знаходиться вираз для прямого перетворення, що дозволяє за оригіналом $x(t)$ знайти зображення $X(k)$, а праворуч – зворотне перетворення, що дозволяє за зображенням $X(k)$ отримати оригінал $x(t)$ у формі степеневого ряду Тейлора з центром у точці $t=0$. Диференціальні зображення $X(k)$ називаються диференціальними T -спектрами, а значення T -функції $X(k)$ при конкретних значеннях аргументу k називаються дискретами.

Переведемо вихідну модель (5) методом P -перетворень виду (15) в область T -зображень, при цьому масштабний коефіцієнт H приймемо рівним тривалості інформаційних атак T . Тоді, система в області зображень прийме вигляд:

$$\begin{cases} P_{S0}(k) = \prod_{i=1}^4 P_{Si}(k); \\ P_{F0}(k) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_{Fi}(k)); \\ P_{Si}(k) = 1 - P_{Fi}(k) - P_{SFi}(k); \\ P_{SFi}(k+1) = \frac{T}{k+1} [(-\Lambda_i(k) + M_i(k))P_{SFi}(k) + \Lambda_i(k)P_{Si}(k) + M_i(k)P_{Fi}(k)], \\ P_{Fi}(k+1) = \frac{T}{k+1} [-M_i(k)P_{Fi}(k) + \Lambda_i(k)P_{SFi}(k)], \quad i = 1..4. \end{cases} \quad (16)$$

де $P_z(k)$, $\Lambda_i(k)$, $M_j(k)$ – диференційні зображення оригіналів функцій $P_z(t)$, $\lambda_i(t)$, $\mu_j(t)$ відповідно.

Зважаючи на прийняті допущення, що стратегії гравців у ході інформаційного протистояння змінюються за лінійним законами (7), при переході в область P -зображень необхідно врахувати властивості T -добутків диференціальних зображень $\Lambda_i(k)P_z(k)$ та $M_j(k)P_z(k)$ [14-18], один з доданків в яких являє собою сталі λ та μ множені на цілу степінь незалежного змінного T^m (при $m=1$), в загальному вигляді:

$$\begin{aligned} \Lambda_i(k)P_z(k) &= \lambda_i T P_z(k-1) = \begin{cases} \lambda_i T P_z(k-1), & k \geq 1, \\ 0, & k < 1, \end{cases} \\ M_j(k)P_z(k) &= \mu_j T P_z(k-1) = \begin{cases} \mu_j T P_z(k-1), & k \geq 1, \\ 0, & k < 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

З урахуванням перетворень добутків в області зображень (18), система спектральних рівнянь (17) матиме вигляд:

$$\begin{cases} P_{S0}(k) = \prod_{i=1}^4 P_{Si}(k); \\ P_{F0}(k) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_{Fi}(k)); \\ P_{Si}(k) = 1 - P_{Fi}(k) - P_{SFi}(k); \\ P_{SFi}(k+1) = \frac{T^2}{k+1} [-(\lambda_i + \mu_i)P_{SFi}(k-1) + \lambda_i P_{Si}(k-1) + \mu_i P_{Fi}(k-1)]; \\ P_{Fi}(k+1) = \frac{T^2}{k+1} [-\mu_i P_{Fi}(k-1) + \lambda_i P_{SFi}(k-1)], \quad i = 1..4. \end{cases} \quad (18)$$

Використовуючи спектральну модель експлуатації системи (19) та початкові умови (6),

визначимо дискрети ймовірностей $P_{Fi}(k)$, при $k = 0, 1, 2, \dots$, в результаті отримуємо:

$$P_{Fi}(0) = P_{Fi}(1) = P_{Fi}(2) = 0; \quad (19)$$

$$P_{Fi}(3) = \frac{T^4}{3} \lambda_i^2; \quad (20)$$

$$P_{Fi}(4) = \frac{T^4}{8} (\lambda_i^2 - T^2 \lambda_i^3); \quad (21)$$

$$P_{Fi}(5) = \frac{T^4}{15} (-2T^2 \mu_i \lambda_i^2 - 2T^2 \lambda_i^3 + \lambda_i^2); \quad (22)$$

$$P_{Fi}(6) = \frac{T^4}{24} (-T^2 \mu_i \lambda_i^2 + T^4 \mu_i \lambda_i^3 + T^4 \lambda_i^4 - T^2 \lambda_i^3 + \lambda_i^2). \quad (23)$$

Згідно другого рівняння системи (19) та виразів (20) – (24) отримаємо відповідні дискрети ймовірності відмови серверу:

$$P_{F0}(0) = P_{F0}(1) = P_{F0}(2) = 0; \quad (24)$$

$$P_{F0}(3) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{3} \lambda_i^2); \quad (25)$$

$$P_{F0}(4) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{8} (\lambda_i^2 - T^2 \lambda_i^3)); \quad (26)$$

$$P_{F0}(5) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{15} (-2T^2 \mu_i \lambda_i^2 - 2T^2 \lambda_i^3 + \lambda_i^2)); \quad (27)$$

$$P_{F0}(6) = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{24} (-T^2 \mu_i \lambda_i^2 + T^4 \mu_i \lambda_i^3 + T^4 \lambda_i^4 - T^2 \lambda_i^3 + \lambda_i^2)). \quad (28)$$

Знаходження оптимальних стратегій кіберзахисту. Для отримання ціни гри в області зображень слід застосувати диференціальне перетворення (15) до виразу ціни гри в часовій області (13), тоді отримуємо [7, 13-16]:

$$I = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{P_{F0}(k)}{k+1}. \quad (29)$$

З врахуванням (30), відповідним чином в області зображень будемо розглядати максимінний критерій (11), який формалізуємо у вигляді:

$$\min_{\mu_{jk} \in E_{\mu}} \max_{\lambda_{ik} \in E_{\lambda}} I = \max_{\lambda_{ik} \in E_{\lambda}} \min_{\mu_{jk} \in E_{\mu}} I = I^*(t, P_{F0}^{opt}(k), \lambda_{ik}^{opt}, \mu_{jk}^{opt}). \quad (30)$$

Знайдемо ціну гри підставивши дискрети (25)-(29) в (30), отримуємо:

$$I \approx \sum_{k=0}^6 \frac{P_{F0}(k)}{k+1} = 1 + \frac{1}{4} (1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{3} \lambda_i^2)) + \frac{1}{5} (1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{8} (\lambda_i^2 - T^2 \lambda_i^3))) + \frac{1}{6} (1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{15} (-2T^2 \mu_i \lambda_i^2 - 2T^2 \lambda_i^3 + \lambda_i^2))) + \frac{1}{7} (1 - \prod_{i=1}^4 (1 - \frac{T^4}{24} (-T^2 \mu_i \lambda_i^2 + T^4 \mu_i \lambda_i^3 + T^4 \lambda_i^4 - T^2 \lambda_i^3 + \lambda_i^2))). \quad (31)$$

Знайдемо екстремуми функції (32) для чого вирішимо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial I}{\partial \lambda_i} : \left[\frac{T^4}{6} \lambda_i \right] \left(1 - \prod_{j=1, j \neq i}^4 \left(1 - \frac{T^4}{3} \lambda_j^2 \right) \right) + \left[\frac{T^4}{40} (2\lambda_i - 3T^2 \lambda_i^2) \right] \left(1 - \prod_{j=1, j \neq i}^4 \left(1 - \frac{T^4}{8} (\lambda_j^2 - T^2 \lambda_j^3) \right) \right) + \\ & + \left[\frac{T^4}{45} (-2T^2 \mu_i \lambda_i - 3T^2 \lambda_i^2 + \lambda_i) \right] \left(1 - \prod_{j=1, j \neq i}^4 \left(1 - \frac{T^4}{15} (-2T^2 \mu_j \lambda_j^2 - 2T^2 \lambda_j^3 + \lambda_j^2) \right) \right) + \\ & + \left[\frac{T^4}{168} (-2T^2 \mu_i \lambda_i + 3T^4 \mu_i \lambda_i^2 + 4T^4 \lambda_i^3 - 3T^2 \lambda_i^2 + 2\lambda_i) \right] \times \\ & \times \left(1 - \prod_{j=1, j \neq i}^4 \left(1 - \frac{T^4}{24} (-T^2 \mu_j \lambda_j^2 + T^4 \mu_j \lambda_j^3 + T^4 \lambda_j^4 - T^2 \lambda_j^3 + \lambda_j^2) \right) \right) = 0; \\ & \frac{\partial I}{\partial \mu_i} : \left[-\frac{T^6}{45} \lambda_i^2 \right] \left(1 - \prod_{j=1, j \neq i}^4 \left(1 - \frac{T^4}{15} (-2T^2 \mu_j \lambda_j^2 - 2T^2 \lambda_j^3 + \lambda_j^2) \right) \right) + \\ & + \left[\frac{T^6}{168} \lambda_i^2 (T^2 \lambda_i - 1) \right] \left(1 - \prod_{j=1, j \neq i}^4 \left(1 - \frac{T^4}{24} (-T^2 \mu_j \lambda_j^2 + T^4 \mu_j \lambda_j^3 + T^4 \lambda_j^4 - T^2 \lambda_j^3 + \lambda_j^2) \right) \right) = 0. \end{aligned} \right. \quad (32)$$

Беручи до уваги умову незалежності здійснення кібератак, стратегії захисту для кожної із інформаційних задач серверу можна відшукати припустивши відсутність конфліктів по інших функціях. Таким чином отримуємо:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial I}{\partial \lambda_i} : \frac{T^4}{6} \lambda_i + \frac{T^4}{40} (2\lambda_i - 3T^2 \lambda_i^2) + \frac{T^4}{45} (-2T^2 \mu_i \lambda_i - 3T^2 \lambda_i^2 + \lambda_i) + \\ & + \frac{T^4}{168} (-2T^2 \mu_i \lambda_i + 3T^4 \mu_i \lambda_i^2 + 4T^4 \lambda_i^3 - 3T^2 \lambda_i^2 + 2\lambda_i) = 0; \\ & \frac{\partial I}{\partial \mu_i} : -\frac{T^6}{45} \lambda_i^2 + \frac{T^6}{168} \lambda_i^2 (T^2 \lambda_i - 1) = 0. \end{aligned} \right. \quad (33)$$

Виконавши відповідні перетворення системи (34), отримуємо вирази для оптимальних стратегій гравців в області зображень:

$$\left\{ \begin{aligned} & \mu_i = -\frac{60T^4 \lambda_i^2 - 402T^2 \lambda_i + 602}{45T^4 \lambda_i - 142T^2}; & \mu_i \approx 16.35 \frac{1}{T^2}; \\ & \lambda_i = \frac{213}{45} \frac{1}{T^2}; & \lambda_i \approx 4.73 \frac{1}{T^2}. \end{aligned} \right. \quad (34)$$

Після переходу до часової області згідно (15) отримуємо вирази для оптимальних стратегій захисту та кібератак:

$$\left\{ \begin{aligned} & \mu_i(t) \approx 16.35 \frac{t}{T^2}; \\ & \lambda_i(t) \approx 4.73 \frac{t}{T^2}. \end{aligned} \right. \quad (35)$$

На основі (3) та (6) з використанням (36) побудовано математичну модель в середовищі MATLAB (Simulink) та виконано математичне моделювання процесу зміни ймовірностей станів комп'ютерно-інформаційної діагностичної системи на транспорті в процесі здійснення кібератаки, результати якого показано на рис. 2.

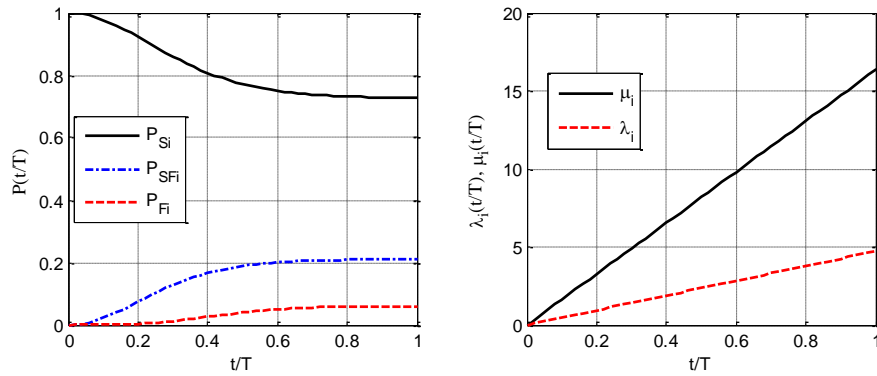


Рис. 2. Графіки перехідних процесів ймовірностей станів i -ї функції сервера при реалізації кібернападу з використанням оптимальних стратегій (36)

Як можна бачити з приведених результатів (рис. 2), при використанні отриманих оптимальних стратегій гарантований рівень ймовірності забезпечення захисту окремої функції серверу в умовах зосередженої кібератаки на кінець умовного періоду розгляду складає 0.73. В той же час, ймовірність відмови серверу по окремій функціональності рівна 0.06. При відхиленні гравців-учасників інформаційного конфлікту від оптимальних стратегій відповідним чином зміняться значення ймовірностей станів, проте значення плати не відповідатиме мінімальному.

Приведені графіки ілюструють динаміку протікання інформаційного конфлікту в розглядуваній системі в умовах здійснення атаки на виділену функцію багатозадачного серверу дистанції електропостачання залізниці. Моделювання процесу кібератаки виконано, для оцінки інтегральних показників захищеності серверу на основі (2), (3) та (6), при використанні оптимальних стратегій (36) по кожній із функцій.

На рис. 3 приведені графіки перехідних процесів ймовірності перебування серверу в захищеному стані та ймовірності відмови серверу по будь-якій із функціональностей.

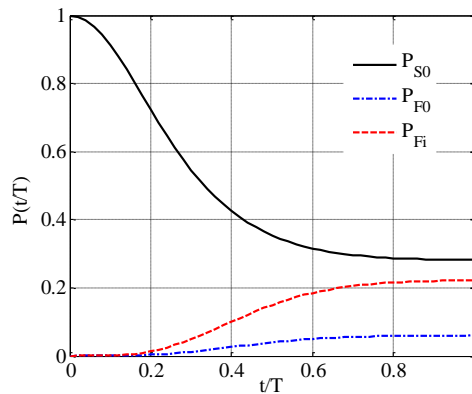


Рис. 3. Графіки перехідних процесів ймовірностей станів інформаційної системи при реалізації кібернападу на загальну функціональність сервера

Як можна бачити з приведених результатів (рис. 3), при використанні отриманих оптимальних стратегій гарантований рівень захищеності серверу в умовах кібератак на кінець умовного періоду розгляду складає 0.28. В той же час, ймовірність відмови серверу по будь-якій із функцій досягає 0.22.

Висновки. Проведено дослідження застосування методів диференціально-ігрового моделювання процесів кібернападу та захисту інформації розширено на спеціалізовані

інформаційно-діагностичні та керуючі комп'ютерні системи транспортної інфраструктури, а саме залізниці, для яких ставляться підвищені вимоги відносно надійності, інформаційної безпеки та безперебійної роботи. Розроблено диференціально-ігрову модель процесу кібернападу на мультитазовий сервер інформаційно-діагностичної комп'ютерної системи нижнього рівня залізниці, яка дозволяє отримати оптимальні стратегії захисту інформації в умовах кібератак.

В статті отримано графіки що ілюструють динаміку протікання інформаційного конфлікту в розглянутій системі в умовах здійснення атаки на виділену функцію багатозадачного серверу. Виконано моделювання процесу кібератаки, для оцінки інтегральних показників захищеності серверу дистанції електропостачання залізниці, при використанні оптимальних стратегій по кожній із функцій. Показано вигляд моделі комп'ютерно-інформаційної діагностичної системи, та приведені графіки перехідних процесів ймовірності перебування серверу в захищеному стані та ймовірності відмови серверу дистанції електропостачання залізниці по будь якій із функціональностей, що не може забезпечити безперебійну роботу залізничного транспорту.

Результати роботи можуть бути використані при формуванні планових заходів технічного обслуговування існуючих, мікропроцесорних пристроїв та систем транспортної інфраструктури, які мають аналогічну модульну структуру, а також, для оцінки показників надійності і відповідної корекції, на етапі розробки систем, для безперебійної роботи транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Калинюк І. О. Організація корпоративної системи моніторингу та діагностики тягових електричних мереж // Зб. наук. праць ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2011. № 61. С. 37-41.
2. Aminifar F., Fotuhi-Firuzabad M., Safdarian A., Davoudi A., and Shahidehpour M. Synchronphasor measurement technology in power systems: Panorama and state-of-the-art // Access, IEEE. 2014. Vol. 2. P. 1607-1628. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2389659.
3. НД ТЗІ 1.1-001-99. Технічний захист інформації на програмно-керованих АТС загального користування. Основні положення. [Чинний від 1999-05-28]. Київ: адміністрація Держспецв'язку, 1999. С. 26.
4. Воронко І. О. Основні проблеми вразливості WAMS та відповідні принципи захисту систем моніторингу та діагностики // Modern directions of scientific research development: the 4 th International scientific and practical conference Chicago, September 28-30, 2021. Chicago, USA: BoScience Publisher, 2021. С 128-131.
5. Воронко І. О. Захист інформації в комп'ютерних системах і мережах на основі теорії ігор // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: мат. всеукр. наук.-практ. інтернет-конф., м. Черкаси 18-22 березня 2013 р. Черкаси, 2013. С. 54-57.
6. Воронко І. О. Застосування методів теорії ігор для моделювання процесів нападу на інформацію в промислових комп'ютерних системах та мережах // Проблеми економіки и управления на железнодорожном транспорте: мат. VIII межд. науч.-практ. конф., г. Судак 08-11 октября 2013 г., г. Судак, АР Крым, 2013. С. 256-258.
7. Гришук Р. В. Теоретичні основи моделювання процесів нападу на інформацію методами теорій диференціальних ігор та диференціальних перетворень: монографія. Житомир: Рута, 2010. 280 с.
8. Вентцель Е. С. Исследование операций: Задачи, принципы, методология [2-е изд.]. М.: Наука, 1988. 208 с.
9. Manshaei M., Zhu Q. and Alpcan T. Basar, T., & Hubaux, J. P. Game theory meets network security and privacy // ACM Computing Surveys. 2013. Vol. 48. P. 51-61. DOI: <https://doi.org/10.1145/2480741.2480742>
10. Lin, Wei. Differential Games For Multi-agent Systems Under Distributed Information// Electronic Theses and Dissertations, University of Central Florida, 2013. 128 P. URL: <http://digital.library.ucf.edu/cdm/ref/collection/ETD/id/5973> (дата звернення 2.11.2021).
11. Гришук Р.В. Корченко О. Г. Методологія синтезу та аналізу диференціально-ігрових моделей та методів моделювання процесів кібернападу на державні інформаційні ресурси // Захист інформації. 2012. № 3. С. 115-122.
12. Грабар І. Г. Р. В. Гришук, К. В. Молодецька. Безпекова синергетика: кібернетичний та інформаційний аспекти: монографія; за заг. ред. д.т.н., проф. Р. В. Гришука. Житомир : ЖНАЕУ, 2019. 280 с.
13. Воронко І. О. Диференціально-ігрова модель надійності мікропроцесорних систем моніторингу тягових електричних мереж // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Х.: УкрДАЗТ, 2013. № 5. С. 8-15.
14. Стасюк О. І., Баранов В. Л., Баранов Г. Л., Фролова О. Г. Диференціальні перетворення для комп'ютерного моделювання керуючих систем: [навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл.]. К.: КУЕТТ, 2005. 135 с.
15. Stasiuk A. I., Hryshchuk R. V., Goncharova L. L. A Mathematical Cybersecurity Model of a Computer Network for the Control of Power Supply of Traction Substations //Cybernetics and Systems Analysis. 2017. Vol 53. P 476-484. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10559-017-9949-z>
16. Zhi Li, Haitao Xu, Yanzhu Liu. A differential game model of intrusion detection system in cloud computing // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2017. Vol. 13(1). DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147716687995>
17. Пухов Г. Е. Дифференциальные спектры и их модели. К.: Наук. думка, 1990. 184 с.
18. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. К.: Наук. думка, 1984. 420 с.

REFERENCES

1. Kalyniuk I. O. (2011). Orhanizatsiia korporativnoi systemy monitorynhu ta diahnostryky tiahovykh elektrychnykh merezh [Organization of corporate system of monitoring and diagnostics of traction electric networks] // *Zb. nauk. prats in-tu problem modeliuвання v enerhetytsi im. H.Ie. Pukhova NAN Ukrainy*, 61. 37-41. [in Ukrainian].
2. Aminifar F., Fotuhi-Firuzabad M., Safdarian A., Davoudi A., and Shahidehpour M. (2014) Synchrophasor measurement technology in power systems: Panorama and state-of-the-art // *Access, IEEE*, 2. 1607-1628. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2389659.
3. Tekhnichniy zakhyst informatsii na prohramno-kerovanykh ATS zahalnoho korystuvannya. Osnovni polozhennia [Technical protection of information on software-controlled public PBXs. Substantive provisions] (1999). *ND T31 1.1-001-99 from 28th May 1999*. Kyiv: administratsiia Derzhspetsviazku. [in Ukrainian].
4. Voronko I. O. (2021) Osnovni problemy vrazlyvosti WAMS ta vidpovidni pryntsyipy zakhystu system monitorynhu ta diahnostryky [The main problems of WAMS vulnerability and the corresponding principles of protection of monitoring and diagnostic systems]// *Modern directions of scientific research development: the 4 th International scientific and practical conference (128-131)* Chicago, USA: BoScience Publisher. [in Ukrainian].
5. Voronko I. O. (2013) Zakhyst informatsii v kompiuternykh systemakh i merezhakh na osnovi teorii ihor [Information security in computer systems and networks based on game theory] // *Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnologii u vyrobnytsvii ta osviti: stan, dosiahnennia, perspektyvy rozvytku: mat. vseukr. nauk.-prakt. internet-konf.*, (54-57). Cherkasy. [in Ukrainian].
6. Voronko I. O. (2013) Zastosuvannya metodiv teorii ihor dlia modeliuвання protsesiv napadu na informatsiiu v promyslovykh kompiuternykh systemakh ta merezhakh [Application of game theory methods for modeling information attack processes in industrial computer systems and networks] // *Problemy ekonomiky u upravleniia na zheleznodorozhnom transporte: mat. VIII mezhd. nauch.-prakt. konf.*, (256-258) h. Sudak, AR Kryn. [in Ukrainian].
7. Hryshchuk R. V. (2010) Teoretychni osnovy modeliuвання protsesiv napadu na informatsiiu metodamy teorii dyferentsialnykh ihor ta dyferentsialnykh peretvoren [Theoretical bases of modeling of processes of attack on information by methods of theories of differential games and differential transformations]: *monohrafiia*. Zhytomyr: Ruta. 280. [in Ukrainian].
8. Venttsel E. S. (1988) Yssledovanye operatsyi: Zadachy, pryntsyipy, metodolohiia [Operations research: Tasks, principles, methodology]. M.: Nauka. 208. [in Russian].
9. Manshaei M., Zhu Q. and Alpcan T. Basar, T., & Hubaux, J. P. (2013) Game theory meets network security and privacy// *ACM Computing Surveys*, 48. 51-61. DOI: <https://doi.org/10.1145/2480741.2480742>.
10. Lin, Wei (2013). Differential Games For Multi-agent Systems Under Distributed Information// *Electronic Theses and Dissertations*.128. Retrieved from URL: <http://digital.library.ucf.edu/cdm/ref/collection/ETD/id/5973>.
11. Hryshchuk R.V. Korchenko O. H. (2012) Metodolohiia syntezy ta analizu dyferentsialno-ihrovykh modelei ta metodiv modeliuвання protsesiv kibernetynapadu na derzhavni informatsiini resursy [Methodology of synthesis and analysis of differential game models and methods of modeling cyberattack processes on state information resources] // *Zakhyst informatsii*, 3. 115-122. [in Ukrainian].
12. Hrabar I. H. R. V. Hryshchuk, K. V. Molodetska (2019) Bezpekova synerhetyka: kibernetychnyi ta informatsiinyi aspekty [Security synergetics: cybernetic and informational aspects]: *monohrafiia; za zah. red. d.t.n., prof. R. V. Hryshchuka*. Zhytomyr: ZhNAEU. 280. [in Ukrainian].
13. Voronko I. O. (2013) Dyferentsialno-ihrova model nadiinosti mikroprotsesornykh system monitorynhu tiahovykh elektrychnykh merezh [Differential game model of reliability of microprocessor monitoring systems of traction electric networks]// *Informatsiino-keruivchi systemy na zaliznychnomu transporti*. Kh.: UkrDAZT, 5. 8-15. [in Ukrainian].
14. Stasiuk O. I., Baranov V. L., Baranov H. L., Frolova O. H. (2005) Dyferentsialni peretvorennia dlia kompiuternoho modeliuвання keruivchykh system [Differential transformations for computer modeling of control systems]: *navch. posibn. dlia stud. vyshch. navch. zakl.* K.: KUETT. 135. [in Ukrainian].
15. Stasiuk A. I., Hryshchuk R. V., Goncharova L. L. (2017) A Mathematical Cybersecurity Model of a Computer Network for the Control of Power Supply of Traction Substations // *Cybernetics and Systems Analysis*, 53. 476-484. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9949-z>.
16. Zhi Li, Haitao Xu, Yanzhu Liu. (2017) A differential game model of intrusion detection system in cloud computing // *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(1). DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147716687995>
17. Pukhov H. E. (1990) Dyfferentsyalnye spektry y ykh modely [Differential spectra and their models]. K.: Nauk. dumka.184. [in Russian].
18. Pukhov H.E. (1984) Dyfferentsyalnye preobrazovaniya funktsyi y uravneniy [Differential transformations of functions and equations]. K.: Nauk. dumka. 420. [in Russian].

*Iryna Voronko*¹

¹Senior Lecturer, Department of automation and computer-integrated transport technologies, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

DIFFERENTIAL-GAME MODEL OF INFORMATION PROTECTION FOR COMPUTER SYSTEMS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

The article considers the reliability and protection of information of computer systems of transport infrastructure and describes the synthesis and analysis of differential game models and methods of modeling cyberattack processes on the server of computer information and diagnostic systems of the railway power supply distance. A unified differential-game model of the cyberattack process on the multi-task server of the information-diagnostic computer system of the lower level of the railway has been developed, which allows to obtain optimal strategies for information protection in cyberattacks. The results of modeling the cyberattack process are presented, to assess the integrated indicators of server security, using the optimal strategies for each of the functions. The appearance of the unified model of the computer information system is shown, and the graphs of the transient processes of the probability of the server being in a protected state and the probability of server failure for any of the functionalities are given.

Keywords: *information security, cyberattack, cybersecurity strategy, cyberattack strategy, differential game models, graph model.*

Марія Весела^{1*}, Ірина Клименко², Юлія Мельнікова³

¹ Доцент, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19 м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9318-9110>

² Доцент, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19 м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6263-0951>

³ Старший викладач, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19 м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7023-023X>

* Автор, відповідальний за листування: mves357@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ В АДАПТИВНОМУ УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕМ

Для подолання недостачі інформації о параметрах їздового циклу електромобіля використовуються нейронні мережі, за допомогою яких передбачається адаптивне управління, що дозволяє пристосовувати електромобіль до зовнішніх умов експлуатації, а також компенсувати неточності математичних моделей. Використання ітеративної оптимізації параметрів дозволяє налаштувати оптимальну роботу силової установки електромобіля (СУЕ) в процесі його руху. Цей метод дозволяє використовувати єдиний підхід для дослідження різних процесів незалежно від параметричних особливостей електромобілів. Для прискорення адаптації проводять навчання нейроконтролера і нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління, в якості якої виступає або оптимальна стратегія, або стратегія, яка основана на логічних правилах вибору, отримана за допомогою методичного програмування для деякого заданого їздового циклу. За результатами дослідження запропоновано алгоритм адаптації. Приведені в статті вирази дозволяють здійснювати адаптацію силової установки на основі гібриду до поточного їздового циклу на основі концепції навчання нейронечіткого контролера з підкріпленням. Ціль навчання нейронечіткого контролера є формування таких керуючих впливів силової установки, які б сприяли зменшенню квадратичного значення оцінки функціоналу якості управління.

Ключові слова: нейронні мережі, електромобіль, силова установка електромобіля, адаптивне управління, нейроконтролер.

Вступ. У сучасному світі людина намагається зробити своє життя безпечним та комфортним за допомогою розробки та використання сучасних технологій, однією з таких є нейронна мережа, яку наразі успішно використовують в різних галузях. Нейронні мережі використовують там, де необхідно вирішувати задачі оптимізації, контролю, управління та прогнозування. Широкий спектр використання обумовлюється такими властивостями як багатозадачність та легкість у користуванні. Нейронні мережі привабливі за рахунок простоти використання й імітації роботи мозку людини. Використання нейронної мережі для адаптації силової установки електромобіля до реальних умов руху в режимі експлуатації дозволяє подолати нестачу інформації о параметрах їздового циклу та зовнішніх умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Рішення завдання оптимізації управління силовою установкою електромобіля наштовхує на ряд труднощів, пов'язаних з ідентифікацією математичних моделей силової установки електромобіля (СУЕ) як об'єктів управління, а також з недоліком апріорної інформації про параметри їздового циклу.

Є необхідність в розробці методики адаптації стратегії управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою до умов експлуатації з використанням нейронної мережі для подолання недостачі інформації.

Мета і завдання дослідження. Використання нейронної мережі дозволяє імітувати рух транспортного засобу й адаптувати його до реальних умов руху в режимі експлуатації. Нейронна мережа відрізняється тим, що в процесі руху транспортного засобу вона не програмується, а навчається. Існує три способи навчання нейронної мережі:

- навчання з супервайзером, коли є усі дані для тренування моделі;
- навчання без супервайзера, коли є набір даних, але не має чітких вказівок для роботи;
- навчання з підкріпленням, коли знаходиться баланс між дослідженням та адаптацією до дії.

Рішення завдання оптимізації управління СУЕ наштовхує на ряд труднощів, пов'язаних з ідентифікацією математичних моделей СУЕ як об'єктів управління, а також з недоліком апріорної інформації о параметрах їздового циклу стосовно зовнішніх умов експлуатації[1].

Матеріали та методи дослідження. Одним із способів подолання зазначених труднощів є використання концепції адаптивного управління, коли низька точність математичних моделей і недолік апріорної інформації заповнюються за рахунок більш повного використання поточної інформації. У цьому випадку характеристики системи управління доцільно представити у вигляді параметричних даних, що задаються апроксимуючими функціями, а настройку виробляти шляхом ітеративної оптимізації параметрів. При цьому система автоматичного управління СУЕ повинна мати в своєму складі блок адаптації, що забезпечує асимптотичне наближення $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$ і при $t \rightarrow \infty$ шляхом налаштування параметрів регулятора, яка наведена на рис. 1.

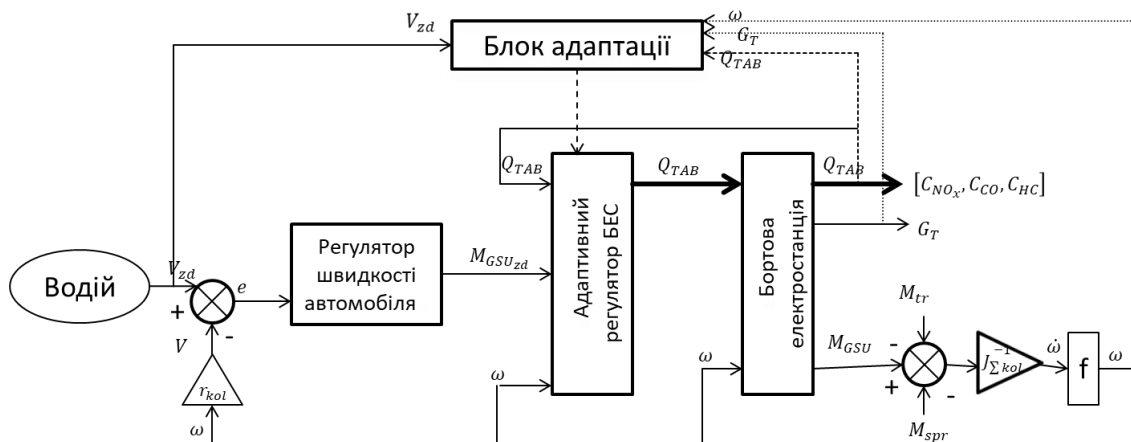


Рис. 1. Система адаптивного керування силовою установкою електромобіля

Одним з найбільш перспективних і недосліджених підходів до реалізації адаптивного управління силовою установкою є управління з використанням нейромережевого адаптивного критика (Adaptive Critic), відомий також як «Наближене динамічне програмування» (Approximated Dynamic Programming). В цьому випадку в структурній схемі системи автоматичного управління міститься блок – Критик, що оцінює якість роботи всієї системи управління. Даний підхід передбачає адаптацію стратегії управління гібридної силової установки на основі концепції навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning).

Розглянемо структуру адаптивного регулятора електросилової установки, який реалізує концепцію нейромережевого управління з нейромережевими критиком і моделлю об'єкта управління, наведену на рис. 2 [3].

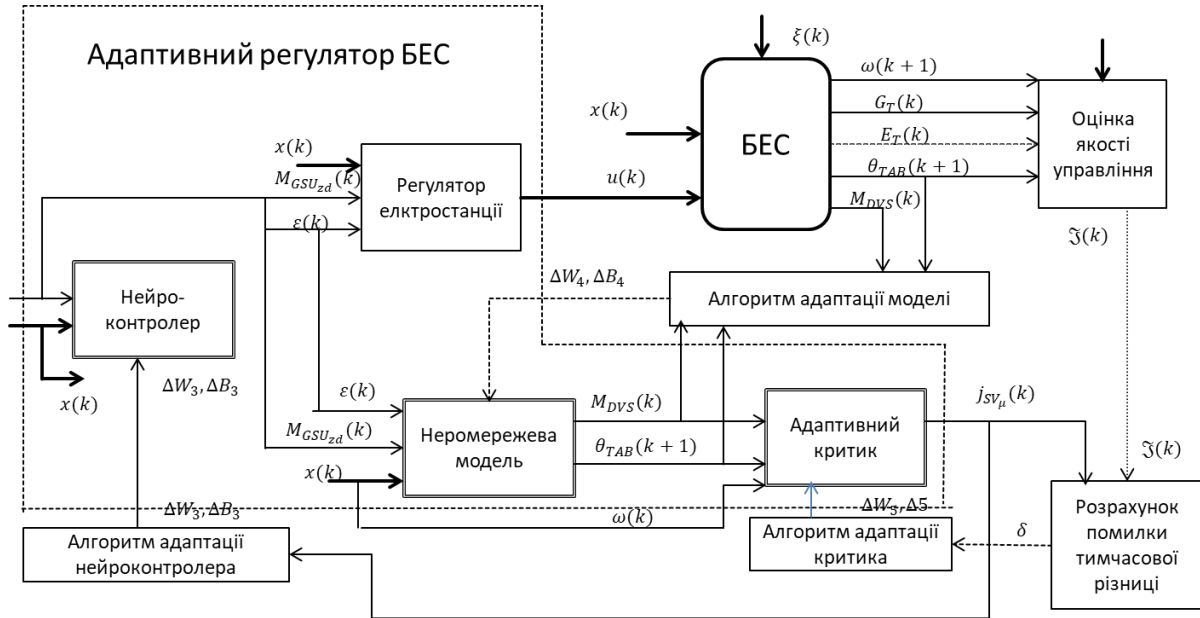


Рис. 2. Адаптивний регулятор гібридної силової установки

В процесі функціонування системи автоматичного управління гібридної силової установки на k -м кроці управління обчислення коефіцієнта використання електроприводу здійснюється нейроконтролером $\varepsilon = F_{GSU,NC}(x, M_{GSU.zd})$, який реалізований у вигляді тришарової нейронної мережі прямого поширення з активаційною функцією нейронів прихованих шарів у вигляді функції гіперболічного тангенса і лінійного нейрона вихідного шару

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k) \\ \bar{M}_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} - \underset{k=0,N}{M} \left\{ \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\} \right) : \underset{k=0,N}{std} \left\{ \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$$N_{31} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2(W_{31} \cdot [\bar{\omega}(k) \ \bar{\theta}_{TAB}(k) \ \bar{M}_{GSU.zd}(k)]^T + B_{31}) \right) \right) - 1, \quad (2)$$

$$N_{32} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot (W_{32} \cdot N_{31} \cdot B_{32}) \right) \right) - 1, \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}(k) = W_{33} \cdot N_{32} \cdot B_{33}, \quad \varepsilon(k) = \bar{\varepsilon}(k) \cdot \underset{k=0,N}{std} \{ \varepsilon(k) \} + \underset{k=0,N}{M} \{ \varepsilon(k) \}, \quad (4)$$

де W_{31}, W_{32}, W_{33} – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого, другого і третього шарів ІНМ нейроконтролера відповідно;

B_{31}, B_{32}, B_{33} – вектори зсувів нейронів відповідних прошарків;

символ «:» в нормується вираженні означає поелементний розподіл векторів.

Потім регулятор силової установки визначає вектор управління $u = f_{GSU,rg}(\varepsilon, M_{GSU.zd}, x)$ відповідно до виражень, наведених в п. 3.1.2. Керуючі впливи трапляються на вхід об'єкта управління.

Одночасно нейромережева модель $[\widehat{M}_{DVS}, \widehat{\theta}_{ТАБ}]^T = F_{GSU.MD}(\varepsilon, x, M_{GSU.zd})$ на підставі поточного стану силової установки і застосовуваного управління дає оцінку параметрів стану системи на наступному кроці управління, які критичні з точки зору оцінки функціонала $J_{SV\mu}$. Нейросіт'єва модель реалізована у вигляді двошарової інтелектуальної нейронної мережі прямого поширення з активаційною функцією нейронів прихованого шару у вигляді функції гіперболічного тангенса і лінійних нейронах вихідного шару

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}(k) \\ \bar{\omega}(k) \\ \bar{\theta}_{ТАБ}(k) \\ \bar{M}_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{ТАБ}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} - \underbrace{M}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{ТАБ}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\} : \underbrace{std}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{ТАБ}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\}, \quad (5)$$

$$N_{41} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2(W_{41} \cdot [\bar{\omega}(k) \quad \bar{\theta}_{ТАБ}(k) \quad \bar{M}_{GSU.zd}(k)]^T + B_{41}) \right) \right) - 1, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \widehat{M}_{DVS.zd}(k) \\ \widehat{\theta}_{ТАБ}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{M}_{DVS.zd}(k) \\ \bar{\theta}_{ТАБ}(k+1) \end{bmatrix} * \underbrace{std}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \widehat{M}_{DVS}(k) \\ \widehat{\theta}_{ТАБ}(k) \end{bmatrix} \right\} + \underbrace{M}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \widehat{M}_{DVS}(k) \\ \widehat{\theta}_{ТАБ}(k) \end{bmatrix} \right\}, \quad (7)$$

де W_{41}, W_{42} – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого і другого прошарків ІНС нейроконтролера відповідно;

B_{41}, B_{42} – вектори зсувів нейронів відповідних прошарків;

символ «*» при денормуванні вихідного сигналу інтелектуальної нейронної мережі позначається поелементне множення векторів.

Адаптивний критик здійснює оцінку функціоналу якості управління $J_{SV\mu}(k)$ на даному етапі при обраному управлінні і поточний стан силової установки, спираючись на оцінку параметрів системи, здійсненої нейромережевою моделлю

$$\hat{J}_{SV\mu} = F_{GSU.KR}(\widehat{M}_{DVS}(k), \widehat{\theta}_{ТАБ}(k), \omega). \quad (8)$$

Адаптивний критик реалізований у вигляді інтелектуальної нейронної мережі з архітектурою, подібної нейромережевої моделі

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_{GSU.zd}(k) \\ \bar{\theta}_{ТАБ}(k+1) \\ \bar{\omega}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{M}_{GSU.zd}(k) \\ \widehat{\theta}_{ТАБ}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} - \underbrace{M}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \widehat{M}_{GSU.zd}(k) \\ \widehat{\theta}_{ТАБ}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} \right\} : \underbrace{std}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \widehat{M}_{GSU.zd}(k) \\ \widehat{\theta}_{ТАБ}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

$$N_{51} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2(W_{51} \cdot [\bar{\omega}(k) \quad \bar{\theta}_{ТАБ}(k) \quad \bar{M}_{GSU.zd}(k)]^T + B_{51}) \right) \right) - 1, \quad (10)$$

$$\hat{J}_{SV\mu}(k) = W_{52} \cdot N_{51} \cdot B_{52} \quad (11)$$

де W_{51}, W_{52} – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого і другого прошарків мережі нейроконтролера відповідно;

B_{51}, B_{52} – вектори зсувів нейронів відповідних прошарків;

У ряді випадків можлива подача на входи адаптивного критика дійсних значень параметрів ГСУ $M_{DVS}(k)$ і $\theta_{ТАБ}(k+1)$ замість їх оцінки нейромережевою моделлю. В цьому випадку інтелектуальна нейронна мережа $F_{GSU.MD}$ служить тільки для зворотного поширення помилки при налаштуванні нейроконтролера в процесі адаптації системи автоматичного управління гібридної силової установки.

Блок адаптації забезпечує параметричну настройку (навчання) нейронної мережі нейроконтролера, моделі і адаптивного критика шляхом налаштування відповідних матриць вагових коефіцієнтів і векторів зсувів нейронів.

Метою навчання нейроконтролера є формування таких керуючих впливів силової установки, які б сприяли зменшенню квадратичного значення оцінки функціонала якості управління

$$E_{NC} = \frac{1}{2} \cdot \hat{J}_{SV\mu}^2 \rightarrow \min . \quad (12)$$

Навчання проводиться методом зворотного поширення помилки через нейронні мережі адаптивного критика, моделі і, власне, нейроконтролера. Корекція параметрів інтелектуальної нейронної мережі нейроконтролера здійснюється відповідно до виражень

$$W_{3i}(k+1) = W_{3i}(k) + \Delta W_{3i}(k+1) \quad (13)$$

$$B_{3i}(k+1) = B_{3i}(k) + \Delta B_{3i}(k), \quad i = \overline{1,3}, \quad (14)$$

де

$$\Delta W_{3i}(k) = \nu_{NC} \cdot \Delta W_{3i}(k-1) + \lambda_{NC} \cdot (1 - \nu_{NC}) \cdot \left. \frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{3i}} \right|_{W_{3i} = W_{3i}(k)} \quad (15)$$

$$\Delta B_{3i}(k) = \nu_{NC} \cdot \Delta B_{3i}(k-1) + \lambda_{NC} \cdot (1 - \nu_{NC}) \cdot \left. \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{3i}} \right|_{B_{3i} = B_{3i}(k)} \quad (16)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{33}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial \bar{\varepsilon}} = \left\{ W_{41}^T \cdot \left(W_{42}^T \cdot \left\{ W_{51}^T \cdot W_{52}^T \cdot \hat{J}_{SV\mu} * (1 - N_{51}^2) \right\}_{1,2} \right) * (1 - N_{41}^2) \right\}_1 \quad (17)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} = W_{33}^T \cdot \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{33}} * (1 - N_{32}^2) \quad \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{31}} = W_{32}^T \cdot \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} * (1 - N_{31}^2); \quad (18)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{33}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} \cdot N_{32}^T; \quad \frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{32}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{31}} \cdot N_{31}^T \quad (19)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{31}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{31}} \cdot \left[\bar{M}_{GSU.zd}, \bar{\theta}_{ТАБ}(k), \bar{\omega} \right] \quad (20)$$

λ_{NC} – коефіцієнт швидкості навчання інтелектуальної нейронної мережі контролера;

ν_{NC} – коефіцієнт інерційності навчання.

У наведених виразах символ «*» позначає поелементне множення векторів, запис «{·}» – i -й елемент вектора, зведення вектора в квадрат передбачає поелементне виконання даної операції.

Метою навчання нейросітвової моделі є уточнення прогнозів параметрів стану системи на наступному кроці управління

$$E_{MD}(k) = \frac{1}{2} \cdot \left(\left[\bar{M}_{DVS}(k) \right] - \left[\bar{\theta}_{ТАБ}(k+1) \right] \right)^2 \rightarrow \min \quad (21)$$

де

$$\left[\bar{M}_{DVS}(k) \right] = \left(\left[M_{DVS}(k) \right] - \underset{k=0,N}{M} \left\{ \left[M_{DVS}(k) \right] \right\} \right) : \underset{k=0,N}{std} \left\{ \left[M_{DVS}(k) \right] \right\} \quad (22)$$

– дійсні параметри стану гібридної силової установки після нормування.

Навчання інтелектуальної нейронної мережі моделі проводиться методом зворотного поширення помилки. При цьому корекція параметрів нейромережі здійснюється відповідно до виражень

$$W_{4i}(k+1) = W_{4i}(k) + \Delta W_{4i}(k), \quad (23)$$

$$B_{4i}(k+1) = B_{4i}(k) + \Delta B_{4i}(k), \quad i = \overline{1, 2}, \quad (24)$$

де

$$\Delta W_{4i}(k) = v_{MD} \cdot \Delta W_{4i}(k-1) + \lambda_{MD} \cdot (1 - v_{MD}) \cdot \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{4i}} \right|_{W_{4i} = W_{4i}(k)} \quad (25)$$

$$\Delta B_{4i}(k) = v_{MD} \cdot \Delta B_{4i}(k-1) + \lambda_{MD} \cdot (1 - v_{MD}) \cdot \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{4i}} \right|_{B_{4i} = B_{4i}(k)} \quad (26)$$

$$\left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \right|_{B_{42} = B_{42}(k)} = \left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{ТАБ}(k+1) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{ТАБ}(k+1) \end{array} \right] \quad (27)$$

$$\frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{41}} = W_{42}^T \cdot \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} * (1 - N_{41}^T) \quad (28)$$

$$\frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} = \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \cdot N_{41}^2 \quad \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} = \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \cdot \left[\begin{array}{c} \bar{\varepsilon} \\ \bar{\omega} \\ \bar{\theta}_{ТАБ} \\ \bar{M}_{GSU.zd} \end{array} \right]^T \quad (29)$$

λ_{MD} і v_{MD} – коефіцієнти швидкості і інерційності навчання інтелектуальної нейронної мережі контролера.

Навчання адаптивного критика полягає в тому, щоб ітеративно уточнювати оцінку функціоналу якості управління відповідно до підкріплення, що надходять.

Вираз для функціоналу якості управління на k -му кроці може бути записано у вигляді

$$J_{SV\mu}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu^j \cdot \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{z}_i(k+j) = \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{z}_i(k) + \mu \cdot J_{SV\mu}(k+1) \quad (30)$$

Будемо вважати, що функції $V_{zd} = V_{zd}(t)$ і $\alpha = \alpha(t)$, $t \in T$, які визначають тягово-швидкісний режим електросилової установки, є ергодичними. В цьому випадку помилку адаптивного критика можна представити у вигляді помилки тимчасової різниці [9].

$$\delta(k) = \hat{J}_{SV\mu}(k) - \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{z}_i(k) - \mu \cdot \hat{J}_{SV\mu}(k+1) = \hat{J}_{SV\mu}(k-1) - \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{z}_i(k-1) - \mu \cdot \hat{J}_{SV\mu}(k) \quad (31)$$

Для обчислення помилки тимчасової різниці повинні використовуватися оцінки $\hat{J}_{SV\mu}$ на двох наступних, один за одним кроках управління при одних і тих же значеннях параметрів нейромережі адаптивного критика.

Корекція параметрів нейромережі адаптивного критика здійснюється з умови мінімізації

квадратичної помилки

$$E_{KR} = \frac{1}{2} \cdot \delta^2 \rightarrow \min \quad (32)$$

Згідно з виразами

$$W_{5i}(k+1) = W_{5i}(k) + \Delta W_{5i}(k) \quad (33)$$

$$B_{5i}(k+1) = B_{5i}(k) + \Delta B_{5i}(k), \quad i = \overline{1, 2}, \quad (34)$$

де

$$\Delta W_{5i}(k) = v_{KR} \cdot \Delta W_{5i}(k-1) + \lambda_{KR} \cdot (1 - v_{KR}) \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial W_{5i}} \right|_{W_{5i} = W_{5i}(k)} \quad (35)$$

$$\Delta B_{5i}(k) = v_{KR} \cdot \Delta B_{5i}(k-1) + \lambda_{KR} \cdot (1 - v_{KR}) \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{5i}} \right|_{B_{5i} = B_{5i}(k)} \quad (36)$$

$$\left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \right|_{B_{52} = B_{52}(k)} = \delta(k); \quad \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{51}} = W_{52}^T \cdot \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} * (1 - N_{51}^2); \quad (37)$$

$$\frac{\partial E_{KR}}{\partial W_{52}} = \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \cdot N_{51}^T \quad (38)$$

$$\left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} \right|_{W_{51} = W_{51}(k)} = \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \right|_{B_{51} = WB_{51}(k)} \cdot \begin{bmatrix} \bar{M}_{GSU.zd} \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \bar{\omega}(k) \end{bmatrix}^T \quad (39)$$

λ_{KR} і v_{KR} – коефіцієнти швидкості і інерційності навчання нейронної мережі адаптивного критика відповідно.

Таким чином, на кожному кроці поліпшується закон управління шляхом навчання нейроконтролера, а також підвищується здатність системи оцінювати поточну ситуацію внаслідок навчання інтелектуальної нейронної системи адаптивного критика і моделі. Корекція параметрів нейронних мереж триває до тих пір, поки не буде досягнутий мінімум функціоналу якості управління $J_{SV\mu}$ або буде отримана прийнятна стратегія управління для заданого їздового циклу.

Інтелектуальна нейронна мережа нейроконтролера, моделі і адаптивного критика можуть бути ініційовані випадковими значеннями вагових коефіцієнтів і зсувів нейронів, рівномірно розподіленими в діапазоні $[-1, 1]$. В цьому випадку допустимі управління при довільних задаючих і обурюючих впливах гарантуються урахуванням обмежень області припустимих режимів в регуляторі електронної силової установки $u = f_{GSU.rg}(\varepsilon, M_{GSU.zd}, V)$.

Однак, для прискорення адаптації доцільно провести попереднє «off-line» навчання нейроконтролера і нейронної мережі моделі з використанням еталонної моделі управління (рис. 3.) Як еталонна модель може виступати управління з використанням логічних правил вибору стратегії або оптимальна стратегія управління, отримана для деякого заданого їздового циклу.

В процесі моделювання руху автомобіля на деякому їздовому циклі при використанні моделі управління ГСУ отримують множину точок $\{\varepsilon_i, \omega_i, \theta_i, M_{GSU.zd}\}$ і $\{M_{GSU.zd}, \theta_{TAB.i}, \varepsilon_i, \omega_i, \theta_{TAB.i}, M_{GSU.zd}\}$, $i = \overline{1, N}$, де $\theta_{TAB.i}$ – значення ступеня зарядженості тягової акумуляторної батареї на подальшому кроці управління.

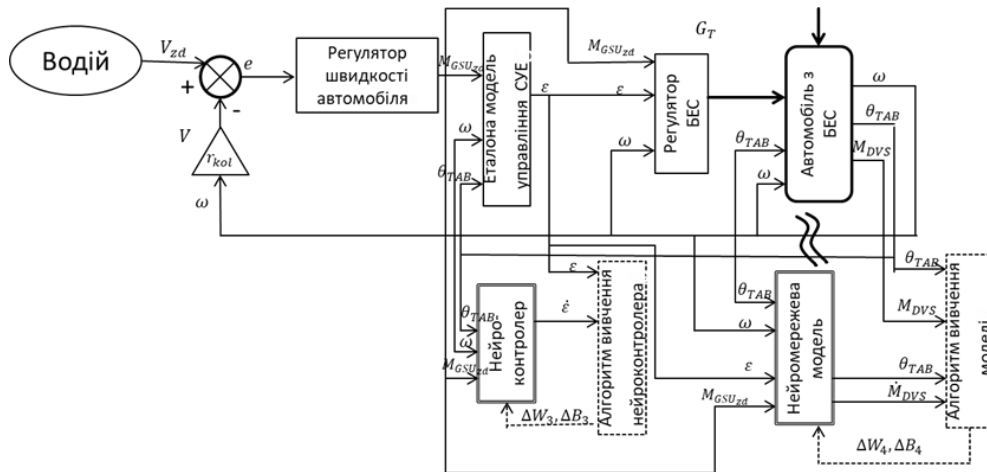


Рис. 3. Навчання нейроконтролера і нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління

Функції нев'язки виходів нейроконтролера та нейромережевої моделі в j -й точці можуть бути визначені:

$$\begin{cases} \psi_{GSU.zd}(i, W_{3j}, B_{3j}) = (\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_i)^2 \\ \hat{\varepsilon}_i = F_{GSU.zd}(\omega_i, \theta_{TAB.i}, M_{GSU.zd.i}, W_{3j}, B_{3j}), \quad j = \overline{1,3} \end{cases} \quad (40)$$

Задача навчання нейронних мереж $F_{GSU.NC}$ і $F_{GSU.MD}$ зводиться к пошуку мінімуму цільових функціоналів виду

$$J_{GSU.NC}(W_{3j}, B_{3j}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \psi_{GSU.zd}(i, W_{3j}, B_{3j}), j = \overline{1,3} \rightarrow \min \quad (41)$$

$$J_{GSU.MD}(W_{4j}, B_{4j}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \psi_{GSU.MD}(i, W_{4j}, B_{4j}), j = \overline{1,2} \rightarrow \min \quad (42)$$

Для вирішення даної задачі можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж. Високу ефективність при навчанні неронних мереж $F_{GSU.NC}$ і $F_{GSU.MD}$ показує алгоритм SGG(Scaled Conjugate Gradient Algorithm)[7].

З метою запобігання ефекту перенавчання, множини вихідних даних можуть бути розділені на навчальну (training set) і контрольну (validation set) підмножину з використанням відповідних коефіцієнтів розбиття подібно тому, як це робилось в процесі ідентифікації нейромережевої моделі двигуна внутрішнього згоряння[8].

Попереднє навчання адаптивного критика $F_{GSU.KR}$ може бути виконано «on-line» з використанням помилки тимчасової різниці безпосередньо перед запуском процесу адаптації стратегії управління гібридної силової установки[4]. Якість управління гібридною силовою установкою та швидкість адаптації стратегії управління можна покращити, якщо доповнити вхідні вектора нейроконтролера та нейромережевої моделі адаптивного регулятора сигналом ідентифікації типу їздового циклу. Даний сигнал може бути отриман в результаті аналізу характеру змін функцій $\omega=\omega(t)$ та $\alpha=\alpha(t)$ или $M_{GSU.zd}=M_{GSU.zd}(t)$ в деякому ковзному тимчасовому вікні В роботах показана ефективність вирішення задачі ідентифікації типу їздового циклу за допомогою само організованого шару Кохонена та інтелектуальних систем прямого поширення з елементами затримки сигналу[7].

Висновки. Для тягово-швидкісного режиму, що визначається заданими функціями зміни швидкості автомобіля і зовнішніх умов експлуатації, оптимальна стратегія управління СУЕ

може бути отримана на підставі методу динамічного програмування. Однак, даний підхід не вказує конструктивного шляху для побудови системи автоматичного управління в силу необхідних апріорних відомостей, задаючих і обурюючих впливах і високою обчислювальною складністю алгоритму. Отримане оптимальне управління може використовуватися при розробці логічних правил вибору стратегії управління, а також при науковому обґрунтуванні параметрів і характеристик систем і агрегатів СУЕ. Застосування адаптивного управління СУЕ з використанням нейромережевого адаптивного критика дозволяє подолати недолік апріорної інформації о параметрах їздового циклу та зовнішніх умов експлуатації, а також низьку точність математичних моделей. Даний підхід передбачає адаптацію стратегії управління СУЕ, яка забезпечує асимптотичне наближення $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$ та $u \rightarrow u^*$ при $t \rightarrow \infty$, на основі концепції навчання з підкрпленням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Конверсія легкового автомобіля в гібридний/ Бажинов О.В., Двадненко В.Я., Хакім М. Харків: ХНАДУ, 2014. 160 с.
2. Adams T. (2017). Training an artificial neural network. <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf>.
3. Smirnov O.P., Bazhinova T.O., Veselaya M.A. Substantiation of Rational Technical & Economic Parameters of Hybrid Car. Automation, Software Development & Engineering. Vol. 1 URL: <http://asdej.xyz/substantiation-of-rational-technical-economic-parameters-of-hybrid-car/> 2017.
4. Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Ronald G. Harley, Donald C. Wunsch. Implementation of Adaptive Critic-Based Neurocontrollers for Turbogenerators in a Multimachine Power System // IEEE Transactions on Neural Networks. 2013, Sept. Vol. 14, No 5. P. 1047-1064.
5. James Larminie, John Lowry. Electric vehicle technology explained. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2013. 296 p.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс./ С. Хайкин; пер. с англ. : 2-е изд. М.: Издательский дом. Переиздано «Вильямс», 2016. 1104 с.
7. Чернодуб А.Н. Обзор методов нейруправления/ А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования.: 2011. №2. С. 79-94.
8. Ganesh K. Venayagamoorthy. Comparison of Heuristic Dynamic Programming and Dual Heuristic Programming Adaptive Critics for Neurocontrol of a Turbogenerator/ Ganesh K. Venayagamoorthy, Ronald G. Harley, and Donald C. Wunsch // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2012. – Vol. 13, No 3, (pp. 764-773).
9. Raghavendra V. Kulkarni, Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Adaptive critics for dynamic optimization // Neural Networks. 2011. №23. P/ 587-591.
10. Robert F. Stengel, S. Ferrari. Model-based Adaptive Critic Designs. // Learning and Approximate Dynamic Programming, New York, 2014.- P. 64-94.
11. Весела М.А. Підвищення ефективності управління силовою установкою електромобіля з бортовою підзарядкою в умовах експлуатації : дис. на здобуття наукового ступеня кандидата техніч. наук :05.22.20 / ХНАДУ, Харків, 2019. 185 с.
12. Koriashkina L.S., & Deryugin O.V., Fedoriachenko S.O., Cheberiachko S.I., Vesela M.A. (2019). On determining productive capacity of EV traction battery repair area. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, № 5, (pp. 113-121). ISSN 2071-2227.
13. Peng-Yong Kong, & Karagiannidis, K. (2016). Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid: A Survey. IEEE Access Journal, 1-29. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2614689.
14. Vesela M., Tretiak O. (2020). Conditions for effective using and control of the power unit of an electric vehicle with on-board charging. Transport Problems, XII International Conference. Silesian University of Technology Faculty of Transport and Aviation Engineering, (pp. 881-885).
15. Diachenko, G.G., & Aziukovskiy, O.O. (2017). Investigation of the Process Parameters Influence on the Energy Efficiency of an Induction Motor under Model Predictive Control GRAMPC. Mechanics, Materials Science & Engineering, 12, 124-132. ISSN 2412-5954

REFERENCES

1. Bazhinov O.V., Dvadenko V.Ia., Chakim M. (2014). Konversia legkovogo avtomobilia v hibridnii. [Conversion of a car into a hybrid]. Harkiv: HNADU [in Ukrainian].
2. Adams T. (2017). Training an artificial neural network. <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf>.
3. Smirnov O.P., Bazhinova T.O., Veselaya M.A. (2017). Substantiation of Rational Technical & Economic Parameters of Hybrid Car. Automation, Software Development & Engineering. Vol. 1 URL: <http://asdej.xyz/substantiation-of-rational-technical-economic-parameters-of-hybrid-car/> 2017.

4. Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Ronald G. Harley, Donald C. Wunsch. (2013). Implementation of Adaptive Critic-Based Neurocontrollers for Turbogenerators in a Multimachine Power System // IEEE Transactions on Neural Networks. – Vol. 14, No 5. P. 1047-1064.
5. James Larminie, John Lowry. (2013). Electric vehicle technology explained. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, - 296 p.
6. Haikin S. (2016). Neural networks: full course.
7. Chernodub A.N., Dziuba D.A. (2011). Obzor metodov neiroupravlenia [Review of neurocontrol methods] [in Russian]. №2
8. Ganesh K. (2012). Venayagamoorthy. Comparison of Heuristic Dynamic Programming and Dual Heuristic Programming Adaptive Critics for Neurocontrol of a Turbogenerator IEEE Transactions on Neural Networks. 2012. Vol. 13, № 3.
9. Raghavendra V. Kulkarni, Ganesh Kumar. Venayagamoorthy. (2011). Adaptive critics for dynamic optimization // Neural Networks. №23. (pp.587-591).
10. Robert F. Stengel, S. Ferrari. (2014). Model-based Adaptive Critic Designs. New York. (pp. 64-94).
11. Vesela M.A. (2019). Pidvishenya efektyvnosti silovoi ustanovkoi elektromobilya z bortovoi pidzaryadkoi v umovah eksploatatsii [Efficiency of power unit control of an electric vehicle with on-board charging under operating conditions] : *Extended abstract of candidate's thesis*, , Kharkiv, KNAHU [in Ukrainian].
12. Koriashkina L.S., & Deryugin O.V., Fedoriachenko S.O., Cheberiachko S.I., Vesela M.A. (2019). On determining productive capacity of EV traction battery repair area. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, № 5, (pp. 113-121). ISSN 2071-2227.
13. Peng-Yong Kong, & Karagiannidis, K. (2016). Charging Schemes for Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Smart Grid: A Survey. *IEEE Access Journal*, 1-29. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2614689.
14. Vesela M., Tretiak O. (2020). Conditions for effective using and control of the power unit of an electric vehicle with on-board charging. *Transport Problems, XII International Conference. Silesian University of Technology Faculty of Transport and Aviation Engineering*, (pp. 881-885).
15. Diachenko, G.G., & Aziukovskyi, O.O. (2017). Investigation of the Process Parameters Influence on the Energy Efficiency of an Induction Motor under Model Predictive Control GRAMPC. *Mechanics, Materials Science & Engineering*, 12, 124-132. ISSN 2412-5954.

Vesela Mariia¹, Iryna Klymenko², Yuliia Melnikova³

¹Associate Professor, Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho av., 19, Dnipro, 49005, Ukraine

²Associate Professor, Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho av., 19, Dnipro, 49005, Ukraine

³Senior Lecturer, Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho av., 19, Dnipro, 49005, Ukraine

USE OF NEURAL NETWORKS IN ADAPTIVE ELECTRIC CAR CONTROL

To overcome the lack of information about the parameters of the driving cycle of the electric car, neural networks are used, which provide adaptive control that allows you to adapt. electric car to external operating conditions, as well as to compensate for inaccuracies in mathematical models. Use of iterative optimization of parameters allows to adjust optimum work of power plant of the electric car (PEC) in the course of its movement. This method allows you to use a single approach to study different processes, regardless of the parametric features of electric vehicles. To accelerate adaptation, the neurocontroller and neural network model are trained using a reference control model, which is either an optimal strategy or a strategy based on logical rules of choice, obtained by methodical programming for a given driving cycle. Based on the results of the research, an adaptation algorithm is proposed. The expressions given in the article allow to carry out adaptation of the power plant on the basis of hybrid to the current driving cycle on the basis of the concept of training of the neuro-fuzzy controller with reinforcement. The expressions given in the article allow to carry out adaptation of the power plant on the basis of hybrid to the current driving cycle on the basis of the concept of training of the neuro-fuzzy controller with reinforcement. The purpose of training the neuro-fuzzy controller is the formation of such control effects of the power plant, which would reduce the quadratic value of the assessment of the quality of management.

Keywords: neural networks, electric car, electric car power plant, adaptive control, neurocontroller.

Горобченко Олександр¹

¹ Професор кафедри електромеханіки і рухомого складу залізниць Державного університету інфраструктури та технологій, м. Київ, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9868-3852>

*Автор відповідальний за листування: gorobchenko.a.n@gmail.com

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ІНФОРМАТИВНОСТІ ОЗНАК ПОЇЗНОЇ СИТУАЦІЇ ДЛЯ РОБОТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЛОКОМОТИВОМ

Стаття присвячена проблемі впровадження інтелектуальних систем керування на транспорті. Важливим завданням є оцінка інформаційних параметрів роботи систем керування. В існуючих роботах не розглянуто питання визначення одного з основних параметрів функціонування локомотивних систем керування - інформаційна цінність окремих ознак поїзної ситуації. Це не дає можливості визначити порядок обробки сигналів на вході та оцінити їх внесок у прийняття того або іншого керуючого рішення. Причому інформативність є величиною відносною, що виражається в різній інформаційній цінності окремої ознаки для класифікації різних поїзних ситуацій. Також інформативність ознаки може залежати від типу рішучих правил в процедурі класифікації. Якість розпізнавання тієї або іншої поїзної ситуації, в якій знаходиться локомотивна бригада, залежить від якості ознак, що використовуються системою класифікації. Вирішальним критерієм інформативності ознак в задачі розпізнавання образів пропонується величина втрат від помилок. Для визначення кола найбільш інформативних ознак поїзних ситуацій використано метод випадкового пошуку з адаптацією. Результати роботи дають можливість оптимізувати роботу автоматизованих та інтелектуальних систем керування поїздом за рахунок зменшення обсягів обчислень та спрощення їх алгоритму.

Ключові слова: локомотив, інформаційна ознака, інтелектуальна система, керування, поїзна ситуація, керування поїздом.

Вступ. Використання інтелектуальних систем керування в транспортній галузі є одним з перспективних завдань, що дозволить значно скоротити ризики негативного впливу людського фактору на безпеку та якість перевезень. Інтелектуалізація процесу керування потребує проведення додаткових досліджень за такими напрямками: розробка оптимізованих структур баз знань; удосконалення систем збирання поточної інформації та дистанційної передачі сигналів та даних [1]; визначення параметрів та обсягів інформаційних потоків, що обробляються системою керування; вдосконалення систем розпізнавання поточних транспортних ситуацій з визначенням найбільш небезпечних умов експлуатації та розробки алгоритмів виходу з них, і таке інше. Основним об'єктом, з яким працює інтелектуальна система керування, є інформаційний потік. Від його обсягу та якісних параметрів залежить обґрунтованість та своєчасність прийняття керуючих рішень, що безпосередньо впливає на безпеку руху та економічні показники перевізного процесу. Розмаїтість експлуатаційних умов, під якими звичайно розуміють вагу і довжину поїзда, його опір руху, порядок пропуску поїзда по перегонах, погодні умови, установлені попередженнями обмеження швидкості руху та ін., ставить перед машиністом у кожній поїзді завдання вибору і реалізації раціонального режиму ведення поїзда, що відповідає саме даним умовам [2]. Таким чином ці експлуатаційні умови необхідно постійно відстежувати, класифікувати та надавати їм належну оцінку перед використанням в системах керування.

Аналіз останніх досліджень. Підходи до обробки технічної інформації, отриманої в автоматичному режимі в теперішній час достатньо розроблені. В [3] розглянуто проблеми підвищення точності параметрів, що вимірюються, у великомасштабних інформаційних системах управління. Показано, що використання додаткових каналів виміру та додаткових непрямих показників дозволяє підвищити точність вимірюваних значень та оцінок параметрів математичних моделей досліджуваної системи. Використання додаткових непрямих індикаторів дозволяє зменшити розмір системи та кількість вимірювального обладнання, не знижуючи точності вимірюваних параметрів та техніко-економічних показників. В роботі [4] застосовано теорія нечітких множин та нова методологія обробки інформації при визначенні надійності та безпеки складних систем керування. В роботі [5] Представлено структуру інформаційно-логічної моделі та наведено характеристику засобів і методів збору та обробки даних при оцінці функціональної надійності оператора авіаційних ергатичних систем управління.

Але у вказаних роботах не розглянуто питання визначення одного з основних параметрів інформації – інформаційна цінність окремих ознак. В цих роботах всі канали інформації, що надходять до систем керування, вважаються рівнозначними та підходи до обробки інформації з кожного з них є однаковими. Це дещо знижує якість подальшого використання вхідних даних та збільшує час на обробку вхідної інформації за рахунок послідовного розгляду всіх сигналів, в незалежності від поточного стану транспортного засобу та умов його експлуатації.

Роботи з визначення цінності інформації [6-9] дозволяють формалізувати параметр обсягу та важливості інформації. Це є підставою для визначення даних, що потребують першочергової обробки. Але при наявності сотен каналів, по яких інформація надається до системи керування поїздом, необхідно розробити удосконалену методологію, за якою буду виконано ранжування отриманих сигналів та їх внесок у прийняте рішення з керування локомотивом [10].

Мета дослідження. Якість розпізнавання тієї або іншої поїзної ситуації, в якій знаходиться локомотивна бригада, залежить від якості ознак, що використовуються системою класифікації. Основною характеристикою ознаки є її інформативність. Причому інформативність є величиною відносною, що виражається в різній інформаційній цінності окремої ознаки для класифікації різних поїзних ситуацій. Також інформативність ознаки може залежати від типу рішальних правил в процедурі класифікації.

Сучасні локомотиви обладнані потужними системами діагностики, контролю поточних параметрів руху та вхідних сигналів. Тому в розпорядженні систем розпізнавання образів поїзних ситуацій знаходиться множина ознак, що може налічувати декілька сот членів. Використання всієї сукупності ознак може бути недоцільне з наступних причин. Кожна ознака потребує окремого інформаційного каналу для її контролю, що ускладнює інтерфейсну частину системи, що розробляється, та призводить до її здороження. Другий фактор – це використання обчислювальних ресурсів бортової ЕОМ, які на даний момент є хоч і достатньо потужними, але на локомотивів бажано мати максимальну швидкість роботи системи, що неможливо при обробці і аналізі такого широкого спектру даних. Таким чином завдання оцінки та вибору інформативних ознак при розпізнаванні поїзних ситуацій є актуальним та дозволить підвищити ефективність локомотивної системи розпізнавання образів.

Параметри, що визначають умови руху поїзда, змінюються в результаті дії багатьох факторів. Деякі з них взаємозалежні, окремі є незалежними, але їхній вплив може викликати зміну в широких межах параметрів, що визначають характер руху поїзда. Все це значно ускладнює регулювання потужності локомотива й вибір раціонального режиму ведення поїзда, вимагає від машиністів специфічних професійних навичок, обумовлених теоретичною підготовкою і певним практичним досвідом.

Вибір інформативного набору ознак для розпізнавання поїзних ситуацій. Попередній склад ознак задається неформалізованим шляхом, на основі досвіду та особистих переваг спеціаліста. Формальні методи застосовуються до навчаючої вибірки A для перевірки цієї вихідної системи на достатність і необхідність. Серед усіх можливих систем ознак достатньою вважаємо систему, яка при заданих S і D забезпечує витрати N , що не перевищують певного

порогу N_0 . Під витратами N тут розуміється вартість вимірювання ознак (N_x) і вартість втрат, викликаних помилками розпізнавання (N_r):

$$N = N_x + N_r. \quad (1)$$

Необхідною є достатня система мінімальної складності (вартості). Так що фактично на навчальній вибірці A вирішується переборне завдання типу

$$\beta = \arg \min_{\beta \in B} N(X_\beta) / C, D, A, N_0, \quad (2)$$

де $C = \langle c_1, c_2, \dots, c_k \rangle$ – перелік поїзних ситуацій, що розглядається

D – тип рішальної функції;

B – множина всіх можливих систем ознак;

X – інформативна множина описуючих ознак;

N – витрати;

N_0 – порогове значення витрат.

Ця задача одночасної мінімізації N_x і N_r вперше була сформульована в [11]. Витрати на вимірювання залежать від того, скільки і яких ознак потрібно вимірювати і яке число розрядів потрібно для представлення результатів вимірювань. Зі зрозумілих причин основна увага приділяється зменшенню кількості вимірюваних ознак, тобто пошуку інформативної підсистеми з n ознак (X_n) серед g ознак вихідної системи (X_g).

Визначення інформативності окремих ознак. Вирішальним критерієм інформативності ознак в задачі розпізнавання образів пропонується величина втрат від помилок R . Навіть якщо розподіли генеральної сукупності відомі, обчислення втрат пов'язано з дуже великими витратами машинного часу. У зв'язку з цим робляться спроби знайти критерії, більш просто обчислювані і разом з тим жорстко корелюючі з оцінкою втрат R .

Якщо розподіл реалізацій кожного образу підпорядковується нормальному закону з діагональними матрицями коваріацій (при цьому поверхні рівної щільності являють собою сфери однакового радіуса), то мірою труднощі розпізнавання D , назад пропорційної очікуваних втрат, може служити середнє значення евклідової відстані між математичними очікуваннями всіх пар образів [12]:

$$D = (1/C_k^2) \sum_{i,j=1}^k \rho(ij), \quad (3)$$

де $\rho(ij)$ – евклідова відстань між математичними очікуваннями i -го та j -го образів.

В термінах теорії інформації мірою труднощі розпізнавання служить ентропія H розподілів щільності ймовірності образів. Нехай розподіли образів k спроектовані на одну вісь x , що вимірюється з точністю t до градацій (рис. 1). Ймовірність попадання реалізацій i -го образу j -ю градацією дорівнює $P(j/i)$. Підсумувавши для j -ї градації ймовірності всіх образів, ми отримуємо величину $H_x = \sum_{j=1}^t H_j P_j$. Внесок i -го образу в цю суму, так що ентропія j -ї градації виражається таким значенням

$$H_j = -(r_1 \log r_1 + r_2 \log r_2 + \dots + r_i \log r_i + \dots + r_k \log r_k). \quad (4)$$

З принципу адитивності ентропії випливає, що загальна невизначеність при розпізнаванні образів за ознакою x має вигляд $H_x = \sum_{j=1}^t H_j P_j$. Якщо початкова невизначеність ситуації дорівнювала $\log k$, то кількість інформації I_x , одержуваної в результаті вимірювання ознаки x , дорівнює $H_0 - H_x$.

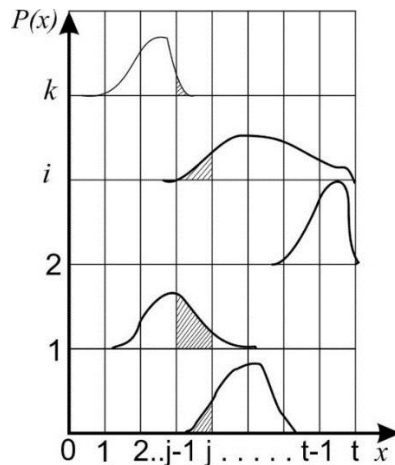


Рис. 1. Розподіл образів

При визначенні поїзної ситуації немає можливості отримати закони розподілів образів. Це пов'язано з невеликим обсягом статистичних даних, які можна достовірно отримати під час руху. У цих умовах доцільно використовувати методи, які не вимагають побудови моделей розподілу і спираються на конкретні об'єкти, наявні в навчальній вибірці. За цими прецедентами будується вирішальна функція (наприклад, правило k найближчих сусідів), розпізнається контрольна послідовність, і за кількістю отриманих помилок виноситься оцінка інформативності окремої ознаки або їх системи.

Можливі й інші способи оцінки інформативності. Гіпотеза компактності дає нам основу для оцінки інформативності простору ознак через прояв характеристик компактності. З неї випливає, що для хорошого розпізнавання образів бажано, щоб відстані між своїми точками кожного образу були малими, а відстані до точок інших образів по можливості великими. А якщо опуклі оболонки різних образів накладаються одна на одну, то бажано, щоб вони якомога більше відрізнялися за своїми розмірами. Компактність (щільність) W_i образу i , представленого в навчальній вибірці m_i точками $1, 2, \dots, t, \dots, 1, \dots, m_i$, можна характеризувати середньою довжиною ребер поєднуючого їх повного графа:

$$W_i = (1/C_{m_i}^2) \sum_{t,l=1}^{m_i} r(t,l). \quad (5)$$

Також компактність W_j точок $1, 2, \dots, s, \dots, v, \dots, m_j$, що представляють образ j , має вигляд

$$W_j = (1/C_{m_j}^2) \sum_{s,v=1}^{m_j} r(s,v). \quad (6)$$

Рознесеність образів у просторі характеристик можна оцінювати через середню відстань між усіма парами точок з різних образів:

$$W(i,j) = (1/m_i m_j) \sum r(t,s) \text{ для } t = 1 \div m_i, s = 1 \div m_j \quad (7)$$

На підставі сказаного інформативність простору ознак тим більше, чим більше величина

$$J = W(i,j)/(W_i + W_j). \quad (8)$$

Оцінку інформативності ознак поїзної ситуації можна отримати і безпосередньо в процесі побудови вирішального правила у вигляді дерева дихотомічних поділів вибірки за окремими ознаками [13]. Припустимо, що є можливість розділити ознаку X тільки на дві градації: $x \leq l$ і $x > l$. Подивимося склад реалізацій, що потрапили в ці градації. Якщо в першій градації виявиться m_{il} реалізацій i -го образу і m_{vl} реалізацій v -го образу,

то неоднорідність складу цієї градації можна оцінити величиною

$$R_1 = \sum_{\substack{i=1 \\ v=i+1}}^k m_{ii} m_{vl}, \quad (9)$$

то зменшення невизначеності після отримання інформації від ознаки x , тобто інформативність ознаки x , можна оцінити величиною $J_x = (R_0 - R') / R_0$. Якщо $R' = 0$, то інформативність ознаки J_x буде максимальною і дорівнювати одиниці. Якщо R' не зменшило початкової невизначеності, то $J_x = 0$ й ознака x природно вважати неінформативним.

Якщо відомо, що ознаки не залежать одна від одної, то можна з допомогою одного з описаних методів оцінити інформативність всіх g ознак вихідної системи і потім вибрати з них n найбільш інформативних. Але в реальних таблицях даних залежність між ознаками спостерігається дуже часто. А якщо ознаки залежні, то при виборі найбільш інформативною підсистеми оцінками їх індивідуальної інформативності керуватися не можна.

Складність використання наведеного підходу полягає в отриманні дуже великої кількості комбінацій для умов роботи локомотивної бригади, що приблизно складає більше 10^{22} . Виконання перебору цих комбінацій займе роки при поточній потужності обчислювальних засобів. Тому необхідно розробити алгоритм оцінювання інформативності ознак, прийнятний для реалізації на рухомому складі.

Серед алгоритмів, що здобули найбільшу розповсюдженість [14,15], можна виділити метод послідовного скорочення (алгоритм Del), метод послідовного додавання ознак (алгоритм Add), метод випадкового пошуку з адаптацією (алгоритм ВПА).

Алгоритм Del полягає в такому:

1. Виконується оцінка похибки розпізнавання при використанні всіх W ознак.
2. Виключається з системи перша ознака і знаходиться помилка, яку дають решта $(W-1)$ ознак.
3. Перша ознака повертається в вихідні дані, а друга виключається і знаходиться помилка в новому $(W-1)$ -мірному просторі.
4. Цю операцію почергового виключення однієї ознаки проводять W разів. Серед отриманих величин визначають саму малу. Вона вкаже на ознаку, виключення якої з системи було найменш відчутним.
5. Виключають цю ознаку з системи і приступають до випробування $W-1$ ознак, що залишились. Їх почергове виключення з системи дозволить знайти найбільш інформативну і знизити розмірність простору до $W-2$. Ці процедури повторюються стільки раз, поки в системі не залишиться задане число ознак.

Алгоритм Add відрізняється від попереднього лише тим, що порядок перевірки підсистем ознак починається не з W -мірного простору, а з одновимірних просторів. Спочатку всі W ознак перевіряються на інформативність. Для цього робиться розпізнавання контрольної послідовності по кожній з ознак окремо і в інформаційну підсистему включається ознака, що дала найменше число помилок. Потім до неї по черзі додаються всі ознаки по одній. Отримані двовимірні підпростори оцінюються за кількістю помилок розпізнавання. Вибирається найбільш інформативна пара ознак. До неї таким же шляхом підбирається найкраща третя ознака з тих, що залишились, і так продовжується до отримання системи з потрібною кількістю ознак.

Трудомісткість цього алгоритму приблизно така ж, як і алгоритму Del, однак результати, одержувані алгоритмом Add, зазвичай краще, ніж у Del. Пояснюється цей факт впливом малої показності навчальної вибірки: при одному і тому ж обсязі вибірки чим вище розмірність простору ознак, тим менше обґрунтованість одержуваних статистичних висновків (у нашому випадку – оцінки інформативності).

Обидва описаних алгоритму дають оптимальне рішення на кожному кроці, але це не забезпечує глобального оптимуму. Для ослаблення впливу помилок на перших кроках алгоритму застосовується релаксаційний метод. В алгоритмі Add набирається певна кількість інформативних ознак і потім частина з них виключається методом Del. Можлива і зворотна стратегія: спочатку працює алгоритм Del, після скорочення вихідної системи на декілька ознак включається алгоритм

Add, який повертає в систему помилково виключені з неї ознаки. Повторення цих процедур (алгоритм DelAdd) продовжується до отримання системи з найбільш інформативних ознак. В [16] вказано, що аналіз наведених методів дозволяє зробити висновок про перевагу алгоритму ВПА над алгоритмами Add, Del та DelAdd.

Використання методу випадкового пошуку з адаптацією для визначення кола найбільш інформативних ознак поїзних ситуацій. Перш за все визначається перелік поїзних ситуацій, що підлягають розпізнаванню при керуванні поїздом. Для різних видів руху (вантажний рух, швидкісний рух, станційна робота локомотива, тощо) він може відрізнятися. Далі необхідно отримати множину W ознак поїзної ситуації. Вона будується на основі даних, що доступні бортовій системі діагностики локомотива та машиністу під час поїздки. В результаті аналізу інформаційних потоків, що виникають при керуванні поїздом, отримана множина ознак, що складається з таких членів:

- w_1 – швидкість руху;
- w_2 – відстань до сигналу;
- w_3 – значення сигналу попереду;
- w_4 – маса поїзду;
- w_5 – положення контролеру машиніста;
- w_6 – положення гальмівного крану машиніста;
- w_7 – тиск в гальмівній магістралі поїзду;
- w_8 – поточний профіль колії;
- w_9 – наступний профіль колії;
- w_{10} – сигнал буксування;
- w_{11} – вільність колії попереду;
- w_{12} – прослідкування станції (або роз'їзду);
- w_{13} – струм навантаження тягових електродвигунів;
- w_{14} – поточне значення обмеження швидкості;
- w_{15} – різниця між поточним та графіковим часом слідування;
- w_{16} – загальна оцінка стану екіпажної частини локомотива;
- w_{17} – загальна оцінка стану системи передачі потужності локомотива;
- w_{18} – психофізіологічні характеристики локомотивної бригади;
- w_{19} – час доби;
- w_{20} – час від початку роботи локомотивної бригади;
- w_{21} – метеорологічні умови;
- w_{22} – загальна оцінка стану гальм поїзду (за даними пробних гальмувань);
- w_{23} – наявність в поїзді особливих та розрядних вантажів, а також людських вагонів;
- w_{24} – відхилення витрати енергоресурсів на тягу від норми;
- w_{25} – оперативний план роботи локомотивної бригади.

Кожна ознака нормалізується за відомими алгоритмами в залежності від того, якого типу величина – якісна або кількісна. В результаті на вхід системи розпізнавання подаються нормалізовані сигнали, що знаходяться в інтервалі від 0 до 1.

Розіб'ємо умовний відрізок (0-1) на W однакових ділянок і зіставимо кожну ділянку зі своєю ознакою: 1-ша ділянка відповідає першій ознаці, 2-га – другій і т. д. Кожна ділянка має ширину $1/W$ (рис. 2).

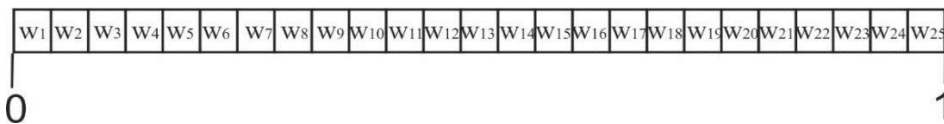


Рис. 2. Початковий розподіл ділянок, що відповідають ознакам поїзних ситуацій

Другим етапом у випадковому порядку обирається низка значень в одиничному інтервалі. Ті ділянки, в які потрапили ці випадкові значення, використовуються для визначення образу поїзної ситуації. Якість цієї випадково обраної підсистеми оцінюється за одним з критеріїв,

наприклад, за кількістю одержуваних помилок розпізнавання α_i .

Описана процедура випадкового вибору підсистем ознак і оцінки їх якості повторюється k раз. Розгляд отриманого списку оцінок $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_k$, дозволяє вибрати найкращу і найгіршу з підсистем. На цій підставі робиться процедура «заохочення» і «покарання»: ділянки, відповідні ознакам, які потрапили в найкращу підсистему, заохочуються шляхом розширення їх меж на величину h , а ділянки, відповідні ознаками з самої неінформативної підсистеми, караються тим, що їх ширина зменшується на величину h , при чому $h < 1/W$. Сумарна довжина всіх ділянок так і залишається рівною одиниці. Отримаємо деякий новий розподіл ділянок ознак поїзних ситуацій (рис. 3).

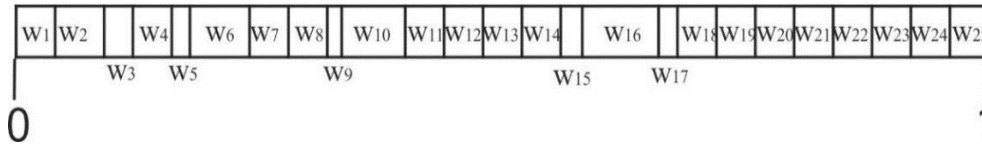


Рис. 3. Розподіл ділянок, що відповідають ознакам поїзних ситуацій, після процедури «заохочення-покарання»

З рис. 3 видно, що ознаки $w_3, w_5, w_9, w_{15}, w_{17} \in$ «покараними», тобто вони найгірше вплинули на якість розпізнавання образу ситуації.

Після цього випадковим чином вибираються і випробовуються нові підсистеми. Але тепер ймовірність попадання ознак у ці підсистеми не однакова: заохочені ознаки, представлені більш широкими смужками, мають більше шансів увійти в чергову підсистему, ніж покарані. За результатами випробування цієї партії підсистем процедура адаптації (покарання та заохочення) повторюється. Якщо певна ознака випадково потрапляє і в найкращу і найгіршу підсистеми, то довжина її ділянки залишається незмінною. Якщо ж вона регулярно опиняється у складі самої інформативної підсистеми, то довжина його ділянки зростає з кожним кроком адаптації. Також ознака, що систематично потрапляє в саму неінформативну підсистему, з кожним кроком скорочує довжину своєї ділянки і тим самим зменшує ймовірність включення в випробуванні підмножини ознак.

Після певної кількості циклів пошуку та адаптації процес стабілізується: ділянки ознак, що мають найбільшу інформативність, займають практично весь відрізок (0-1) і випробувану підсистему вибираються одні й ті ж ознаки. Цей факт служить сигналом до закінчення процесу вибору підсистеми найбільш інформативних ознак.

Для реалізації описаного методу визначення інформативності окремих ознак ведення поїзду було розроблено комп'ютерну програму. До вхідних даних цієї програми було занесено всі двадцять п'ять ознак керування поїздом, що наведені вище. Алгоритм роботи програми передбачає декілька десятків ітерацій. Критерієм зупинки роботи програми є досягнення однією з ознак мінімальної імовірності попадання в підсистему оцінки поточної поїзної ситуації, тобто досягнення максимальної величини «покарання».

Висновки. Якість розпізнавання тієї або іншої поїзної ситуації, в якій знаходиться локомотивна бригада, залежить від якості ознак, що використовуються системою класифікації. Вирішальним критерієм інформативності ознак в задачі розпізнавання образів пропонується величина втрат від помилок. Для визначення кола найбільш інформативних ознак поїзних ситуацій використано метод випадкового пошуку з адаптацією. В результаті аналізу інформаційних потоків, що виникають при керуванні поїздом, отримана множина ознак, що складається з 25 членів (w_1 – швидкість руху; w_2 – відстань до сигналу; w_3 – значення сигналу попереду; w_4 – маса поїзду; w_5 – положення контролеру машиніста т. д.). Після певної кількості циклів пошуку та адаптації процес стабілізується: ділянки ознак, що мають найбільшу інформативність, займають практично весь відрізок (0-1) і випробувану підсистему вибираються одні й ті ж ознаки. Цей факт служить сигналом до закінчення процесу вибору підсистеми найбільш інформативних ознак.

Результатом використання методу випадкового пошуку з адаптацією є отримання найбільш інформативних ознак поїзної ситуації, та відсікання найменш інформативних за розробленим критерієм. Це дає можливість оптимізувати роботу автоматизованих та інтелектуальних систем керування поїздом за рахунок зменшення обсягів обчислень та спрощення їх алгоритму.

ЛІТЕРАТУРА

1. T. Wen, G. Xie, Y. Cao and B. Cai, "A DNN-Based Channel Model for Network Planning in Train Control Systems," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, doi: 10.1109/TITS.2021.3093025.
2. Горобченко О., Неведров, О., Незліна, О., Ткаченко, В. Розробка методу кластеризації поїзних ситуацій. Транспортні системи і технології, 2021, (37), 187-195. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-18>
3. I. S. Durgaryan, A. F. Pashchenko, Y. S. Rodomanova, H. H. Do and T. A. Pham, "Improving the Accuracy of Measuring and Evaluation of Parameters of Large-scale Information Control Systems," 2018 Eleventh International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/MLSD.2018.8551781.
4. L. S. Zvyagin, "Process of information processing when realizing the concept of "soft" measurements," 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 2017, pp. 70-73, doi: 10.1109/SCM.2017.7970498.
5. A. V. Bogomolov, G. A. Sviridyuk, A. V. Keller, V. N. Zinkin and M. D. Alekhin, "Information-logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator," 2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO), 2018, pp. 106-110, doi: 10.1109/ERGO.2018.8443849.
6. Rothery, C., Strong, M., Koffijberg, H. E., Basu, A., Ghabri, S., Knies, S., ... & Fenwick, E. Value of information analytical methods: report 2 of the ISPOR value of information analysis emerging good practices task force. Value in health, 2020, 23(3), 277-286.
7. Ayan, O., Vilgelm, M., Klügel, M., Hirche, S., & Kellerer, W. (2019, April). Age-of-information vs. value-of-information scheduling for cellular networked control systems. In Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, 2019, pp. 109-117.
8. Viet, N. Q., Behdani, B., & Bloemhof, J. The value of information in supply chain decisions: A review of the literature and research agenda. Computers & Industrial Engineering, 2018 120, 68-82.,
9. Kuric, I., Gorobchenko, O., Litikova, O., Gritsuk, I., Mateichyk, V., Bulgakov, M., & Klackova, I. Research of vehicle control informative functioning capacity. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020 , 776(1) doi:10.1088/1757-899X/776/1/012036.
10. Бабанін, О. Б., Горобченко, О. М. Визначення цільової функції для оптимізації процесу керування в ергатичній системі Машиніст–СППР–Поїзд на підставі критерію корисності. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології, 2014, (25), с. 92-98.
11. King-Sun Fu The Optimal sequential decisions. Lafayette: Purdue Univ. Press, 1967.
12. Загоруйко, Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Издательство: Институт математики, 1999, 270 с. ISBN:5-86134-060-9.
13. Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis, 2009, (Vol. 344). John Wiley & Sons.
14. Alpaydin, E. Introduction to machine learning. MIT press., 2020.
15. Minelli, M., Chambers, M., & Dhiraj, A. (2013). Big data, big analytics: emerging business intelligence and analytic trends for today's businesses., John Wiley & Sons., 2013, Vol. 578
16. Загоруйко Н.Г. Когнитивный анализ данных. Новосибирск: Академическое издательство ГЕО, 2013, 186 с

REFERENCES

1. T. Wen, G. Xie, Y. Cao and B. Cai, "A DNN-Based Channel Model for Network Planning in Train Control Systems," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, doi: 10.1109/TITS.2021.3093025.
2. Gorobchenko, O., Nevedrov, O., Nezlina, O., & Tkachenko, V. (2021). Development of a method for clustering train situations. Transport systems and technologies, (37), 187-195. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-18>
3. I. S. Durgaryan, A. F. Pashchenko, Y. S. Rodomanova, H. H. Do and T. A. Pham, (2018) "Improving the Accuracy of Measuring and Evaluation of Parameters of Large-scale Information Control Systems," 2018 Eleventh International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/MLSD.2018.8551781.
4. L. S. Zvyagin, (2017) "Process of information processing when realizing the concept of "soft" measurements," 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 70-73, doi: 10.1109/SCM.2017.7970498.
5. A. V. Bogomolov, G. A. Sviridyuk, A. V. Keller, V. N. Zinkin and M. D. Alekhin. (2018) "Information-logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator," 2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO), 106-110, doi: 10.1109/ERGO.2018.8443849.

6. Rothery, C., Strong, M., Koffijberg, H. E., Basu, A., Ghabri, S., Knies, S., ... & Fenwick, E. (2020). Value of information analytical methods: report 2 of the ISPOR value of information analysis emerging good practices task force. *Value in health*, 23(3), 277-286.
7. Ayan, O., Vilgelm, M., Klügel, M., Hirche, S., & Kellerer, W. (2019, April). Age-of-information vs. value-of-information scheduling for cellular networked control systems. In *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems* (pp. 109-117).
8. Viet, N. Q., Behdani, B., & Bloemhof, J. (2018). The value of information in supply chain decisions: A review of the literature and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 68-82.,
9. Kuric, I., Gorobchenko, O., Litikova, O., Gritsuk, I., Mateichyk, V., Bulgakov, M., & Klackova, I. (2020). Research of vehicle control informative functioning capacity. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, , 776(1) doi:10.1088/1757-899X/776/1/012036.
10. Babanin, O., Gorobchenko, O. (2014). Determination of the objective function for optimization of the control process in the ergatic system Machinist – DSS – Train on the basis of the utility criterion. *Collection of scientific works of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Transport systems and technologies*, (25), p. 92-98.
11. King-Sun Fu (1967) *The Optimal sequential decisions*. Lafayette: Purdue Univ. Press, 1967.
12. Zagoruiko, N.G. (1999). *Applied methods of data and knowledge analysis*. Publisher: Institute of Mathematics. 270 p. ISBN:5-86134-060-9.
13. Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (2009). *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis* (Vol. 344). John Wiley & Sons.
14. Alpaydin, E. (2020). *Introduction to machine learning*. MIT press.
15. Minelli, M., Chambers, M., & Dhiraj, A. (2013). *Big data, big analytics: emerging business intelligence and analytic trends for today's businesses* (Vol. 578). John Wiley & Sons.
16. Zagoruiko N.G (2013). *Cognitive data analysis*. Novosibirsk: Academic publishing house GEO ., 186 p.

Oleksandr Gorobchenko¹

¹ 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>

THEORETICAL FUNDAMENTALS OF ESTIMATABILITY ASSESSMENT OF TRAIN SITUATION SIGNS FOR WORK OF INTELLECTUAL LOCOMOTIVE CONTROL SYSTEMS

The article is devoted to the problem of implementation of intelligent control systems in transport. An important task is to assess the information parameters of the control systems. In the existing works the question of definition of one of the basic parameters of functioning of locomotive control systems - information value of separate signs of a train situation is not considered. This does not make it possible to determine the order of signal processing at the input and assess their contribution to the adoption of a control decision. Moreover, informativeness is a relative value, which is expressed in the different information value of a particular feature for the classification of different train situations. Also, the informativeness of the feature may depend on the type of decisive rules in the classification procedure. The quality of recognition of a train situation in which the locomotive crew is, depends on the quality of the features used by the classification system. The decisive criterion for the informativeness of the features in the problem of pattern recognition is the magnitude of losses from errors. To determine the range of the most informative features of train situations, the method of random search with adaptation was used. The results of the work make it possible to optimize the operation of automated and intelligent train control systems by reducing the amount of calculations and simplifying their algorithm.

Keywords: locomotive, information sign, intelligent system, management, train situation, train management.

Ivan Kulbovskiy¹, Halyna Holub², Snezhina Andonova³, Inna Saiapina⁴, Mykola Tkachuk⁵

¹Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5329-3842>

²Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

³ Faculty of Engineering, South-West University "Neofit Rilski", Blagoevgrad, 2700, Bulgaria. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0818-9947>

⁴Department of Artificial Intelligence and Telecommunication Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

⁵Service of signaling and communication of the Russian Federation "South-Western Railway" JSC "Ukrzaliznytsia", st. Lysenko, 6, Kyiv, 01054, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9683-4303>

* **Corresponding author:** golub_gm@suite.duit.edu.ua

MODEL AND METHODS OF MANAGEMENT OF EFFICIENCY OF USE OF PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL POTENTIAL OF ROLLING STOCK OF RAIL TRANSPORT

The article considers the problems management of efficiency of use of production and technological potential of rolling stock of rail transport. It is investigated that to improve the efficiency of functioning requires a comprehensive solution of many problems, with the rational use of labor, material and labor resources.

A set of many tasks aimed at improving and ensuring the level of efficiency of rail transport facilities and systems is considered.

It is investigated that in order to achieve the required level of efficiency of rolling stock operation it is necessary to improve the management process by system model of the set of problems of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport. As a result of solving the problem a mathematical model of the set of problems was proposed, which became the basis for building a system model of the set of problems. The decomposition method and AllFusion Process Modeler software were used to build the system model.

The paper considers the task of ensuring the required level of efficiency in the use of production and technological potential of rolling stock and the proposed ways to solve it. There is also a comprehensive review of objects, systems and processes, which involves their identification, providing a formalized description. On the basis of which a model and method of diagnosis were proposed, which in open the possibility of interaction between the management of the subsystem of diagnostics and planning of work of objects and systems of rolling stock on the basis of the actual technical condition. The solution in this way will increase the indicators of the main aspects of production and technological potential, which is the purpose of this work.

Keywords: *diagnostic method, model, decomposition, system analysis, system, production and technological potential.*

Introduction. The main laws of construction, operation, development and adaptation of production and technological potential of rolling stock should be based on the principle of functional unity of their

objects and systems, which are described in the following sequence, taking into account the system patterns and sequence:

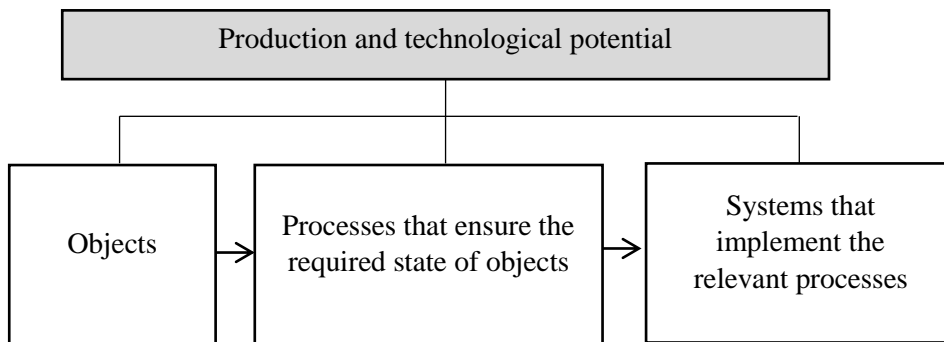


Fig. 1. Components of production and technological potential

The efficiency of production and technological potential largely depends on the complex solution of many Q_{ik} problems, which are focused on achieving high end results of rail transport with the rational use of labor, material and financial resources [1, 5].

The set of Q_{ik} tasks is a necessary condition for the functioning and ensuring the required level of efficiency and quality of work of rolling stock. Many Q_{ik} tasks are formed taking into account the organizational, technological, technical, economic and social aspects of rail transport.

Organizational aspects of work include the level of organization of labor and production.

Technological aspects necessitate the search for new technological solutions for production processes in order to intensify the use of production and technological potential of rolling stock.

Technical aspects characterize the technical equipment of production processes, as well as technical performance of facilities and systems of rail transport.

Economic aspects characterize the efficiency of use in the work and production of all types of resources and the ultimate effectiveness of the functioning of systems and facilities of rail transport.

The set of Q_{ik} tasks that is necessary to ensure the required level of efficiency of the rolling stock rolling stock must comprehensively take into account all aspects of its work.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to study the methods and models of management of the efficiency of use of production and technological potential of rolling stock for rail transport for improving the indicators of the main aspects of production and technological potential.

Objectives of the study: 1. Analyze problems management of efficiency of use of production and technological potential of rolling stock of rail transport. 2. Investigate many tasks aimed at improving and ensuring the level of efficiency of facilities and systems of rail transport. 3. Analyze comprehensive consideration of objects, systems and processes, which provides for their identification and provides a formalized description. 4. Develop a model tasks of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport. 5. Suggest methods that in open the possibility of interaction between the management of the subsystem of diagnostics and planning of facilities and systems of rolling stock.

Materials and methods of research. To study the effectiveness of the use of production and technological potential the work of rail transport needs to streamline many tasks Q_{ik} in accordance with the tasks and objectives set before the operation of rail rolling stock. For this purpose it is necessary to divide by the method of decomposition of the system analysis into two subsets and to present system model of set of problems of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport [2-5]:

$$Q_{ik} = Q_{ik} \{Q_{ik}^1, Q_{ik}^2\} \rightarrow Q_{ik}^1 \cup Q_{ik}^2 = Q_{ik}, \quad (1)$$

where Q_{ik}^1 – a subset of tasks, the solution of which ensures the achievement of the required level of quality of production processes due to the efficiency of the rolling stock of rail transport;

Q_{ik}^2 – a subset of tasks, the solution of which ensures the rational use of resources;

I – types of resources $i = 1, 2, \dots, I$ used to solve new optimization problems;

k – stages of the life cycle of rail rolling stock $k = 1, 2, \dots, K$.

Also, the main aspects that affect the efficiency of the use of production and technological potential were investigated and analyzed, as a result of which many tasks were identified [4, 7]. On the basis of which the system model of problems of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport by a method of decomposition by means of the AllFusion Process Modeler software is presented. The model is modeled with functional diagrams, which are based on the IDEF0 standard and presented in the form of a context diagram (Fig. 2) and in the form of a decomposition diagram and descriptions (Fig. 3).

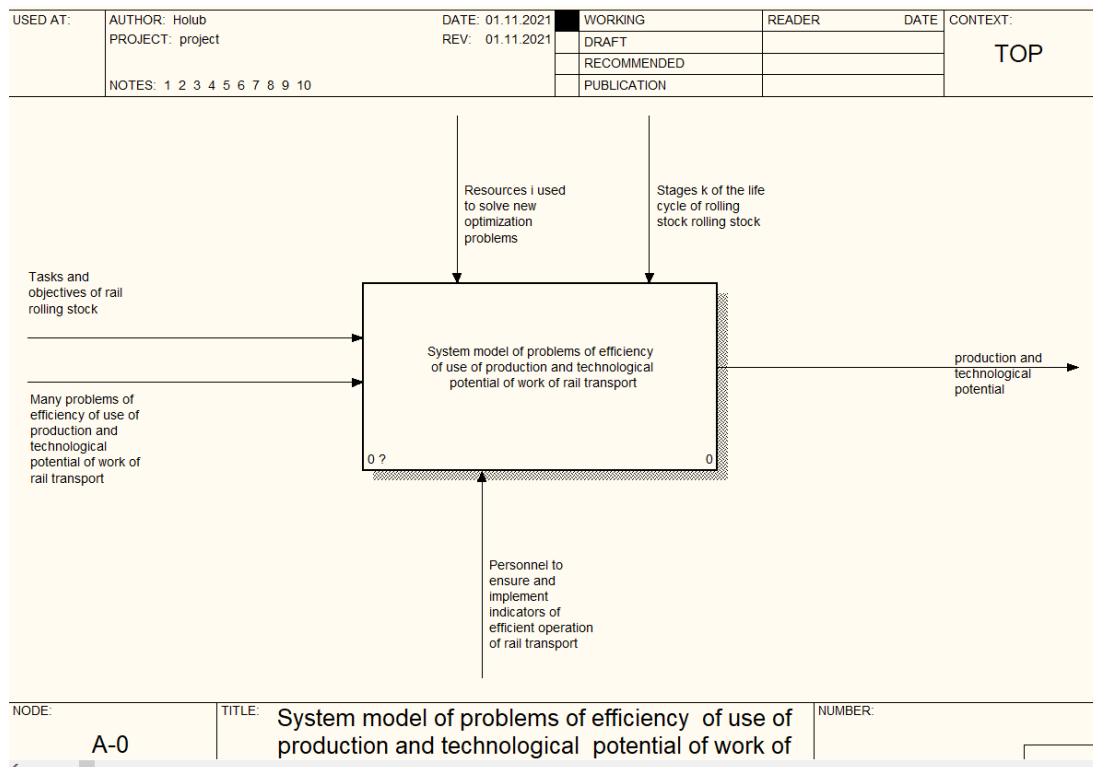


Fig. 2. System model of problems of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport by means of the context diagram

The main criteria for the systematic solution of many problems Q_{ik} the quality and efficiency of the operation of the rolling stock of rail transport, taking into account all aspects of its activities. Criteria are formed on the basis of the formula of system analysis: $\langle \text{quality} \rangle \leftrightarrow \langle \text{efficiency} \rangle$.

Many tasks are formed on the basis of system criteria Q_{ik} , which provide optimization of the relevant processes [6] and the final results of the operation of facilities and systems of rail transport.

The problem of ensuring the required level of efficiency in the use of production and technological potential of rolling stock was considered.

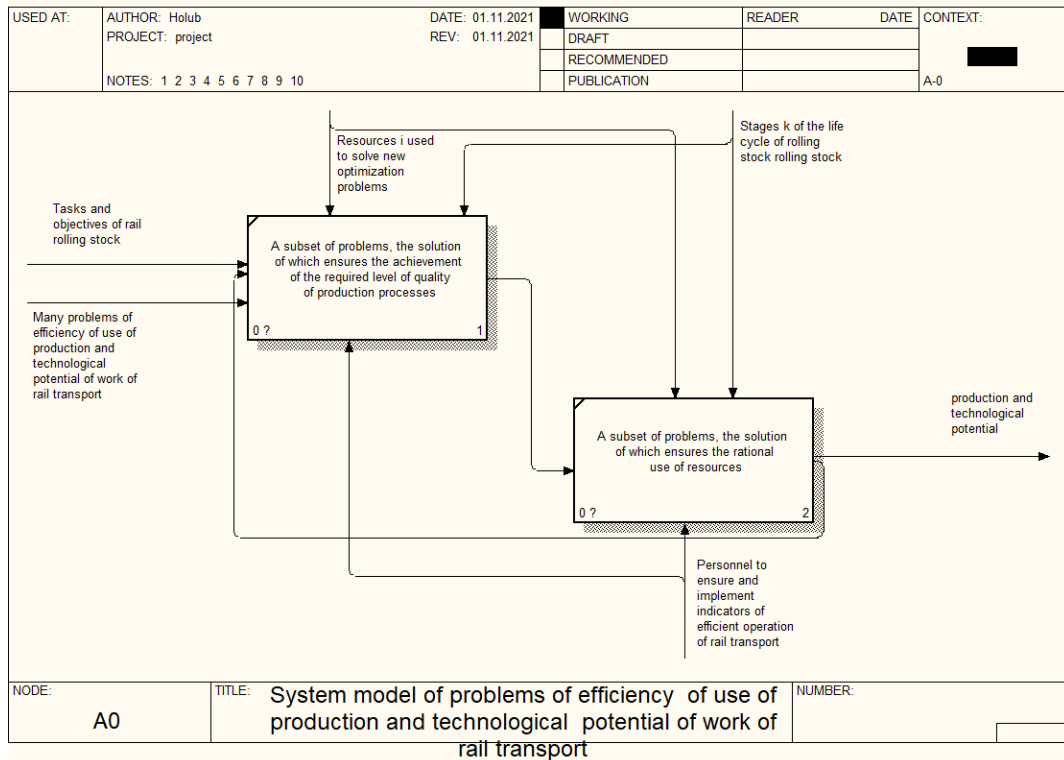


Fig. 3. System model of problems of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport by means of the diagram of decomposition and the description

The main purpose of operation is presented in the form of a mathematical model:

$$\max_{U_i \in U} \Pi = \max_{U_i \in U} \left[IC_i - \left(\sum_{j=1}^J A_i + A_{Hi} + A_{Ai} \right) \right], \quad (2)$$

where $\max_{U_i \in U} \Pi$ – maximum profit for the i -th period of time with the rational use of labor, material and financial resources;

IC_i – income from efficient operation of rail transport in the i -th period of time;

A_i – labor and material resources spent on the operation of production processes of rail transport in the i -th period of time;

A_{Hi} – overhead for the i -th period of time;

A_{Ai} – depreciation accruals for the full restoration of fixed assets.

Depreciation accruals are mostly used to form the investment fund required for the modernization and technical re-equipment of rail transport facilities and systems.

Given the complexity of production processes of efficient operation of rail transport, a mathematical model for managing the efficiency of use of production and technological potential of rolling stock in the form of:

$$T_{ppi} = T_{ppi}(T_{1i}, T_{2i}, T_{3i}, \dots, T_{qi}), i = 1, 2, 3, \dots, I; q = 1, 2, 3, \dots, Q, \quad (3)$$

where T_{ppi} – model of functioning of production processes of rail transport on the i -th period of time;

T_{qi} – model of functioning of separate production processes of rail mobile transport on the i -th period of time.

Models of functioning of separate production processes can be set on a set of tasks Q_{ik} , the solution of which in the system unity [6] on the basis of wide application of modern methods and information technology ensures the achievement of high results of efficient operation of rail transport.

The paper considers the issue of solving at different levels of the hierarchy of production and technological potential of many problems Q_{ik} that provides information relevant system requirements, which are based on a comprehensive consideration of all facilities and processes of production and technological potential of rail transport. Comprehensive consideration of objects, systems and processes involves their identification [7-10], which provides a formalized description. Identification includes a study of structural and functional features of facilities and systems of production and technological potential of rail transport .. Required list of key parameters that are diagnostic features of subsystems and components of rolling stock, a set of inspection methods and a list of defective conditions for each type of technical means [6, 7]. Diagnostic assessment is determined by the task of classification:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow Y = (y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (4)$$

where X - are the diagnostic parameters of objects and systems, which are presented in the form of a hierarchy; Y - many state classes of objects and systems. $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

The obtained fuzzy model is used to assess the actual technical condition Y^* depending on the monitoring of data on the parameters X^* [5] of the rolling stock of rail transport. At k complex consideration of objects, systems and processes the one of problem is the imperfection of methods of diagnostics of objects and systems of rolling stock in terms of accessibility of data processing and decision-making on quality assurance and repair planning [11], including in conditions of uncertainty [13, 15]. In this situation, it is advisable to use intelligent technology to solve diagnostic problems that are complex and difficult to formalize. In contrast to classical approaches [15], they allow to analyze not only preliminary data on the operation of systems and objects, but also the knowledge and experience of specialists [16, 17].

Mechanisms of the intelligent decision support system [12, 14] can be implemented using fuzzy inference systems, in combination with optimization and clustering methods. This approach allows the use of statistical data and expert opinions in the development of diagnostic models and increase the reliability of assessing the condition of objects and systems of rolling stock [5, 6, 16].

Fuzzy rules are generated by an expert. They mimic the logic of experts in assessing the state of objects and systems of rolling stock and form a knowledge base built on a hierarchical principle [16, 17]. Thus, a comprehensive assessment of the general condition of rolling stock can be obtained, as well as an assessment of its condition of the elements, which is the basis of the technical aspect of production and technological potential of rail transport management efficiency.

The rules of the intermediate and resulting databases, hierarchically linked, are written in the format:

$$\begin{aligned} & \text{if } (x_1^i = \tilde{g}_{1f}^i \text{ and } x_2^i = \tilde{g}_{2f}^i \text{ and } \dots \text{ and } x_{n1}^i = \tilde{g}_{n1f}^i \text{ with the weight } \omega_f), \\ & \quad \text{then } y_1 = \tilde{d}_{1f}^i, f = \overline{1, q}, \\ & \text{if } (y_1 = \tilde{d}_{1j} \text{ and } y_2 = \tilde{d}_{2j} \text{ and } \dots \text{ and } y_l = \tilde{d}_{lj} \text{ with the weight } \omega_j), \\ & \quad \text{then } Y = h_j, j = \overline{1, z}, \end{aligned}$$

where $g^{\sim ij}$ – is a fuzzy term that is an attribute of the estimate x_1^i , $\tilde{d}_{if}^i, \tilde{d}_{ij}$ are fuzzy sets that estimate the state i_{th} of an element or system of rolling stock, h_j – is the value derived from j th rules of classes $S \in \{s_1, \dots, s_l\}$ for real assessment of the state of rolling stock.

As a result of the actual assessment of the technical condition of rolling stock is defined as the class with the maximum degree of membership [14]:

$$Y = \arg_{\{s_1, s_2, \dots, s_l\}} \max(\mu_{s_1}(Y), \mu_{s_2}(Y), \dots, \mu_{s_l}(Y)), \quad (5)$$

where де $\mu_{s_t}(Y) = \text{agg}_{\forall j: h_j = s_t}(\mu_j(X))$ is the degree of number of system members and objects of key diagnostic parameters of values to classes $s_t, t = \overline{1, l}$;

$\mu_j(X) = \omega_j * (\min_{i=1}^n (\text{agg}_{\forall f: d_f = e_t}(\mu_f(X_i))))$ - the degree of implementation of the j th rules characterizing the state of rolling stock;

$\mu_f(X_i) = \omega_f * (\min(\mu_f(x_1^i), \dots, \mu_f(x_{n_i}^i)))$ - the degree of compliance f th rules characterizing the qualitative state i th the element.

Thus, the proposed method of diagnosis opens the possibility of interaction between the management of the diagnostic subsystem and the planning of rolling stock facilities and systems based on the actual technical condition, which will improve the main aspects of production and technological potential.

Creating a system model for managing the efficiency of use of production and technological potential of rolling stock [6] of rail transport is a key element of the approach. The efficiency of its management allows to collect data on the operation of facilities and systems of rolling stock and use it to improve the performance of components of many tasks of production and technological potential and efficiency of decision-making aimed at operational costs of optimization.

Conclusions. Analyzed the problem of efficiency of management of production and technological potential of rail rolling stock. Based on the system criteria, a set of Qik tasks has been formed, which provide optimization of production processes and final results of operation of facilities and systems of rail transport. The system model of problems of efficiency of use of production and technological potential of work of rail transport by a method of decomposition is developed. The method of diagnostics of objects and systems of a rolling stock is offered, which will increase the indicators of the main aspects of production and technological potential.

REFERENCES

1. Kulayev, Y.U. (2001). *Metody ekonomicheskoy otsenki investitsionnykh proyektov na transporte*. Ucheb.-metod. Posobiye. Kiev: Transport Ukrainy, 128 p. [in Ukrainian].
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. Shchabelska, I. (2012). Otsinka stalosti y efektyvnosti investytsiynoho proektu, *Upravlinnya rozvytkom* 2: 23-26 [in Ukrainian].
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. Holub, H., Kulbovskiy, I., Skliarenko, I., Bambura, O., & Tkachuk, M. (2019). Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(2(49)), 34-36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182830>
9. 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.
10. 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].
11. F. Gustafsson. 2010. Particle filter theory and practice with positioning applications. *IEEE. Aerospace and Electronic Systems Magazine* 25 (7): 53-82.
12. Vasylevs'ka, A. (2012). *Upravlinnya proektamy pidpryyemstva iz vykorystanniam informatsiynykh tekhnolohiy* [Project management of the enterprise with the use of information technologies]. *Visnyk KNTEU - Bulletin KNTEU*, 1, 99-105 [in Ukrainian].

13. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. (2015) Management Support of Electroengineering Equipment Servicing Based on the Actual Technical Condition. *Automation and Remote Control*, 76 (6):1058 – 1069.
14. Shtovba S.D., Pankevich O.D., Nagorna A.V. (2015). Analyzing the Criteria for Fuzzy Classifier Learning. *Automatic Control and Computer Sciences*, 49 (3):123 – 132
15. Petrochenkov A.B. (2012). Regarding Life-Cycle Management of Electrotechnical Complexes in Oil Production. *Russian Electrical Engineering*, 83 (11): 621 – 627
16. Eltyshev D.K. (2015). Intellectualization of Diagnostics of Electric Machinery. *Informatika i sistemy upravleniia*, 43 (1): 72 – 82.
17. Eltyshev D.K. (2015). Expert statistical method for estimating the electrical equipment operability. *Sistemy. Metody. Tekhnology*. 28 (4): 79 – 85.

Іван Кульбовський¹, Галина Голуб^{2*}, Snezhina Andonova³, Інна Саяпіна⁴, Микола Ткачук⁵

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

³Faculty of Engineering, South-West University «Neofit Rilski», Blagoevgrad, 2700, Bulgaria

⁴Кафедра штучного інтелекту та телекомунікаційних технологій, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

⁵Служба сигналізації та зв'язку РФ «Південно-Західна залізниця» АТ «Укрзалізниця», вул. Лисенко, 6, м. Київ, 01054, Україна

*Corresponding author: golub_gm@gsuite.duit.edu.ua

МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВИРОБНИЧО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РУХОМОГО СКЛАДУ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто проблеми управління ефективності використання виробничо-технологічного потенціалу рухомого складу рейкового транспорту. Досліджено, що для вдосконалення ефективності функціонування необхідно комплексне вирішення множини задач, при раціональному використанні трудових, матеріальних та трудових ресурсів.

Розглянуто комплекс множини задач, які спрямовані на покращення та забезпечення визначено рівня ефективності функціонування об'єктів і систем рейкового транспорту.

Досліджено, що для досягнення необхідного рівня ефективності функціонування рухомого складу потрібно вдосконалити процес управління за допомогою системної моделі множини задач ефективності використання виробничо-технологічного потенціалу роботи рейкового транспорту. У результаті вирішення поставленої проблеми було запропоновано математичну модель множини задач, яка стала основою для побудови системної моделі множини задач. При побудові системної моделі використовували метод декомпозиції та програмне забезпечення AllFusion Process Modeler.

В роботі розглянуто задачу щодо забезпечення необхідного рівня ефективності використання виробничо-технологічного потенціалу рухомого складу рейкового транспорту та запропоновані шляхи її вирішення. Також наведено комплексний розгляд об'єктів, систем і процесів, який передбачає їх ідентифікацію, що забезпечує формалізований опис. На основі чого було запропоновано модель та метод діагностики, що відкривають можливість взаємодії управління підсистемою діагностики та планування роботи об'єктів і систем рухомого складу на основі фактичного технічного стану. Вирішення таким шляхом дозволить підвищити показники основних аспектів виробничо-технологічного потенціал, що є метою даної роботи.

Ключові слова: метод діагностики, модель, декомпозиція, системний аналіз, система, виробничо-технологічний потенціал.

*Kostiantyn Tkachenko*¹, *Olha Tkachenko*^{2*}, *Oleksandr Tkachenko*³

¹ Information Technologies and Design Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0549-3396>

² Information Technologies and Design Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1800-618X>

³ Software Engineering Department, National Aviation University, 1, Liubomyra Huzara ave., Kyiv, 03058, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6911-2770>

*Corresponding author: oitkachen@gmail.com

MODELING OF SYSTEM FOR MONITORING OF RISKS IN THE TRANSPORT

The article deals with the actual problems of modeling the processes for monitoring risks in transport. This monitoring involves determining the state of transport objects, as well as procedures for minimizing the consequences of situations caused by the onset of risks. The article discusses the problems of effective creation of system for monitoring of risks in transport based on the use of appropriate models. The article proposes modeling this system based on situational-semantic model. The approach proposed would contribute to recognition of risks and generation of management decisions to eliminate their consequences. The proposed situational-semantic model allows: to predict the behavior of complex transport objects and transport infrastructure objects; take into account the possibility of emergence of new transport objects and processes for ensuring their functioning in conditions of minimizing possible risks; respond adequately to local and global factors of influence on transport objects; dynamically change the structure of the system; take into account new data to predict the development and improvement of relevant transport objects; predict the development of processes to ensure minimization of risks and the consequences of them.

Keywords: *model, modeling, information system, transport risks, monitoring of processes, semantic measures, situational-semantic measures.*

Introduction. Transport is always associated with certain risks. Studying these risks, determining the degree of their impact on the functioning of transport objects and transport infrastructure objects is a complex problem. This is due to the fact that, firstly, there are several classes of risks in transport, in particular:

Technical risks: production, technological, innovative.

Economical risks: property, commercial, financial, credit and interest rate.

Social risks.

Environmental risks.

And, secondly, each of the risks is associated with a large number of dynamically changing factors of influence. Therefore, the monitoring of risks, the development of appropriate information systems is an important and urgent problem. The creation of such complex systems will be optimal if it is based on the use of models of objects and processes in transport.

Modeling of risk monitoring systems in transport would facilitate the timely recognition of risks and the generation of solutions to eliminate their consequences.

Analysis of recent research and problem statement. When building a complex technical system, which is a system for monitoring of risks in the transport [1 – 4], it is important to choose the method

of presenting knowledge about the subject area (transport industry). Among the main types of models of knowledge representation should be noted [5 – 8]:

1) *production model* – a model based on rules, allowing to present knowledge in the form of proposals such as: "If a condition, then an action";

2) *semantic network* – an oriented graph in which concepts and objects are represented as vertices, and relations between objects are represented as arcs;

3) *frame model* – a model based on frames, which consist of a finite number of slots, each of which has a name and meaning.

4) *ontological model* – a conceptual construction based on some global categories (space, time and quality).

The construction of an intelligent safety management system for complex transport complexes is considered in [9]. In [10], a multilevel model of an object-oriented intelligent system is proposed. The principles of designing complex systems are considered in [11].

These works do not consider the case when objects are dynamic, can function under conditions of certainty and knowledge about objects is heterogeneous. This can lead to incorrect risk assessment, as well as to an erroneous assessment of the feasibility of the operation of the transport objects or transports infrastructure objects. Therefore, the problem of developing a model of system for monitoring of risks in the transport is relevant.

The purpose and tasks of the study. In this work, when modeling of system for monitoring of risks in the transport, a systematic approach was used, as well as analysis methods and a classification method.

The main goal of this work is to develop a model of the system for monitoring of risks in the transport. As such a model, a situational-semantic model was proposed [12].

Materials and methods of research. Modeling of system for monitoring of risks in the transport (transport objects and processes for ensuring their safe operation without risks) can be based on different models, the choice of which is determined by the tasks set (in our case, this is minimizing the consequences of existing risks or minimizing the chances of their occurrence) and the subject area (transport industry).

The authors propose to use modeling based on a multi-level model of a special class of semantic networks (SM) – situational-semantic networks (SSM), in which situations determine not only the description of the model at any of its levels, but also the transition from one level to another [13].

The SM that is used is a system of knowledge of the subject area (the transport industry, its individual components: transport objects and transport infrastructure objects (bridges, train stations, hotels, etc.).

This has a certain content in the form of a coherent image of a specific network model of the system for monitoring of risks in the transport.

The nodes of this model correspond to transport objects or transport infrastructure objects (concepts of the subject area, system components, constituent elements of the process of ensuring the functioning of a transport objects or transport infrastructure objects (either with minimal risk (economical, technical, environmental, social), or with the presence of minimization procedures the consequences of the onset of risks).

Arcs reflect the relationship between all objects of the considered domain.

Formalization of the SM is possible provided it is systematized.

For example, in the model, the functions of relations between concepts are systematized using the following features:

relationships (for example, "abstract - concrete", "whole - part", "cause - effect");

conditions for the application of relations;

links (conjunctive, disjunctive, exclusive OR).

SM can be given by three:

$$M_{sm} = \{G_{sm}, H_{sm}, U_{sm}\},$$

where G_{sm} – set of elementary transport object and transport infrastructure object (nodes), $G_{sm} \neq \emptyset$;

H_{sm} – set of connections between nodes (arcs), $H_{sm} \subseteq (G_{sm} \cup G_{sm})$;

$\text{dom}(H_{sm}) \cup \text{ran}(H_{sm}) = G_{sm}$,

where $\text{dom}(H_{sm}) = \{y \in G_{sm} | \exists x \in G_{sm}, (x,y) \in H_{sm}\}$, $\text{ran}(H_{sm}) = \{y \in G_{sm} | \exists x \in G_{sm}, (x,y) \in H_{sm}\}$, that is, any SM node is incident to at least one SM node.

U_{sm} – set of loads on elements from a set H_{sm} . $G_{sm} = \{G_{sm}^i\}$, where

G_{sm}^i – i -th node SM,

$H_{sm} = \{H_{sm}^j\}$, where H_{sm}^j – j -th arc,

$U_{sm} = \{U_{sm}^{jk}\}$, where U_{sm}^{jk} – k -th load on the j -th arc of the SM.

When constructing a SM, the number of elements and their connections is not limited, and the systematization of relations between objects (transport and transport infrastructure) of the network is necessary for the subsequent formalization of the processes of monitoring risks in transport.

Systematization of SM relations is a complex problem and depends not only on specific transport objects or transport infrastructure objects, but also on the processes occurring in them and possible risks both as a result of their functioning and for their functioning.

In particular, it depends on the processes of ensuring the functioning of transport objects and transport infrastructure objects without economical, technical, environmental and social risks and monitoring these risks.

When systematizing SM relations, an important role is played by the hierarchy of relations between objects, which can be divided into:

generally valid (characteristic of almost all objects),

significant (characteristic of many objects),

specific (characteristic of individual objects).

Objects are understood as transport objects and/or transport infrastructure objects.

There are the following types of SM [14]:

1. *Logical-semantic*, describing a transport object in terms of the subject area (in our case, the transport industry), including all consistent statements and facts.

2. *Structural and functional*, considering a transport object or a transport infrastructure object) as integral, dividing it into separate important elements.

3. *Cause-and-effect*, used to describe the dynamics of complex processes of ensuring the functioning of transport objects and transport infrastructure objects safely or with minimal risks (economical, technical, environmental, social).

The authors propose an SSM, which also takes into account the situational monitoring of the risks of transport objects and transport infrastructure objects.

All situations, according to which modeling of the system for monitoring of risks in the transport is carried out, can be divided into:

regular,

non-standard.

Standard situations can be divided into:

generally significant,

significant,

specific.

The use of situations and their typification contributes to the multilevel structure of the proposed model (SSM) of system for monitoring of risks in the transport.

Formally, the SSM can be set as follows:

$M_{ssm} = \{G_{ssm}, H_{ssm}, U_{ssm}, S_{ssm}\}$,

where G_{ssm} – set of transport objects and transport infrastructure objects (nodes), $G_{ssm} \neq \emptyset$;

H_{ssm} – set of connections between nodes (arcs), $H_{ssm} \subseteq (G_{ssm} \cup G_{ssm})$;

$\text{dom}(H_{ssm}) \cup \text{ran}(H_{ssm}) = G_{ssm}$,

where $\text{dom}(H_{ssm}) = \{y \in G_{ssm} | \exists x \in G_{ssm}, (x,y) \in H_{ssm}\}$, $\text{ran}(H_{ssm}) = \{y \in G_{ssm} | \exists x \in G_{ssm}, (x,y) \in H_{ssm}\}$, that is, any SSM node is incident to at least one SSM node;

U_{ssm} – set of loads on elements H_{ssm} ;

S_{ssm} – set of situations in which functioning occurs SSM.

$G_{ssm} = \{G_{ssm i}^s\}$, where:

$G_{ssm i}^s$ – i-th node SSM;

$H_{ssm} = \{H_{ssm j}^s\}$, where $H_{ssm j}^s$ – j-th arc SSM;

$U_{ssm} = \{U_{ssm j}^s\}$, where $U_{ssm j}^s$ – j-th load on the j-th arc SSM;

$S_{ssm} = \{S_{ssm i}^s\}$, where $S_{ssm i}^s$ – situation that determines the semantics of the i-th node SSM.

Route (path) – a sequence of nodes x_1, \dots, x_k of the network M_{ssm} such that

$P_{ssm 1k} = \{(x_1, x_2), \dots, (x_{k-1}, x_k)\} \in H_{ssm} \times H_{ssm}$.

Path $P_{ssm 1k} = \{x_1, \dots, x_k\}$ leads from node x_1 to the node x_k .

Route (path) $P_{ssm xy}$ from node x to the node y is a cycle, if none of the nodes appears in it more than once, the arc $(x, y) \in H_{ssm}$ and its beginning x coincides with its end y .

Analysis of the results of the execution of the model (SMM) provides for reporting the situations in which the transport object was (or was not) (the process of ensuring the security of the transport object). Monitoring is carried out which situations for the object (transport or transport infrastructure) are unattainable and impossible.

Analysis of the functioning of a transport object based on the SSM provides quantitative and qualitative characteristics of its states. If deficiencies are found in the SSM, then the model is modified several times until a model is obtained that is adequate to the transport object.

SSM components and their actions act as events. Examples of events can be, in particular: situational determination of the route on the SSM, according to which the values of the criteria that determine the situation are calculated.

Each event can happen once, many times, or never happen. This means that the event is blocked and will not be implemented until the appropriate conditions are met.

The situational nature of the model is determined by the functioning of transport objects and the corresponding class of tasks.

In order for an event with respect to a transport object or a transport infrastructure object (the process of ensuring the functioning of a transport object or a transport infrastructure object without risks (economic, including economical, technical, environmental, social)) to take place, situations must arise in which this event can be implemented.

Situation – a set of conditions for the occurrence of an event.

The event is implemented if the conditions for its implementation are met.

The condition can be unfulfilled (its capacity is zero), fulfilled (its capacity is equal to one), fulfilled with an n-fold margin (its capacity is n, where n is a natural number).

Indicators of quantitative assessment of the SSM: connectivity, reachability, redundancy, compactness. Connectivity index γ_c for SSM with n nodes:

$$\gamma_c = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^{(c)} .$$

Indicator of redundancy $\alpha = \gamma_c - 1$.

$$\text{Indicator of reachability } \delta_r = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^{(d)} .$$

$$\text{Indicator of compactness } C_{omp} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^{(p)} .$$

$a_{ij}^{(c)}, a_{ij}^{(d)}, a_{ij}^{(p)}$ – elements of the corresponding adjacency, reachability and distance matrices.

The SSM of the system for monitoring of risks in the transport should be:

- reliable; adequate;
- purposeful;
- simple and understandable for the user;

complete; reliable;
such that it assumes the possibility of modification.

To adequately reflect the connection between input and output in the SSM, the concepts "state" and "situation" are used.

The state $z(t_i)$ is a set of properties (states, situations) of the SSM, the knowledge of which at the moment of time t_i allows us to determine its behavior at the moments of time $t > t_i$.

Modeling of system for monitoring of risks in the transport, processes for ensuring the functioning of transport objects and transport infrastructure objects in conditions of minimizing risks and/or eliminating their consequences should begin with:

descriptions of all elements of the model of;
determining the content of these components and areas of change.

For the full functioning of the system for monitoring of risks in the transport, it is necessary to determine:

the time interval in which the SSM of the system for monitoring of risks in the transport operates;
input and output impacts on possible risks (economical, technical, environmental, social) and areas of their possible changes;

the set of characteristics of the state of the subject area (and / or its individual objects) and the area of their possible changes.

Note that within the framework of one SSM, several variants of its submodels can be built (depending on situations, factors of influence, criteria for assessing risks, etc.) The constructed model reflects expert knowledge about possible risks in transport, the reasons for their occurrence and ways of their elimination or minimization.

There are two approaches to constructing an SSM [15].

1. «**From above**». At the initial stage, the core of the SSM is built, which is further completed with the help of separate blocks of the model. Individual components of the model can be dynamically completed to the core of the SSM.

2. «**From below**». At the initial stage, the core of the SSM is built, which is further completed with the help of separate blocks of the model.

The model allows you to:

clear cognitive analysis,
dynamic modeling,
forecasting trends in the development of the transport system and its individual subsystems (individual transport objects and transport infrastructure objects),
forecasting the quantitative values of the criteria characterizing the risks in transport;
analysis of model cycles, including life cycles; - analysis of the stability of the process,
analysis of structural resistance to disturbing and control influences,
topological analysis of the structure of the model.

Topological analysis, calculation of system indicators of transport objects and transport infrastructure objects can also be carried out for the SSM.

The formation of control actions involves the implementation of the adjustment of the SSM.

A model correction is understood as:

changing the structure of the model (adding or removing any objects, factors and relationships (connections) between them),

change in values characterizing objects, factors and connections.

Users are prompted to make one of the following decisions:

make adjustments to the initial SSM;

to develop a new SSM.

Let's consider an example of risk assessment.

To build the SSM of the system for monitoring of risks in the transport, the factors necessary for assessing risks, the relationship between them, and their significance were identified.

At subsequent stages, when constructing an SSM, factors that characterize the individuality of transport objects and transport infrastructure objects can be used.

The values of the connections between the vertices are assigned based on expert knowledge (their opinions, judgments, forecasts, etc.). The judgments were obtained by interviewing experts in the subject area under consideration – the transport industry.

Figure 1 shows the risk assessment model using the principle «from below».

Here:

- v1 is the number of tasks;
- v2 – the speed of execution of work to eliminate the consequences caused by the risks;
- v3 is the number of expert assessments of risks and their consequences;
- v4 – the onset of a situation caused by the emergence of a risk;
- v5 – minimization of economic risks;
- v6 – system reliability,
- v7 – the ability of transport objects and objects of the transport system to function without the manifestation of negative environmental consequences;
- v8 – external factors affecting transport objects and transport infrastructure objects;
- v9 – the number of errors made by users of the system;
- v10 is the time taken to create the system; v11 - financial costs for creating the system;
- v12 is the number of system users;
- v13 – qualification of system users;
- v14 – violation of normal operation;
- v15 – emergency.

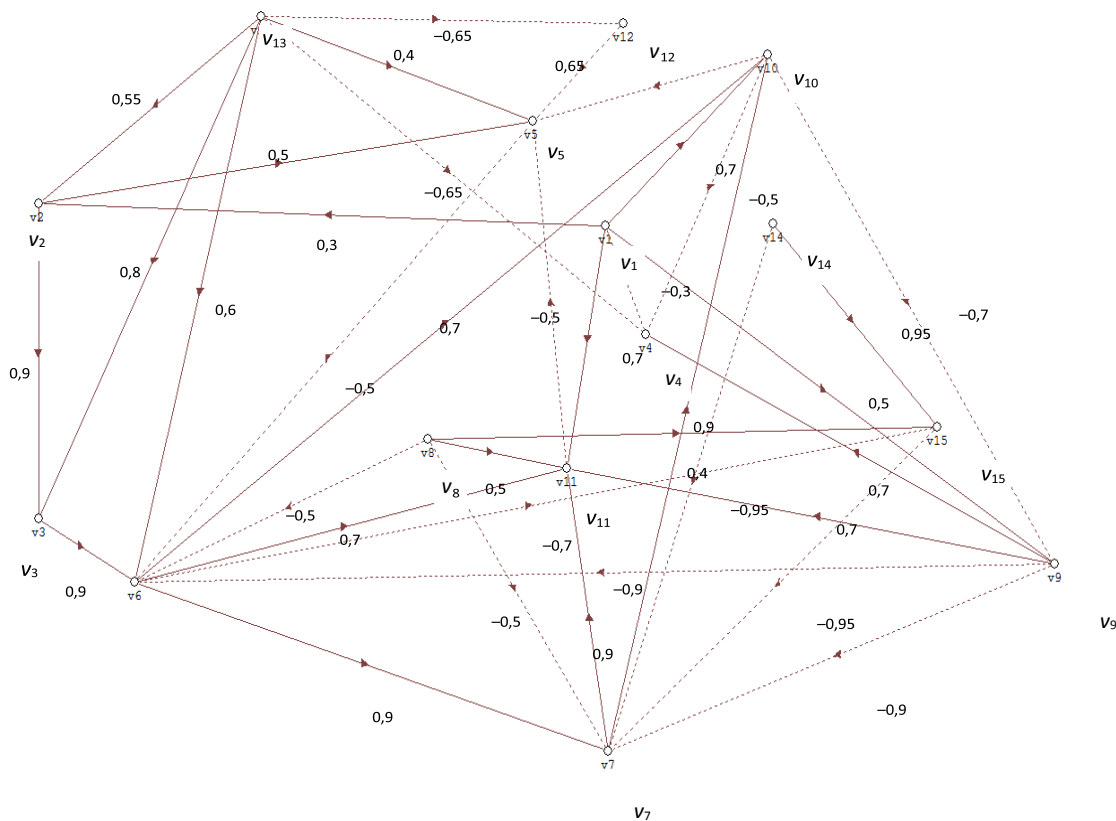


Fig. 1. Risk Assessment Model
(Source: designed by the authors)

The relationships shown in Figure 1 can be interpreted as follows:

for example, the relationship $v_3 \rightarrow v_6$ with a weight of 0.9 means that if the value of the parameter of the vertex v_3 increases (decreases) by 10%, then the value of the parameter of the vertex v_6 increases (decreases) (sign "+") by 9%;

the relationship $v_{10} \rightarrow v_9$ with a weight of -0.7 means that if the value of the vertex parameter v_{10} decreases by 10%, then the value of the vertex parameter v_9 will increase ("—" sign) by 7%.

Conclusions. The proposed model (SSM) of system for monitoring of risks in the transport:

allows predicting of the behavior of complex transport objects and transport infrastructure objects in the context of monitoring possible risks;

takes into account (due to its dynamism) the possibility of the emergence of a new type of transport objects (and transport infrastructure objects) and processes for ensuring their functioning in conditions of minimizing possible risks;

responds adequately to local and global factors of influence on transport objects and transport infrastructure objects;

dynamically changes its structure;

allows you to take into account new data for more accurate forecasting of the development and improvement of the relevant transport objects and transport infrastructure objects;

allows predicting of the development and improvement of processes to ensure minimization of risks, their complete absence or elimination and minimization of consequences due to the onset of situations caused by the emergence of risks.

REFERENCES

1. Yurkov N.K. (2013). System approach to the organization of life cycle of complex technical systems. *Reliability and quality of difficult systems: Scientific and practical*. 2013(1), 27 – 35. [In Russian].
2. Lipaev V.V. (2010). The problems of software engineering: quality, safety, risk, economy [In Russian]. *Software engineering*. 2010(1), 7-20. [In Russian].
3. Info TS 08/17 Compliance and Risk Monitoring of Transport Operations through Auditing. <https://www.eiga.eu/publications/safety-informations-transport/info-ts-0817-compliance-and-risk-monitoring-of-transport-operations-through-auditing/>
4. Staznik A., Babich D., Bajo I. (2017). Identification and analysis of risks in transport chains. *Istrazivanja i Projektovanja za Privredu*. 15(1), 61–70. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes15-12179>
5. Nechaev V.V., Koshkarev MI. (2015). Architecture of object-oriented knowledge base intelligent systems. *Educational resources and technology*. 2015(1), 156–163. [In Russian].
6. Adema J. (2015). New Models of Knowledge Production. Open Access Publishing and Experimental Research Practices (Part III). <https://openreflections.wordpress.com/2015/02/27/new-models-of-knowledge-production-open-access-publishing-and-experimental-research-practices-part-iii/>
7. Types of Knowledge Representation (2021). https://www.brainkart.com/article/Types-of-Knowledge-Representation_8892/
8. How Important Are Semantic Networks In Artificial Intelligence (2019). <https://analyticsindiamag.com/semantic-networks-ai/>
9. Kolodenkova A.E. (2016). The process modeling of project feasibility for information management systems using the fuzzy cognitive models. *Herald of computer and information technologies* 2016(6), 10–17. [In Russian].
10. Gorelova G.V.. (2018). A cognitive approach for modeling of complex systems. *News of SFU. Technical science*. 2018(3), 239–250. [In Russian].
11. Tkachenko O., Tkachenko K., Tkachenko O. (2020). Designing complex intelligent systems on the basis of ontological models. *Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*. 266–277.
12. Tkachenko O., Tkachenko O. (2017). Some aspects of situation-semantic modeling of complex objects, processes and systems. *Water transport*. 2017(1), 129–133.
13. Bellinger G., Castro D., Mills A. (2016). Data, Information, Knowledge, and Wisdom. <http://www.outsights.com/systems/dikw/dikw.htm>.
14. Futia G. (2020). Semantic Models for Constructing Knowledge Graphs. <https://towardsdatascience.com/semantic-models-for-constructing-knowledge-graphs-38c0a1df316a>.
15. Dodonov A.G., Lande D.V, Berezin B.A. (2018). A method of semantic models for constructing and using for the public opinion monitoring. *Registration, storage and data processing*. 20(4), 53–63. [In Ukrainian].

Костянтин Ткаченко¹, Ольга Ткаченко¹, Олександр Ткаченко²

¹ Кафедра інформаційних технологій та дизайну, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

² Кафедра інженерії програмного забезпечення, Національний авіаційний університет, вул. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РИЗИКІВ НА ТРАНСПОРТІ

У статті розглядаються актуальні проблеми моделювання процесів моніторингу ризиків на транспорті. Такий моніторинг передбачає визначення стану транспортних об'єктів, а також процедури мінімізації наслідків ситуацій, викликаних настанням ризиків.

У статті розглядаються проблеми ефективного створення системи моніторингу ризиків на транспорті на основі використання відповідних моделей. У статті пропонується моделювати систему моніторингу на основі ситуаційно-семантичної моделі. Запропонований підхід буде сприяти визнанню ризиків і формуванню управлінських рішень щодо усунення їх наслідків. Запропонована ситуаційно-семантична модель дозволяє: прогнозувати поведінку складних транспортних об'єктів та об'єктів транспортної інфраструктури; враховувати можливість появи нових транспортних об'єктів і процесів для забезпечення їх функціонування в умовах мінімізації можливих ризиків; адекватно реагувати на локальні і глобальні фактори впливу на транспортні об'єкти; динамічно змінювати структуру системи; враховувати нові дані для прогнозування розвитку і вдосконалення відповідних транспортних об'єктів; прогнозувати розвиток процесів, що забезпечують мінімізацію ризиків та їх наслідків.

Ключові слова: *модель, моделювання, інформаційна система, ризики на транспорті, моніторинг процесів, семантичні мережі, ситуаційно-семантичні мережі.*

Барибін Микола Анатолійович^{1*}, Каращук Вікторія Олександрівна², Клецька Ольга Віталіївна³, Кіріцева Олена Вікторівна⁴, Джус Володимир Степанович⁵

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>

² Доцент кафедри «Електромеханіки та рухомого складу залізниць», Державний університет інфраструктури і технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1956-7555>.

³ Доцент кафедри «Рухомий склад транспортних систем», ДВНЗ Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4682-860X>.

⁴ Старший викладач кафедри «Рухомий склад транспортних систем», ДВНЗ Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-5883>.

⁵ Доцент кафедри «Рухомого складу і колії», Львівська філія ДНУЗТ, вул. Іванни Блажкевич, 12а, м. Львів, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1787-4471>

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

МОДЕЛЬ ВЗАЄМВПЛИВУ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ТА НОРМУВАННЯ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ В ЛОГІСТИЦІ ЗАЛІЗНИЦЬ

У статті розглянуті питання екологічного оподаткування викидів вуглекислого газу країнами Європейського союзу та методологія розрахунку величини викидів з використанням нормативних документів України. Встановлено непристосованість методики даних розрахунків нашої країни до реальних умов експлуатації під впливом транскордонного вуглецевого оподаткування та «Emissions Trading System». Запропоновано математичну модель впливу енергогенеруючих станцій держав та їх вкладу в загальний енергобаланс країни на екологічну вартість та маси викидів 1 кВт·год генерації електроенергії. Визначена величина втрат електроенергії при транспортуванні її від електростанції до електрорухомого складу та враховано в загальній величині відрахувань за «Emissions Trading System» для мереж залізниць постійного та змінного струму. Розглянуто на базі реального парку тягового рухомого складу залізниць та мережі логістичних ліній схеми маршрутів руху транзитних та місцевих вантажів. Проаналізовано паспортні характеристики локомотивів та визначено величину викидів і відрахувань при роботі на номінальному режимі та холостому ході. Виконано розрахунок питомих норм для обраних маршрутів слідування та поїзних умов. Встановлено загальні витрати, вартість їх та величини викидів й оподаткування обраних маршрутів, та визначено на їх базі раціональних економічних та екологічних логістичних ліній руху поїздів.

Ключові слова: нормування витрат, викиди вуглекислого газу, енергоресурси, математичне моделювання, тяговий рухомий склад, екологічні показники, логістика перевезень.

Вступ. При роботі енергогенеруючих потужностей країн, в частині тих, що засновані на принципі перетворення хімічної енергії викопного палива на електричну енергію головного генератора, в силу багатоконпонентності споживаного палива й інших чинників, виявляється шкідливий вплив на всі сфери нашої планети. Людина – невід'ємна частина довкілля гостро відчуває будь-які негативні зміни викликані впливом техносфери на ареал його проживання. У

зв'язку з цим виникла потреба оцінки впливу засобів виробництва на довкілля та його економічна доцільність застосування. Визначення концентрацій шкідливих речовин, аналіз та пошук шляхів їх зменшення – невід'ємна частина політики держав, що входять до Кіотського протоколу, відповідно до засідання від 1997 р. країни підписанти (у тому числі Україна) взяли на себе зобов'язання зі зменшення викиду парникових газів та інших шкідливих речовин на певний відсоток для кожної держави від величини викиду на душу населення. Удосконалення конструкцій енергетичного та транспортного комплексів, як основних забруднювачів довкілля в Україні, екологічний та енергетичний аудит, контроль технічного стану – все це повинно стати найважливішими напрямками у функціонуванні та розвитку залізничної галузі.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Зростання цін енергоресурсів на світових ринках та збільшення податків за забруднення оточуючого середовища стимулює розвиток науково-технічного прогресу. Не дивно що безліч фахівців присвятили свої праці екологічному контролю, нормуванню енергоресурсів та математичному моделюванню раціонального балансу економічної та екологічної складової. На першому етапі аналізу проблематики необхідно визначитись з існуючими реаліями та станом енергетики, для України це добре відображено в роботах [1-2]. Характеристика типів палив, які застосовуються на теплових електростанціях (ТЕС), теплових електроцентралях (ТЕЦ) й в двигунах внутрішнього згоряння, їх елементного складу, теплотворної спроможності та основ теорії горіння добре описано в підручнику [3] – що дає можливість визначити екологічне навантаження 1 кг використаного ресурсу. Врахування впливу екологічної діяльності на залізничному транспорті (її суть, актуальність, місце і роль) відображено в працях [4-5]. Роботи [6-7] висвітлюють економічну актуальність екологізації залізниці з приведенням реальних прикладів різних країн світу. На другому етапі необхідно виконати економічний та екологічний аналіз транспортних засобів залізниць, що знайшло своє відображення в [8], та еколого-економічної ефективності функціонування територіально-виробничих й режимів роботи підприємств і локомотивів [9-10]. Серед них слід виділити роботи [11-13], в якій сформовані принципи режимізації тягового рухомого складу та оптимізації витрат ресурсів на тягу. В працях Осипова [14] сформульовані основні підходи до вирішення рівнянь тяги поїздів, встановлення величин витрат та проаналізовані сили що впливають. Використання досвіду екологічної стійкості міського транспорту протягом життєвого циклу [15] та співставлення його з реаліями залізничного комплексу [16] протидіє повтору помилок авторів та формує картину екологічної безпеки.

Аналіз існуючих нормативних документів з нормування витрат паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів, методики розрахунку та встановлення коефіцієнтів нормоутворюючих рівнянь всіх виробничих підрозділів АТ «Укрзалізниця» показав гостру необхідність у просуванні екологічних питань, як таких, що є частиною методології нормування, та розробці і впровадженні нових методик на заміну старим [17]. Використання праці [18] на регіональних філіях, філіях та інших структурних підрозділах призводить до зменшення енергоємності виробництва і як наслідок кількості шкідливих викидів в атмо-, гідро-, літо- й біосфери нашої планети. Тому вирішенням проблеми є створення математичної моделі взаємовпливу екологічних аспектів та нормування енергії на тягу поїздів в логістиці залізниць, яка буде направлена на отримання екологічного та економічного балансу.

Мета і завдання дослідження. Проаналізувати існуючу методику обліку викидів шкідливих речовин. Розглянути реальну логістичну мережу транспортування потоків транзитних та місцевих вантажів. Встановити енергогенеруючий вплив (за типом електростанції) в енергосистемі України та величину викидів CO₂ на годину їх роботи. Визначити величину відрахувань вуглецевого податку та кількість викидів транспортним потоком за маршрутами слідування. Встановити економічну та екологічну вартість перевезень.

Матеріал та методи дослідження. Глобалізація світового ринку логістичних перевезень та боротьба країн за екологізацію всіх видів транспорту накладає свій відбиток на оподаткування шкідливих викидів та кінцеву вартість продукту в країні призначення. Так європейське транскордонне вуглецеве оподаткування (ТВО) продукції добувних та промислових

підприємств знижує конкурентну здатність собівартості товарів й ресурсів країн не членів Європейського союзу (ЄС) до рівня втрати ринку збуту (у зв'язку з економічним програвом вартості порівняно з іншими). Так як основна частина продукції експорту України в ЄС є переліком цього списку, а кінцева величина ТВО базується на обліку викидів вуглекислого газу на всіх етапах (видобуток, переробка, зберігання та транспортування), а транспортна складова займає близько 30...40% кінцевої собівартості продукції й основний об'єм перевезень припадає на залізничний комплекс виникає питання оцінки доцільності існуючих маршрутів перевезень вантажів. Критичним фактором є також особливість географічного (на шляхах вантажопотоків між Європою та Азією) та стратегічного (основна частина перевезень вантажів в Україні припадає на залізничний комплекс й він проектувався під великі об'єми за часів СРСР, тому втрата транзитних потоків може призвести до знищення окремих структурних та інфраструктурних елементів даного комплексу, яскравим прикладом такого впливу є розбирання «непарних/парних колії» на перегоні, приймально-відправних колій парків, зменшення штату та об'єднання виробничих підрозділів харківського залізничного вузла – все це призводить до підвищення собівартості одиниці продукції АТ «Укрзалізниця», зменшення пропускної здатності та стійкості комплексу піковим навантаженням) розташування України. Важливим фактором є також підвищення вуглецевих квот в рамках торгівлі викидами в ЄС (по системі Emissions Trading System (ETS)) з 30 євро/1 тону (в 2020 році) до 50 євро/1 тону (в травні 2021 року), а також це мало відношення й до розширення списку товарів і продукції у відношенні яких вводиться дана система. На нашу думку в майбутньому даний перелік буде розширено до всієї без винятку продукції, а величина оподаткування буде тільки зростати.

Існуюча методика величини викидів шкідливої речовини пропонує визначати за формулою:

$$E_{XY_i} = \frac{K_{XY} \cdot 10^4 \cdot C_{XY} \cdot (0,001 \cdot \frac{21 \cdot L_{air}^0 \cdot G_f}{21 - C_{O_2}} - 0,000974 G_f) \cdot t}{P_{ei}}, \quad (1)$$

де K_{XY} – коефіцієнт шкідливої речовини (для оксидів азоту $K_{NO_x} = 5,72$, для оксидів вуглецю

$K_{CO_x} = 3,475$, для викидів вуглеводнів $K_{C_mH_n} = 5,46$);

C_{XY} – концентрація викидів забруднюючої речовини за результатами замірів, %;

L_{air}^0 – теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 кг палива - для дизельного палива (молекулярна структура якого має співвідношення речовин $O^P=0,5\%$, $C^P=86\%$, $H^P=13\%$, $S^P=0,5\%$ та середній масовій частині кисню в повітрі $O_2=0,232$) складає $L_{air}^0 = 14,32$ кг;

G_f – фактична витрата дизельного палива, г/с;

C_{O_2} – концентрація кисню у відпрацьованих газах, %;

P_{ei} – ефективна потужність дизеля тепловоза на і-му режимі випробування чи роботи, кВт;

t – час, протягом якого здійснюється вплив на екологію.

Недоліком даної методики є застосування лише до теплотягового рухомого складу, що в умовах розвинутої енергогенеруючої системи України та ТВО й ETS може призвести до економічних та галузевих втрат. Другим важливим недоліком є прив'язка до P_{ei} (в реальних умовах експлуатації встановити дуже важко). Тому пропонується інша методика й алгоритм, основа якої є повне згорання елементів палива: вуглецю (С), водню (Н) та сірки (S). Поправка недопалу повинна бути здійснена тільки після екологічних випробувань обладнання.

В умовах збереження транспортних потоків, та як наслідок залізничного комплексу України, розглянемо транзитні й внутрішні коридори прямування вантажів від станції Валуйки (Російська федерація) через станцію Куп'янськ-Сортувальний (з можливим приєднанням в хвіст поїзда вагонів продукції внутрішнього виробництва) до станції Новомосковськ-Дніпровський.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Першим етапом повинно стати аналіз поїзних умов транспортної логістики між вказаними станціями. На рисунку 1 зображені логістичні лінії Південної, Донецької та Придніпровської залізниць за видом струму та типом тяги. Як видно з рисунку 1 на даній дільниці АТ «Укрзалізниця» у своєму переліку має всі види струму й на окремих дільницях теплотягу. Зміна типу тягового рухомого складу вимагає розгляд, на кожному плечі експлуатації, всього переліку одиниць. Першим важливим проміжком є між кордонний перехід від ст. Валуйки до ст. Куп'янськ-Сортувальний з проходженням митного та прикордонного контролю на вказаних станціях. Основним локомотивом експлуатації, на даній дільниці, є ВЛ80С. Від ст. Куп'янськ-Сортувальний, незалежно від напрямку вантажопотоку, йде зміна роду струму по ст. Граково та ст. Святогірськ тому застосовують ВЛ82М. При недостатній кількості локомотивів подвійного струму живлення можливі зупинки на вказаних станціях стикування для заміни локомотива. З боку Південної основним вантажним локомотивом постійного струму є ВЛ11, з боку Донецької залізниці – ВЛ8, локомотивний парк Придніпровської залізниці представлений в основному у вигляді ВЛ8 та ВЛ11. На дільницях теплотяги перевезення великовантажних составів покладено «на плечі» 2ТЕ116 – основного вантажного тепловозу вказаних залізниць. На рисунку 2 зображені транспортні коридори руху вантажів від ст. Валуйки до ст. Новомосковськ-Дніпровський, їх протяжність, серед яких на сьогоднішній час основним є позначений синім кольором; зелені та червоні логістичні лінії є резервними.

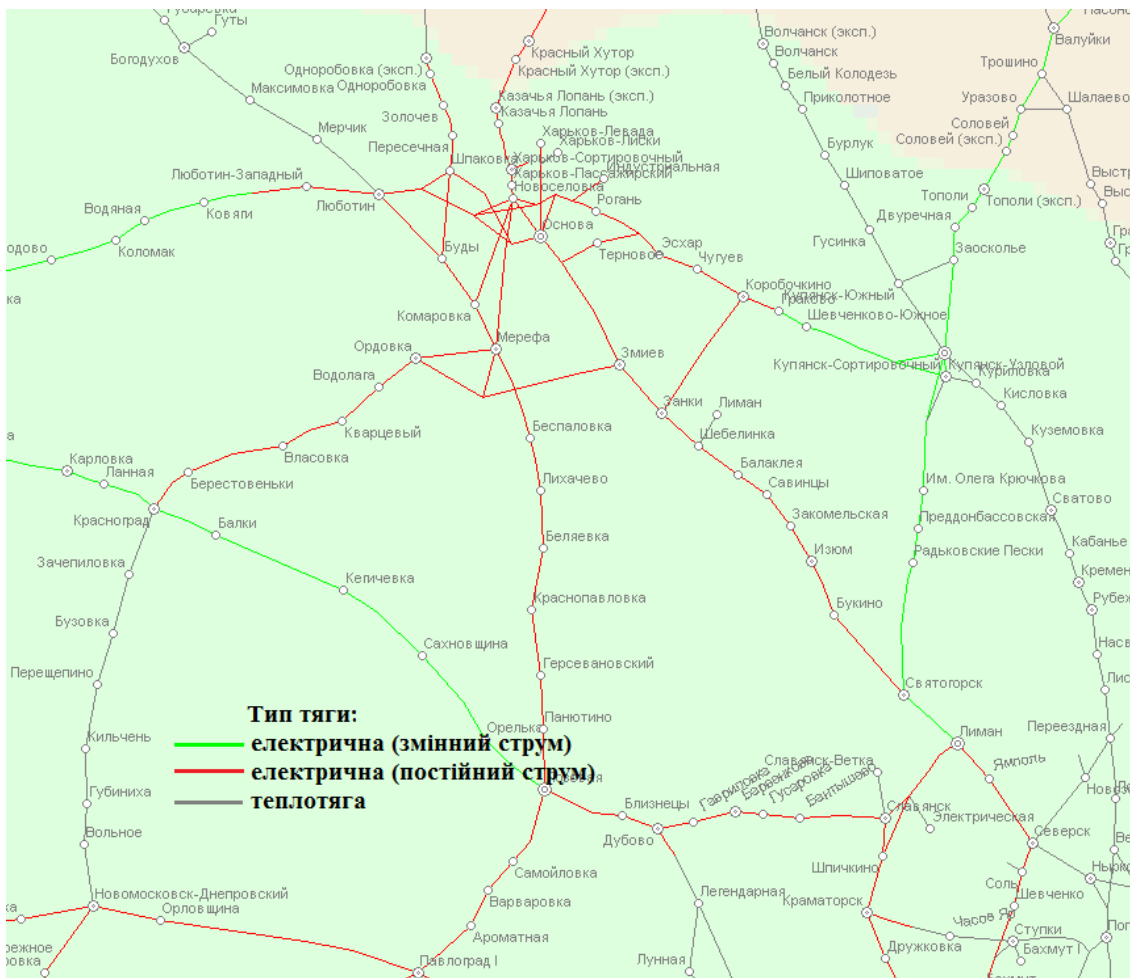


Рис. 1. Графічне зображення транспортної логістики за типізацією виду тяги

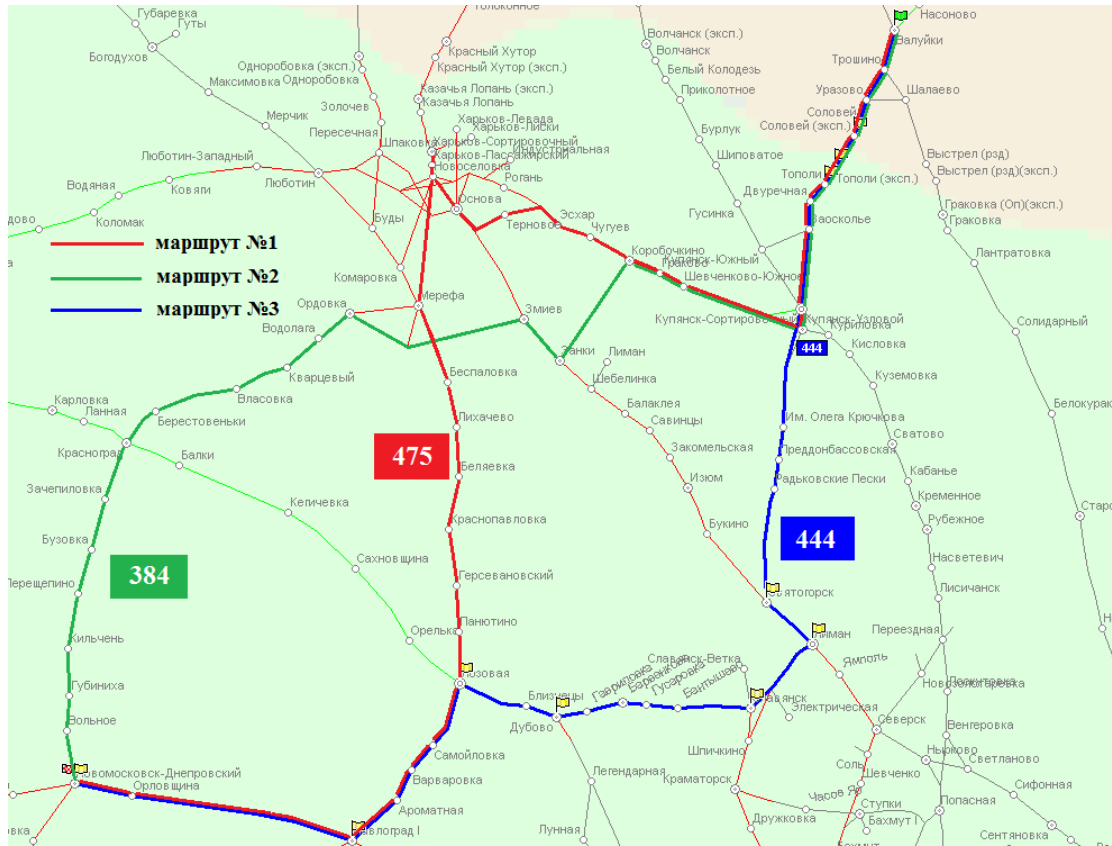


Рис. 2. Графічне зображення можливих потоків вантажів зі станції Валуйки до станції Новомосковськ-Дніпровський

Другим важливим етапом є аналіз електрогенеруючих станцій енергосистеми України, їх вкладу, зображення якого наведено на рисунку 3 за інформацією від НЕК «УКРЕНЕРГО», в загальний енергобаланс та визначення величини вуглецевих викидів при виробленні 1 кВт·год електроенергії. Для цього у проміжок часу з 01.07.2019 по 01.11.2021 в таблиці 1 визначимо середній електрогенеруючий вплив кожного джерела електрогенерації.

Таблиця 1. Середній електрогенеруючий вплив та величина втрат в мережах електроенергії України та електропостачання АТ «Укрзалізниця»

Тип електростанції	Середній вклад в енергосистему України P_{EG} $MВт\cdot год$	Відсоток вкладу в енергосистему України, %	Середній ККД [1-2] η_{ef} %	Втрати електроенергії в мережах України [1], %	Втрати електроенергії в мережах АТ «Укрзалізниця» [17-18], %
АЕС	9072,03	56,97	25	15	на постійному струмі: 12,11 на змінному струмі: 11,6
ТЕЦ	1326,84	8,33	31		
СЕС, ВЕС, СБ	868,79	5,46	12,5...25		
ТЕС	3714,99	23,33	31		
ГЕС	785,29	4,93	90...93		
ГАЕС	156,83	0,98	88...91		

Згідно з табл. 1 та рис. 3 єдиним джерелом безпосередніх викидів CO_2 в атмосферу є ТЕС та ТЕЦ, хімічна основа яких покладена в процесі окислення твердих, рідких чи газоподібних палив. При цьому будемо розглядати тільки процес перетворення хімічної енергії

безпосередньо на ТЕЦ та ТЕС і не будемо враховувати викиди CO_2 при видобутку, транспортуванні та зберіганні палив.

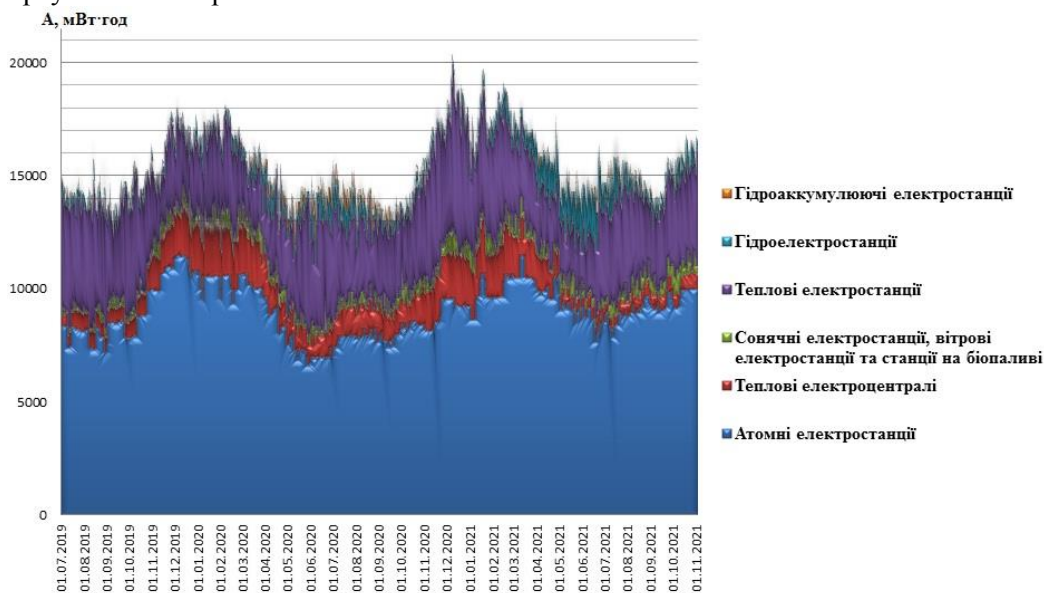


Рис. 3. Графічне зображення електрогенеруючих потужностей та їх вкладу в загальну енергосистему України на обраному проміжку часу

Згідно з даними НЕК «УКРЕНЕРГО» на розглянутому проміжку часу середній вклад встановленої потужності в енергосистему України блоків що працюють на вугіллі антрацитової групи, газової групи та на газу наведено в таблиці 3. Приведемо в таблиці 2 хімічний склад основних теплотворних елементів вказаних палив згідно даних [3] для аналізу. Для визначення питомої теплоти згоряння скористаємося формулою:

$$q = \frac{(Q_C \cdot k_C + Q_H \cdot k_H + Q_S \cdot k_S) \cdot k_{KP}}{100}, \quad (2)$$

де Q_C, Q_H, Q_S – кількість теплової енергії що утворюється при спалюванні вуглецю (C), водню (H) та сірки (S), МДж/кг;

k_C, k_H, k_S – відсоток вмісту в масі кожного елементу;

k_{KP} – коефіцієнт кореляції на нагрів повітря, не ідеальність процесу окислення та суміші в паливі.

Результати розрахунку та вхідні значення обліку питомої теплоти згоряння для різних типів викопних палив наведемо у таблиці 3. Розрахунок величини відрахувань (за ETS) з електроенергії відповідної групи палива (Δ_i) пропонується здійснювати за формулою:

$$\Delta_i = \frac{E_{CO_2} \cdot d_{EVRO}}{10^3 \cdot (P_{TEЦ} + P_{TEC}) \cdot k_{en}}, \quad (3)$$

де E_{CO_2} – кількості викидів CO_2 при роботі енергоблоку на відповідному типі палива, т·год;

d_{EVRO} – вартість квоти по системі ETS, $d_{EVRO} = 50$ євро/т;

$P_{TEЦ}, P_{TEC}$ – відповідно середній вклад в енергосистему України протягом 1 год, МВт·год;

k_{en} – відсоток впливу в загальному виробництві ТЕЦ і ТЕС, %.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Таблиця 2. Енергетичні характеристики типів палив які застосовуються для виробництва електроенергії на ТЕС та ТЕЦ України й дизельного палива яке використовуються на тепловозах АТ «Укрзалізниця»

Група палива	C, %	H, %	S, %	k_{KP}	Питома теплота згоряння q , МДж/т
Вугілля антрацитові (Anthrazit)	91,5	5,3	1	1,21	31056,03
Вугілля газові (Gaskohle)	86,2	3,75	1	1,21	27813,14
Газ (трубопровідний)	71,25	23,75	0	1,32	43073,86
Дизельне паливо	86	13,3	0,15	1,11	42319,75
Кількість теплової енергії при спалюванні Q , МДж/кг	32,8	141	9,28		

Для обчислення кількості викидів CO_2 відповідної групи палива (E_{CO_2}) пропонується скористатися виразом:

$$E_{CO_2} = \frac{k_C \cdot M_{CO_2} \cdot 3600 \cdot k_{en} \cdot (P_{ТЕЦ} + P_{ТЕС})}{M_C \cdot q \cdot k_{ef} \cdot 100}, \quad (4)$$

де M_{CO_2} , M_C – відповідно молярна маса CO_2 та C, $M_{CO_2} = 44 \text{ г/моль}$, $M_C = 12 \text{ г/моль}$;

3600 – перевідний коефіцієнт з МВт в МДж;

k_{ef} – середній відсоток ККД ТЕС та ТЕЦ.

Визначення загальної величини відрахувань (за ETS) з електроенергії (Δ_K) пропонується здійснювати за формулою:

$$\Delta_K = \frac{k_{EC} \cdot p_1 \cdot \sum_{i=1}^l \Delta_i \cdot k_{en_i}}{10000}, \quad (5)$$

де p_1 – сумарний відсоток вкладу ТЕС і ТЕЦ в енергосистему України, $p_1 = 31,66$;

l – кількість груп палива, $l=3$;

k_{EC} – коефіцієнт збільшення втрати електроенергії в мережах України.

Величину кількості викидів CO_2 дизельного палива (${}^{ном} E_{CO_2}^{менл}$) на номінальному режимі роботи та холостому ході пропонується визначати виразом:

$${}^{ном} E_{CO_2}^{менл} = \frac{k_C \cdot M_{CO_2} \cdot G_{ном}}{M_C \cdot 100}, \quad (6)$$

де $G_{ном}$ – витрати палива на номінальному режимі, для тепловозу 2ТЕ116 $G_{ном} = 0,920 \text{ т}$.

Для визначення кількості викидів CO_2 дизельного палива (${}^{XX} E_{CO_2}^{менл}$) на холостому ході підставимо замість $G_{ном} \rightarrow G_{XX} = 0,03 \text{ т}$.

Тоді для обліку загальної величини відрахувань (за ETS) з 1 кВт отриманої потужності тепловозу 2ТЕ116 ($\Delta_K^{менл}$) пропонується виконувати за формулою:

$$\Delta_K^{менл} = \frac{E_{CO_2}^{менл} \cdot d_{EVRO}}{P_e}, \quad (7)$$

де P_e – потужність тягового рухомого складу на номінальному режимі та холостому ході, для 2ТЕ116 відповідно ${}^{ном} P_e = 4500 \text{ кВт}$ та ${}^{XX} P_e = 32,5 \text{ кВт}$.

Результати розрахунку E_{CO_2} та Δ для кожного типу викопного палива й загального Δ_K в

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

енергобалансі країни, що застосовується на ТЕС и ТЕЦ України, й дизельного палива тепловозу 2ТЕ116 зведемо до таблиці 3.

Таблиця 3. Результати розрахунку кількості викидів CO₂ та відрахувань ТВО (за ETS) різних груп палива при виробництві електроенергії в Україні та на тепловозі 2ТЕ116

Група палива	$k_{ТЕС+ТЕЦ}, \%$	$k_{env}, \%$	E_{CO_2}, t	$k_{ЕС} [1]$	$\Delta_i, \text{євро}/\text{кВт}\cdot\text{год}$
Вплив вугілля антрацитової групи	14,55	45,95	2906,44	1,15	0,0627
Вплив вугілля газової групи	10,38	32,79	2181,72		0,0660
Вплив трубопроводного газу	6,73	21,26	754,98		0,0352
	$\Sigma p_i=31,66$	$\Sigma=100$	$\Sigma=5843,14$		$\Delta_K=0,0211$
Теплотяга (тепловоз 2ТЕ116)					
Дизельне паливо	$^{ном} E_{CO_2}^{тепл} = 2,9 t$	$^{XX} E_{CO_2}^{тепл} = 0,09 t$	$^{ном} \Delta_K^{тепл} = 0,0322$	$^{XX} \Delta_K^{тепл} = 0,0011$	

Враховуючі дані з таблиці 1, а саме втрати електроенергії в системі енергопостачання АТ «Укрзалізниця», отримаємо величину вартості відрахувань (за ETS) - для постійного струму: $\Delta_K^- = 0,0237 \text{ євро}/\text{кВт}\cdot\text{год}$; для змінного струму: $\Delta_K^+ = 0,0235 \text{ євро}/\text{кВт}\cdot\text{год}$. Тоді враховуючи типи тягового рухомого складу кількість викидів CO₂ ($E_{CO_2}^{заз}$) та величина суми оподаткування (Δ) будуть визначатись за виразами:

$$\Delta = A \cdot \Delta_K, \quad (8)$$

$$E_{CO_2}^{заз} = \frac{\Delta}{d_{EVRO}}, \quad (9)$$

де A – годинні витрати електроенергії в номінальному режимі або на холостому ході тяговим рухомих складом, $\text{кВт}\cdot\text{год}$.

Для теплотягового рухомого складу в виразі (8) замість годинних витрат електроенергії в номінальному режимі чи на холостому ході необхідно підставити годинну потужність тепловозу відповідно на номінальному режимі (для тепловозу 2ТЕ116 $^{ном} P_e = 4500 \text{ кВт}$) та на холостому ході (для тепловозу 2ТЕ116 $^{XX} P_e = 32,5 \text{ кВт}$). Зведемо отримані дані та співставимо з паспортними характеристиками рухомого складу та наведемо в табл. 4.

Таблиця 4. Паспортні характеристики обраних типів тягового рухомого складу

Серія ТРС	ВЛ8	ВЛ11	ВЛ80С	ВЛ82М	2ТЕ116
Потужність, кВт	3656	4529	5956	5588	4500
ККД	0,896	0,88	0,899	0,847	0,293
Зчіпна вага, т	184	184	190	200	276
Годинні витрати електроенергії (кВт·год) чи палива (кг) в номінальному режимі	4080	4980	6625	6600	920,0
Годинні витрати електроенергії (кВт·год) чи палива (кг) на холостому ході	129	129	50	160	30
Годинні $^{ном} E_{CO_2}^{заз}, t$	1,93392	2,36052	3,11375	$3,1284^{\sim}$ $3,102^{\sim}$	2,898
Годинні $^{XX} E_{CO_2}^{заз}, t$	0,061146	0,061146	0,0235	$0,07584^{\sim}$ $0,0752^{\sim}$	0,02093
Годинна $^{ном} \Delta, \text{євро}$	96,70	118,03	155,69	$156,42^{\sim}$ $155,1^{\sim}$	144,90
Годинна $^{XX} \Delta, \text{євро}$	3,0573	3,0573	1,175	$3,792^{\sim}$ $3,76^{\sim}$	1,05

Примітка. = - постійний струм; \sim - змінний струм

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Існуючий підхід розрахунку норми витрат електричної енергії, для електрорухомого складу, та палива, для теплотяги, згідно [14, 17] виконують за виразами:

$$e = e_0 \cdot K_w \cdot K_q \cdot K_i \cdot K_\tau + z' \cdot (\Delta e_\tau + \Delta e_p) + e_d \cdot (K_d + \Theta_C \cdot K'_d), \quad (10)$$

$$n = n_0 \cdot K_w \cdot K_q \cdot K_i \cdot K_\tau \cdot K_{T.C.} + z' \cdot \Delta n_\tau + n_x \cdot K_x + \Theta_C \cdot K'_x \cdot n_x, \quad (11)$$

де e_0, n_0 – відповідно вихідні норми витрат електроенергії та дизельного палива, які визначаються тягово-енергетичним паспортом локомотива, $\text{кВт год}/10 \text{ тис. т.км.бр}$ та $\text{кг}/10 \text{ тис. т.км.бр}$;

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

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

K_i – коефіцієнт складності нормованої дільниці;

K_τ – температурний коефіцієнт нормованого періоду;

$K_{T.C.}$ – коефіцієнт який враховує технічний стан локомотива;

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

$\Delta e_\tau, \Delta n_\tau$ – відповідно витрати електроенергії та дизельного палива на відновлення кінетичної енергії, втраченої при гальмуванні, $\text{кВт год}/10 \text{ тис. т.км.бр}$ та $\text{кг}/10 \text{ тис. т.км.бр}$;

Δe_p – витрати електроенергії для електровозів постійного струму в реостатах при русанні та розгоні, $\text{кВт год}/10 \text{ тис. т.км.бр}$;

e_d – витрати електроенергії на допоміжні машини локомотива, $\text{кВт год}/10 \text{ тис. т.км.бр}$;

K_d, K'_d – відповідно коефіцієнти використання потужності допоміжних машин електровоза в ходу та на стоянках, отриманих як частина номінальної потужності, фактично використаної для обслуговування локомотивів;

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

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

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

Θ_C – коефіцієнт стоянкового часу, як відношення часу зупинок, передбачених розкладом руху, до загального часу руху поїзда.

Розіб'ємо маршрути, зображені на рисунку 2, на плечі обслуговування локомотивами за типом тягового рухомого складу, їх протяжністю (L) та еквівалентний підйомом без обліку сил інерції (i_e) й зведемо до таблиці 5. При цьому маршрут №2 розіб'ємо на два маршрути – перший з яких враховує нестачу електровозів подвійного струму живлення, а другий – їх повну наявність.

Таблиця 5. Плечі обслуговування за типом тягового рухомого складу та їх протяжністю

Тягові плечі	Тип тягового рухомого складу					$L, \text{ км}$ $i_e, \%$
	ВЛ8	ВЛ11	ВЛ80С	ВЛ82М	2ТЕ116	
Маршрут прямування №1						
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний			•			74 +0,11
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Харків-Сортувальний				•		135 +1,17
№3 Харків-Сортувальний - Новомосковськ-Дніпровський		•				266 +1,48

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Закінчення таблиці 5

Маршрут прямування №2а						
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний			•			74 +0,11
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Граково			•			64 +0,54
№3 Граково - Красноград		•				148 +1,32
№4 Красноград - Новомосковськ-Дніпровський					•	98 +0,21
Маршрут прямування №2б						
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний			•			74 +0,11
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Красноград				•		212 +1,12
№3 Красноград - Новомосковськ-Дніпровський					•	98 +0,21
Маршрут прямування №3						
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний			•			74 +0,11
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Лиман				•		100 +0,17
№3 Лиман - Новомосковськ-Дніпровський	•					270 +1,52

Причина наявності короткого плеча обслуговування «Валуйки – Куп'янськ – Сортувальний» транзитних потоків вантажів заснована на проходженні прикордонного, митного та контролю з боку служб безпеки обох країн та вимогою до локомотивної бригади прослідувати без зупинок на проміжних станціях й на шляху слідування після проходження контролю.

Розглянемо вантажний поїзд вагою 4018 т брутто сформований з 49 4-ох вісних напіввагонів, на підшипниках кочення, навантажених вугіллям, температура слідування +10 °С. Згідно графіку руху поїздів (в частині встановлення часу перегінного ходу вантажного поїзда) встановимо швидкості руху (використавши таблицю 5) на кожному тяговому плечі та сформуємо таблиці 6-7. Норми витрат електроенергії згідно тягово-енергетичних паспортів [17] (для змінного і постійного струму ВЛ82м врахуємо на базі відстаней станцій стикування).

Таблиця 6. Нормування витрат енергії по дільницям 1 і 3 маршрутів прямування

Номер тягового плеча	Маршрут прямування №1			Маршрут прямування №3		
	№1	№2	№3	№1	№2	№3
Швидкість руху, км/год	47,99	46,95	48,33	47,99	51,7	51,4
e_0 , кВт·год/10 тис. т.км.бр	56,6	55,6	62,9	56,6	56,4	54,3
K_w	1	1	1	1	1	1
K_q	0,923	0,924	0,923	0,923	0,920	0,920
K_i	1,057	1,499	1,655	1,057	1,085	1,657
K_τ	1,022	1,022	1,022	1,022	1,022	1,022
z'	0	0	0	0	0	0
e_d , кВт·год/10 тис. т.км.бр	3,63	9,28	6,95	3,63	8,42	6,54
K_d	1	1	1	1	1	1
e , кВт·год/10 тис. т.км.бр	60,06	87,98	105,15	60,06	65,96	91,14
A , кВт·год	1785,91	4772,54	11238,06	1785,91	2650,15	9887,22

Таблиця 7. Нормування витрат енергії по дільницям 2а і 2б маршрутів прямування

Номер тягового плеча	Маршрут прямування №2а				Маршрут прямування №2б		
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3
1	2	3	4	5	6	7	8
Швидкість руху, км/год	47,99	47,84	48,17	39,18	47,99	47,99	39,18

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Закінчення таблиці 7

e_0 , кВт·год/10 тис. т.км.бр	56,6	56,5	62,8	-	56,6	56,9	-
n_0 , кг/10 тис. т.км.бр	-	-	-	15,9	-	-	15,9
K_w	1	1	1	1	1	1	1
K_q	0,923	0,923	0,923	0,931	0,923	0,923	0,931
K_i	1,057	1,165	1,571	1	1,057	1,468	1
K_τ	1,022	1,022	1,022	1,012	1,022	1,022	1,012
$K_{T.C.}$	-	-	-	1,14	-	-	1,14
z'	0	0	0	0	0	0	0
e_D , кВт·год/10 тис. т.км.бр	3,63	3,64	6,98	-	3,63	9,08	-
K_D	1	1	1	-	1	1	-
n_X , кг/10 тис. т.км.бр	-	-	-	2,22	-	-	2,22
K_X	-	-	-	0,3	-	-	0,3
e , кВт·год/10 тис. т.км.бр	60,06	65,73	100,05	-	60,06	87,87	-
n , кг/10 тис. т.км.бр	-	-	-	17,74	-	-	17,74
A , кВт·год	1785,91	1690,28	5949,34	-	1785,91	7485,21	-
G , кг	-	-	-	698,69	-	-	698,69

Отримані величин витрат електроенергії A та дизельного палива G (таблиці 6-7) використаємо для встановлення результуючих значень величин викидів $E_{CO_2}^{3a2}$ та вартості відрахувань Δ (згідно ETS) за маршрутами слідування вантажного поїзду використавши таблиці 4-5 та формули (8-9), результати розрахунку зведемо в результуючу таблицю 8. Однак для теплотяги встановлення результуючих значень величин викидів $E_{CO_2}^{3a2}$ неможливо обчислити за виразом (9) оскільки в формулі (8) облік йде через необхідну витрату електроенергії, що є аналогом середньої ефективної потужності. Тому пропонується масу викидів CO_2 визначати за рівнянням (6) із заміною витрати палива на номінальному режимі $G_{ном}$ на фактичну. Тоді вартість відрахувань Δ (згідно ETS) є добуток d_{EVRO} на $E_{CO_2}^{3a2}$.

Таблиця 8. Результуючі значення величин викидів та вартості відрахувань (згідно ETS) за маршрутами прямування вантажного поїзда

Тягові плечі	Δ , євро			$E_{CO_2}^{3a2}$, т		
1	2			3		
Маршрут прямування №1						
	ВЛ80С	ВЛ82М	ВЛ11	ВЛ80С	ВЛ82М	ВЛ11
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний	41,97	-	-	0,84	-	-
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Харків-Сортувальний	-	112,63	-	-	2,25	-
№3 Харків-Сортувальний - Новомосковськ-Дніпровський	-	-	266,34	-	-	5,33
	$\Sigma=420,94$			$\Sigma=8,42$		

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Закінчення таблиці 8

Маршрут прямування №2а						
	ВЛ80С	ВЛ11	2ТЕ116	ВЛ80С	ВЛ11	2ТЕ116
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний	41,97	-	-	0,84	-	-
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Граково	39,72	-	-	0,79	-	-
№3 Граково - Красноград	-	141,00	-	-	2,82	-
№4 Красноград - Новомосковськ-Дніпровський	-	-	110,16	-	-	2,20
	Σ=332,85			Σ=6,66		
Маршрут прямування №2б						
	ВЛ80С	ВЛ82М	2ТЕ116	ВЛ80С	ВЛ82М	2ТЕ116
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний	41,97	-	-	0,84	-	-
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Красноград	-	176,65	-	-	3,53	-
№3 Красноград - Новомосковськ-Дніпровський	-	-	110,16	-	-	2,20
	Σ=328,78			Σ=6,58		
Маршрут прямування №3						
	ВЛ80С	ВЛ82М	ВЛ8	ВЛ80С	ВЛ82М	ВЛ8
№1 Валуйки - Куп'янськ-Сортувальний	41,97	-	-	0,84	-	-
№2 Куп'янськ-Сортувальний - Лиман	-	62,28	-	-	1,25	-
№3 Лиман - Новомосковськ-Дніпровський	-	-	234,33	-	-	4,69
	Σ=338,57			Σ=6,77		

Для обліку загальної собівартості перевезень вантажів врахуємо тариф на електроенергію з енергоринку та вартість закупівлі палива через систему державних закупок. Згідно з ідентифікатором закупок UA-2021-10-20-013322-b, ID номера a64e3908ca144e81848f28f9e303 a627 та ідентифікатору плану UA-P-2021-10-20-002636-c як замовника «Філія «Центр будівельно-монтажних робіт та експлуатації будівель і споруд» Акціонерного товариства «Українська залізниця»» планується закупівля 70470 літрів дизельного палива на суму 2031650,10 гривень, що в перерахунку вартості 1 кг (при перевідному коефіцієнті 0,8435, як такого що відповідає листопаду місяцю на виробничих підрозділах Південної залізниці) складе 34,18 грн/кг, тоді згідно курсу НБУ на 08.11.2021 (30,0969 грн/1 євро) вартість складе ≈1,14 євро/кг. Середня вартість 1 кВт·год електричної енергії, згідно даних ТОВ «Українська енергетична біржа» що є площадкою торгів на Україні, в період з 01.11.2021 по 08.11.2021 склала 3,56 грн/кВт·год, що в перерахунку за курсом НБУ складе 0,12 євро/кВт·год.

Кошторисну інформацію використаємо для формування результуючої таблиці 9, як такої, що покаже економічну доцільність маршрутів руху транзитних чи місцевих вантажних поїздів під впливом нормування витрат енергії та екологічних аспектів в нормоутворенні заснованих на ТВО ETS й принципах країн учасників, у тому числі Україна, Glasgow climate change conference.

Як видно з таблиці 10 критерій максимізації екологізації транспорту пролягає маршрутом слідування №2б - за критеріями викидів емісії парникового газу CO₂ та вартості відрахувань ТВО згідно ETS. З економічної точки зору (за результатами приведеніми в таблиці 9) доцільним є маршрут слідування №3, що підводить спеціалістів залізниць до патової ситуації з вибору екологічної безпеки транспорту чи економічної ефективності функціонування галузі.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Таблиця 11. Вартість перевезення за обраними маршрутами прямування вантажних поїздів

Номер маршруту прямування	Собівартість перевезень C за нормуванням енергоресурсів за номером плеч, <i>євро</i>				$\sum_{t=1}^4 C_t$, <i>євро</i>	$\sum_{t=1}^4 C_t + \Sigma$, <i>євро</i>
	№1	№2	№3	№4		
№1	214,31	572,70	1348,57	-	2135,58	2556,52
№2а	214,31	202,83	713,92	796,50	1927,57	2260,42
№2б	214,31	898,23	796,50	-	1909,04	2237,82
№3	214,31	318,02	1186,47	-	1718,79	2057,37

Використання запропонованих методів взаємовпливу екологічних аспектів та нормування енергоресурсів на тягу поїздів дозволить підвищити контроль, зменшити викиди та витрати паливно-енергетичних ресурсів. Проте дана методика потребує масової практичної апробації на виробництві, роботи з корегування показників викидів під впливом технічного стану силового обладнання енергосистеми України та АТ «Укрзалізниці», й повної переоцінки життєвого циклу тягового рухомого складу на базі відрахувань ТВО згідно ETS в розрахунковому періоді.

Висновки. Виконано аналіз існуючої методики обліку викидів шкідливих речовин. Розглянуто реальну логістичну мережу транспортування потоків транзитних та місцевих вантажів. Встановлено енергогенеруючий вплив (за типом електростанції) в енергосистемі України та величину викидів CO₂ на годину їх роботи. Визначено величину відрахувань вуглецевого податку та кількість викидів транспортним потоком за маршрутами слідування. Встановлено економічну та екологічну вартість перевезень. В подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та перевести запропоновану модель в програмний продукт й запровадити в локомотивне господарство, диспетчеризацію логістичних потоків вантажів з метою зниження ресурсів на тягу, екологічного навантаження транспорту та масової практичної апробації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Халатов А.А. Энергетика Украины: современный стан та найближчі перспективи // Вісник НАН України. 2016, №6. С.53-61.
2. Черноусенко О.Ю. Стан енергетики України та результати модернізації блоків ТЕС // Проблеми загальної енергетики. 2014, №4 (39). С.20-28.
3. Eberhard Lindner Chemie für Ingenieure. Lindner Verlag Karlsruhe, 1997. pp. 258.
4. J.N. Popp, Sean P Boyle Railway ecology: Underrepresented in science? // Basic and Applied Ecology. Volume 19, December 2017, pp 84-93.
5. Pylypchuk O.Ya. Ecological activity on a railway transport: her essence, actual tasks, place and role in the national ecological policy of ukraine // Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. Volume 3(259), February 2020, pp 48-53.
6. Rafael Barrientos, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua Railway ecology. Springer International Publishing, 2017, pp. 337
7. Zdenek Keken, Tomáš Kušta Railway Ecology—Experiences and Examples in the Czech Republic // Railway Ecology. February 2020, pp 247-260.
8. Daszkiewicz P., Andrzejewski M., Tomaszewski S., Rymaniak Łukasz. Economic and ecological analysis of vehicles used in railways // Transport Economics and Logistics. Volume 81, March 2019, pp 57-69.
9. Strelkov A., Teplykh S. Ecological and economic efficiency of the life cycle of railway territorial-industrial complexes // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Volume 775, February 2020, pp 1-6.
10. 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.
11. Фалендиш А.П., Гатченко В.О., Клецка О.В., Кіріцева О.В., Барібін М.А. Модель визначення характеристик режимних карт ведення поїзда // Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології» 2020., №36. С.102-112.
12. Barybin M., Falendysh A., Hachenko 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.

13. Фалендиш А.П., Гатченко В.О., Возненко С.В., Клецка О.В., Барибін М.А. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках // Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології» 2020., №35. С.102-112.

14. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей жезнодорожного транспорта Москва: УМК МПС России, 2010. 592 с.

15. Rahman M., Chin H., Haque M. Environmental sustainability of urban road transport: an integrated analysis for lifecycle emission impact // International J. of Environment and Sustainable Development. Volume 2 (13), April 2014 pp. 126–141.

16. Rafael Barrientos, Fernando Ascensão, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences // European Journal of Wildlife Research Volume 65(1), January 2016, pp. 1-9.

17. 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.

18. Наказ №204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці. - Введ. 2014-05-16. – Київ, 2014. - 10 с.

REFERENCES

1. Khalatov A.A. (2016) Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan ta naiblyzhchi perspektyvy [Energy sector of Ukraine: current state and immediate prospects]. Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr., 6, 53-61 [in Ukraine].

2. Chernousenko O.Y. (2014) Stan enerhetyky Ukrainy ta rezultaty modernizatsii blokiv TES [State of energy of Ukraine and results of modernization of TPP units]. Problems of general energy, 4, 39, 20-28 [in Ukraine].

3. Eberhard Lindner (1997) Chemie für Ingenieure. Lindner Verlag Karlsruhe. [in Germany]

4. J.N. Popp, Sean P Boyle (2017) Railway ecology: Underrepresented in science? Basic and Applied Ecology. Volume 19, 84-93 [in United Kingdom].

5. Pylypchuk O.Ya. (2020) Ecological activity on a railway transport: her essence, actual tasks, place and role in the national ecological policy of Ukraine. Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. Volume 3(259), 48-53 [in Ukraine].

6. Rafael Barrientos, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua (2017) Railway ecology. Springer International Publishing. [in Switzerland]

7. Zdenek Keken, Tomáš Kušta (2020) Railway Ecology – Experiences and Examples in the Czech Republic/ Railway Ecology. 247-260. [in Switzerland].

8. Daszkiewicz P., Andrzejewski M., Tomaszewski S., Rymaniak Łukasz. (2019) Economic and ecological analysis of vehicles used in railways. Transport Economics and Logistics. Volume 81, 57-69 [in Poland].

9. Strelkov A., Teplykh S. (2020) Ecological and economic efficiency of the life cycle of railway territorial-industrial complexes. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Volume 775, 1-6 [in Russia].

10. 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 [in United Kingdom].

11. Falendysh A. P., Gatchenko V. A., Kletska O. V., Kiritseva O. V., Barybin M. A. (2020) Model vyznachennia kharakterystyk rezhymnykh kart vedennia poizda [Model for determining the characteristics of regime maps of train management]. Collection of scientific works of DUIT. Series "Transport systems and technologies", 36, 102-112 [in Ukraine].

12. Barybin M., Falendysh A., Hachenko 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 [in Ukraine].

13. Falendysh A. P., Gatchenko V. A., Voznenko S. V., Kletska O. V., Barybin M. A. (2020) Matematychni modeliuvannia osnovnykh parametriv u tiahovykh rozrakhunkakh [Mathematical modeling of basic parameters in traction calculations]. Collection of scientific works of DUIT. Series "Transport systems and technologies", 35, 132-140 [in Ukraine].

14. Osipov S.I., & Osipov S.S. (2010) Osnovy tyagi poyezdov [Principles of traction]. Moscow: UMC MPS of Russia [in Russia].

15. Rahman M., Chin H., Haque M. (2014) Environmental sustainability of urban road transport: an integrated analysis for lifecycle emission impact. International J. of Environment and Sustainable Development. Volume 2 (13), 126–141 [in United Kingdom].

16. Rafael Barrientos, Fernando Ascensão, Pedro Beja, Henrique Miguel Pereira, Luis Borda de Agua (2016) Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences. European Journal of Wildlife Research. Volume 65(1), 1-9 [in Spain].

17. Instrukciya po tehničnomu normuvanniu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059) [Instructor po tehničnomu normuvanniu vitrat elektrichnoyi energiyi i paliva lokomotivami na tyagu poyizdiv (CT-0059)]. Order 062-C from 05.03.2003 Kiev: Joint-Stock Company Ukrzaliznytsia [in Ukraine].

18. 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 Ukraine].

Barybin Mykola Anatoliiovych¹, Karashchuk Viktoriia Alexandrovna², Kletskaya Olga Vitalievna³, Kiritseva Elena Viktorovna⁴, Dzhus Volodymyr Stepanovych⁵

¹ Department of "Heat Engineering, heat engines and energy management", Ukrainian State University of railway transport, 7 Feuerbach square, Kharkiv, 61050, Ukraine

² Department " Electromechanics and railway rolling stock", State University of infrastructure and technologies, 9 Kirillovskaya STR., Kiev, 04071, Ukraine

³ Department "Transport technologies of enterprises", state higher educational institution Priazovsky State Technical University, Universitetskaya STR., 7, Mariupol, 87555, Ukraine

⁴ Department of "Transport technologies of enterprises", state higher educational institution Priazovsky State Technical University, Universitetskaya STR., 7, Mariupol, 87555, Ukraine

⁵ Department of "Rolling stock and tracks", Lviv branch «Dnipro National University of railway transport named after academician V. Lazaryan», 12A I. Blazhkevich STR., Lviv, 79052, Ukraine

MODEL OF THE MUTUAL INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL ASPECTS AND ENERGY RATIONING ON TRAIN TRACTION IN RAILWAY LOGISTICS

The article deals with the issues of environmental taxation of carbon dioxide emissions by the countries of the European Union and the methodology for calculating the amount of emissions by regulatory documents of Ukraine. It is established that our country's methodology is not adapted to real operating conditions under the influence of cross-border carbon taxation and the "Emissions Trading System". A mathematical model of the impact of power generating stations of states and their contribution to the overall energy balance of the country on the environmental cost and mass emissions of 1 kWh of electricity generation is proposed. The amount of electricity losses during its transportation from the power plant to the electric moving warehouse is determined and is taken into account in the total amount of deductions for the "Emissions Trading System" for DC and AC railway networks. Schemes of transit and local cargo routes are considered on the basis of a real fleet of traction rolling stock of Railways and a network of logistics lines. The passport characteristics of locomotives are analyzed and the amount of emissions and deductions during operation at Rated mode and idle speed is determined. Specific norms for selected routes and train conditions are calculated. The total costs, their cost and the amount of emissions and taxation of selected routes are determined, and rational economic and environmental logistics lines of train traffic are determined on their basis.

Keywords: *cost rationing, carbon dioxide emissions, energy resources, mathematical modeling, traction rolling stock, environmental indicators, transportation logistics.*

¹ Доцент, Кафедра транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9545-5002>

* Автор, відповідальний за листування: potaman81@ukr.net

ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖІ ДОСТАВКИ ТАРНО-ШТУЧНИХ ВАНТАЖІВ

Формування раціональної маршрутної мережі сприяє своєчасному і безперебійному виконанню поставок продукції та більш ефективній взаємодії організацій-постачальників, організацій-одержувачів та автотранспортних організацій. Однак у даний час все більшого значення починають набувати питання підвищення рівня транспортного обслуговування клієнтів, які в ринкових умовах господарювання тісно пов'язані з проблемою сервісу і якості надання послуг. Під якістю перевезень слід розуміти здатність автотранспортної галузі задовольняти потреби підприємств і населення в транспортному обслуговуванні з мінімальними витратами. Таким чином, постає питання формування раціональної маршрутної мережі, яка б підвищувала якість обслуговування клієнтів з мінімальними витратами. Використання економіко-математичних методів та інформаційних технологій при формуванні раціональної маршрутної мережі дозволяє отримати синергетичний ефект, а саме при зниженні загальних витрат, підвищити рівень якості обслуговування. Формування раціональної маршрутної мережі за запропонованим алгоритмом дозволяє визначити витрати на доставку вантажів та рівень обслуговування вантажовласників при зазначеній кількості диспетчерів та автомобілів на підприємстві та надати підприємствам практичні рекомендації по кількості диспетчерів та автомобілів, необхідних для задоволення потреб клієнтів зі зменшенням витрат на доставку та підвищенням рівня якості обслуговування.

Ключові слова: маршрутна мережа, вантажовідправник, вантажоодержувач, тарно-штучні вантажі, регресійна модель, загальні витрати, рівень якості.

Вступ. Формування раціональної маршрутної мережі дозволяє точно визначити обсяг перевезень та кількість автомобілів, що здійснюють ці перевезення з постачальницько-збутових підприємств, сприяє скороченню простою автомобілів під навантаженням і розвантаженням, ефективному використанню рухомого складу. Також формування раціональної маршрутної мережі дозволяє підвищити продуктивність автомобілів при одночасному зниженні кількості рухомого складу, що надходить на підприємство при тому ж обсязі перевезень [1-2].

Якщо використовуються раціональні маршрути при доставці вантажів та дотримуються строки поставки вантажів, то запаси споживачів можуть скорочуватися в 1,5-2 рази, що забезпечить зменшення витрат на складування. Необхідність формування раціональної маршрутної мережі обґрунтовується і тим, що створені маршрути дають можливість складати проекти поточних планів та оперативних заявок на транспорт, які виходять з оперативних даних щодо обсягів перевезень [3].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Формування раціональної маршрутної мережі забезпечує рух автомобілів за раціональним (оптимальним) маршрутом, це дає можливість зменшити пробіги без вантажу, збільшити коефіцієнт використання пробігу і продуктивність рухомого складу, а також збільшити рентабельність перевезень [4].

Існує багато методів рішення задач по формуванню раціональної маршрутної мережі доставки вантажів, деякі з них представлені в таблиці 1.

Використанням точних методів займалися такі автори як Міллер С, Таккер А, Белман Р, Хелд Й, Кари Р та інші. Найбільшим недоліком при використанні таких методів є те, що при збільшенні пунктів об'їзду іноді рішення задачі стає неможливим [5].

Таблиця 1. Методи формування раціональної маршрутної мережі

Назва методу	Різновид методу
Точні методи	Динамічне програмування Цілочисельне програмування Метод гілок і меж
Наближенні методи	Метод випадкового пошуку Метод локальної оптимізації Модифікації точних методів Евристичні методи

Використанням наближених методів займалися Бакаєв О.О., Воркут А.І., Геронімус Б.Л., Житков В.І., Ловецький С.С., Панов С.А., Просов С.Н. та інші. Аналіз виконаних робіт показує, що найбільш широкого застосування отримали методи агрегування початкової інформації, що передбачають зведення декількох пунктів регіону в один. Але слід відмітити, що поки не існує формалізованих правил агрегування [6-9].

В роботі [10] автором наведені результати визначення найбільш ефективних методів оперативного планування перевезення вантажів малими партіями в визначених сферах транспортного обслуговування.

Дослідження [11] присвячені визначенню закономірності впливу змінного попиту на результативність процесу перевезень, що сприяє підвищенню ефективності планування і управління транспортною системою доставки тарно-штучних вантажів у складних умовах великих міст.

Таким чином, аналіз існуючих досліджень доводить актуальність напрямку підвищення ефективності доставки вантажів за рахунок використання раціональної маршрутної мережі.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності роботи транспортно-експедиторських підприємств за рахунок формування раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів автомобілями ФОП «Луценко».

В роботі поставлені задачі по проведенню теоретичних та експериментальних досліджень по формуванню раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів та проведенню аналізу отриманих результатів дослідження.

Матеріали та методи дослідження. Одним із значних об'єктів докладання економіко-математичних методів та комп'ютерної техніки є автомобільний транспорт. З виникненням ринкових відносин докорінно змінився характер і умови роботи підприємств, що займаються вантажоперевезеннями. Широкий розвиток набула робота транспортно-експедиційних компаній, які дали можливість зосередити в руках автотранспортників інформацію про майбутні перевезення [12,13].

Економіко-математичні методи планування є засобом, що дає основу для вирішення багатьох важких проблем планування і управління. Застосування інформаційних технологій дозволяє здійснювати розрахунки зі складання оптимальних планів, визначаючи найкращий варіант з можливих [14, 15].

Одним з найважливіших завдань при розрахунку витрат доставки вантажів є складання оптимальних маршрутів руху рухомого складу. Завдання складання раціональних маршрутів є особливо актуальним, так як доставка тарно-штучних вантажів у логістичній системі є значно дорожчою, ніж доставка масових вантажів.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Для формування раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів у якості критерію ефективності в дослідженні прийняті загальні витрати ($Z_{заг}$) та рівень обслуговування (R)

$$\begin{cases} Z_{заг} = f(N_d, N_a) \rightarrow \min, \\ R = f(N_d, N_a) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1)$$

де N_d – кількість диспетчерів, осіб;

N_a – кількість автомобілів, од.

При цьому цільова функція буде представлена залежністю

$$\begin{cases} Z_{заг} = f(\tilde{Q}, \tilde{I}, [\tilde{N}_o, \tilde{N}_n]) \rightarrow \min, \\ R = f(\tilde{Q}, \tilde{I}, [\tilde{N}_o, \tilde{N}_n]) \rightarrow \max. \end{cases}, \quad (2)$$

де \tilde{Q} – обсяг партії вантажу, т;

\tilde{I} – інтервал надходження заявки, год.;

$[\tilde{N}_o, \tilde{N}_n]$ – регіон вантажовідправника та вантажоодержувача відповідно.

Обсяг партії вантажу, інтервал надходження заявки, регіон вантажовідправника та вантажоодержувача є випадковими величинами, оскільки ми не можемо з впевненістю сказати, які значення будуть приймати ці величини, так як попит на перевезення, інтервал надходження заявки не є постійними величинами, та залежать від багатьох факторів. Регіон вантажовідправника та вантажоодержувача також виступають випадковими величинами, оскільки ми не в змозі стверджувати в якому з представлених регіонів виникне необхідність перевезення вантажів.

Розглянемо випадок, коли відомі регіони вантажовідправника та вантажоодержувача, які можуть знаходитись в інтервалі від 1 до 4, тоді цільова функція матиме вигляд

$$\begin{cases} Z_{заг} = f(N_d, N_a, \tilde{Q}, \tilde{I}) \rightarrow \min, \\ R = f(N_d, N_a, \tilde{Q}, \tilde{I}) \rightarrow \max. \end{cases}, \quad (3)$$

Система обмежень для цільових функцій матиме вигляд

$$\begin{cases} N_d \geq 0; \\ N_a \geq 0, N_a \leq A_c; \\ \tilde{Q} \geq 0, \tilde{Q} < q_n^{\max}; \\ [\tilde{N}_o, \tilde{N}_n] = \{1...4\}; \end{cases}, \quad (4)$$

де \tilde{Q} – обсяг вантажів для перевезення, т;

q_n^{\max} – максимальна вантажопідйомність автомобіля, т;

A_c – облікова кількість автомобілів на АТП, од.

Для визначення відстані доставки наносимо територію України в масштабі на систему координат, приймаємо що довжина країни складає 1000 км, а ширина – 700 км. Так як в даній роботі прийнято, що територія України поділена на 4 регіони, отже після нанесення на систему координат кожний регіон отримує свої координати, а саме:

1 регіон (18; 6),

2 регіон (10; 3),

3 регіон (10; 9),

4 регіон (3; 6).

Для проведення розрахунків відстані доставки використовуємо наступну залежність

$$L_{i-j} = \sqrt{((x_i - x_j) \cdot \mu_x)^2 + ((y_i - y_j) \cdot \mu_y)^2}, \quad (5)$$

де μ_x – параметр масштабу по осі X ,

μ_y – параметр масштабу по осі Y .

Для подальших розрахунків приймаємо $\mu_x = 50$, а $\mu_y = 58,3$.

Алгоритм формування маршрутів складається з наступних етапів.

На першому етапі виконується оцінка попиту на перевезення, тобто проводиться формування сукупності заявок на перевезення: визначається регіон вантажовідправника та вантажоодержувача, цільові елементи, обсяги відправлення.

На другому етапі вирішується транспортна задача. Загальні витрат на доставку тарноштучного вантажу визначаються таким чином

$$Z_{заг} = Z_{1-3} + Z_4 \quad (6)$$

де Z_{1-3} – витрати на виконання процесу надходження заявки, процесу опрацювання заявки та процесу оформлення документації, грн.;

Z_4 – витрати на виконання процесу доставки вантажу, грн.

Витрати на виконання процесу надходження заявки, процесу опрацювання заявки та процесу оформлення документації

$$Z_{1-3} = Z\Pi_d \cdot N_d \quad (7)$$

де $Z\Pi_d$ – заробітна платня одного диспетчера, грн.;

N_d – кількість диспетчерів, од.

Витрати на виконання процесу доставки вантажу

$$Z_4 = Z_{пост} + Z_{зм} + Z_{нр} + Z_{фор} + Z_{ом}, \quad (8)$$

де $Z_{зм}$ – змінна складова витрат на транспортування вантажу, грн.;

$Z_{пост}$ – постійна складова витрат на транспортування вантажу, грн.;

$Z_{нр}$ – витрати на навантаження - розвантаження, грн.;

$Z_{фор}$ – витрати на формування маршруту, грн.;

$Z_{ом}$ – витрати на заморожування грошових коштів, грн.

$$Z_{пост} = S_{1ч} \cdot t_d, \quad (9)$$

де $S_{1ч}$ – постійна складова собівартості транспортування, грн./год.;

t_d – час доставки, год.

Змінна складова витрат на перевезення

$$Z_{зм} = S_{1км} \cdot L, \quad (10)$$

де $S_{1км}$ – змінна складова собівартості транспортування, грн./км;

L – відстань доставки, км.

Витрати на навантаження - розвантаження

$$Z_{нр} = S_{1ч} \cdot t_{нр}, \quad (11)$$

де $t_{нр}$ – час навантаження-розвантаження вантажу, год.

Витрати на формування маршруту

$$Z_{фор} = S_{1ч}^д \cdot t_{фор}, \quad (12)$$

де $S_{1ч}^д$ – собівартість 1 год роботи диспетчера, грн./год.;

$t_{фор}$ – час формування маршруту, год.

Витрати на заморожування грошових коштів

$$Z_{ом} = \frac{Q \cdot C_{1т} \cdot t_d \cdot \alpha}{365 \cdot 24 \cdot 100}, \quad (13)$$

де $C_{1т}$ – вартість 1 т вантажу, грн./т;

\tilde{Q} – обсяг партії вантажу, т;

α – коефіцієнт, враховуючий втрати в наслідок заморожування грошових коштів при здійсненні доставки вантажу, %/рік.

Час доставки можна розрахувати за такою формулою

$$t_d = \frac{L}{V}, \quad (14)$$

де V – швидкість сполучення, км/год.

Час навантаження та розвантаження для бортових автомобілів розраховуємо за формулою

$$t_{нр} = 2 \cdot \frac{(12 + 2 \cdot (Q - 1))}{60}. \quad (15)$$

Для визначення рівня обслуговування виконуємо такі дії:

при надходженні заявки перевіряємо чи є вільний диспетчер, який зможе прийняти заявку на обслуговування; якщо так – заявку починають обробляти;

з заявок, які надійшли, формуємо маятникові маршрути з зворотнім вантажним пробігом; заявки, які не можливо об'єднати в маршрут відхиляються;

перевіряємо чи є вільний транспортний засіб; якщо так, заявка обслуговується, виконується перевезення, якщо транспортний засіб відсутній – заявка відхиляється.

Для формування маршрутів використовуємо формулу

$$N_o^i = N_n^j, \quad (16)$$

де N_o^i – регіон вантажовідправника i -ї заявки,

N_n^j – регіон вантажоотримувача j -ї заявки.

Визначення рівня обслуговування розраховуємо за формулою

$$R = \frac{n_{\text{обсл}}}{n_{\Sigma}}, \quad (17)$$

де $n_{\text{обсл}}$ – кількість оброблених заявок, од.;

n_{Σ} – загальна кількість заявок, які надійшли на підприємство, од.

Параметрами потоку заявок у даній роботі виступають такі показники, як обсяг вантажу та інтервал надходження заявки. Потік заявок представляє собою сукупність заявок на послуги, що послідовно надходять на підприємство. Для потоку заявок числові характеристики виступають випадковими величинами.

Вхідними даними для проведення розрахунків є кількість диспетчерів, що приймають та обслуговують заявки, які надійшли на підприємство, кількість транспортних засобів, регіон вантажовідправника та вантажоотримувача, інтервал надходження заявки та обсяг перевезення.

Інтервал надходження заявки, обсяг перевезення, регіон вантажовідправника та вантажоотримувача є випадковими величинами, на які особа, що приймає управлінські рішення, немає впливу.

Кількість диспетчерів та кількість транспортних засобів є величина керована та може приймати значення, яке дорівнює 1, 3 або 5. В ході проведення експерименту проводимо дев'ять серій та п'ять дослідів.

На основі проведених розрахунків проводимо регресійний аналіз даних. Після проведення розрахунків цільова функція приймає наступний вигляд

$$\begin{cases} R = 0,017 + 0,128 \cdot N_d + 0,046 \cdot N_a; \\ Z_{\text{заг}} = 1314,75 + 1609,1 \cdot N_a + 2955,4 \cdot N_d. \end{cases} \quad (18)$$

Перевірка моделі на можливість її практичного застосування проводиться по критеріям точності, надійності та адекватності. Всі параметри повинні виконуватися одночасно. Невідповідність одному із критеріїв означає відсутність моделі як такової.

На підприємстві ФОП «Луценко» є два диспетчери, які приймають та обробляють заявки, та чотири автомобілі, які можуть виконувати ці перевезення. Інтервал надходження заявок описується експоненціальним законом розподілення, а математичне очікування складає 3 години. Відстань доставки описується нормальним законом, а математичне очікування дорівнює 500 км. Обсяг партії вантажу також описується нормальним законом розподілення, а математичне очікування складає 10 т.

Проводимо формування маршрутів з заявок, які прийняті до обслуговування. Для формування маршруту необхідно, щоб регіон вантажоодержувача i -ої заявки дорівнював регіону вантажовідправника j -ої заявки. Формуємо перший маршрут з заявки №1 та №5, так як регіон вантажоодержувача заявки №1 дорівнює регіону вантажовідправника заявки №5 і дорівнює 4-ому регіону. Аналогічно формуємо решту маршрутів. Результати розрахунків представленні рис. 1.

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

Заявка	Регіон вантажо-відправника	Регіон вантажо-отримувача	Інтервал надходжень, год., I	Час надходження	Диспетчери		Автомобіль			
					1	2	1	2	3	4
1	4	4	5,03	5,03	13,03		1=5(29,74)			
2	2	2	0,22	5,26		13,26		+		
3	2	3	2,34	7,59						
4	4	4	0,88	8,47						
5	4	2	13,26	21,74	29,74		+			
6	1	2	0,11	21,85		29,85		6=2(29,85)		
7	2	4	0,45	22,30						
8	3	3	0,39	22,69						
9	2	4	12,84	35,53	43,53				9=15(61,99)	
10	2	1	2,00	37,52		45,52				10=14(54,9)
11	2	2	0,79	38,31						
12	3	1	1,84	40,15						
13	4	3	2,69	42,84						
14	1	1	4,06	46,90	54,90					
15	4	2	7,10	53,99		61,99			+	+
16	2	2	0,80	54,80						
17	1	1	8,78	63,57	71,57		17=18(72,21)			
18	1	4	0,63	64,21		72,21	+			
19	4	3	2,62	66,82						
20	1	2	10,48	77,31	85,31			20=23(103,4)		
21	4	3	2,69	80,00		88,00				+
22	4	3	6,25	86,25	94,25				+	
23	2	2	9,15	95,40		103,4		+		
24	1	2	0,51	95,91	103,91				+	

Рис. 1. Елемент результатів формування маршрутів

Приводимо приклад розрахунку відстані доставки для заявки № 5 з регіону № 4 в регіон № 2

$$L_{4-2} = \sqrt{((3-10) \cdot 50)^2 + ((6-3) \cdot 58,3)^2} = 391 \text{ км.}$$

Для розроблених маршрутів перевезення розраховуємо загальні витрати на доставку та рівень якості обслуговування. Для формування раціональної маршрутної мережі доставки вантажів, та досягнення економічного ефекту пропонуємо розглянути можливі комбінації з кількості обслуговуючих диспетчерів та автомобілів. Запропоновані варіанти подані в табл. 2.

Таблиця 2. Результати розрахунків

Варіант	Кількість автомобілів од.	Кількість диспетчерів, од.	Сумарні середні витрати, грн.	Ваговий коефіцієнт	Рівень обслуговування	Ваговий коефіцієнт	Сумарний ваговий коефіцієнт
1	1	1	5704	1	0,248	7	8
2	1	3	11776	3	0,544	5	8
3	1	5	17756	6	0,464	6	12
4	3	1	9132	2	0,24	8	10
5	3	3	15170	5	0,664	3	8
6	3	5	20991	8	0,88	2	10
7	5	1	12530	4	0,24	8	12
8	5	3	17932	7	0,648	4	11
9	5	5	24083	9	0,92	1	10

Після проведення порівняльного аналізу для подальших розрахунків обираємо варіант №2, так як сумарний ваговий коефіцієнт найменший.

Оцінку економічного ефекту від формування раціональної маршрутної мережі доставки вантажів проводимо на підставі сумарних середніх витрат на доставку. Економічний ефект приймаємо як різницю сумарних середніх витрат на доставку між базовим варіантом, тобто витрати на доставку вантажів при обслуговуванні двома диспетчерами та чотирма автомобілями, та оптимальним (запропонована комбінація з диспетчерів та автомобілів після формування раціональної маршрутної мережі).

Сумарні середні витрати по базовому варіанту склали 12726 грн, по оптимальному варіанту дорівнюють 11776 грн. Проводимо розрахунок економічного ефекту

$$E = 12726 - 11776 = 950 \text{ грн.}$$

При цьому рівень обслуговування підвищився до 0,544.

Висновки. Проведений регресійний аналіз дозволив оцінити вплив параметрів маршрутів доставки на ефективність обслуговування вантажовласників та загальні витрати на доставку. Було визначено, що зі збільшенням кількості диспетчерів та кількості автомобілів рівень обслуговування та загальні витрати на доставку вантажів збільшуються.

Таким чином, використання раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів, визначеної у дослідженні, дозволить підприємству отримати економічний ефект розміром 950 грн при належному рівні обслуговування вантажовласників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Naumov, V. O. Shulika, D. Velikodnyi. Results of experimental studies on choice of automobile intercity transport delivery schemes for packaged cargo // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2015. V. 17. N 7. P. 87-91.
2. Нагорний Є.В., Наумов В.С., Шуліка О.О. Формування варіантів технології доставки тарно-штучних вантажів автомобільним транспортом у міжміському сполученні // Автомобільний транспорт : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ, 2013. Вып. 32. С. 61-66.
3. Наумов В.С. Основы повышения эффективности экспедиционного обслуживания на автомобильном транспорте: монография. Харьков: ХНАДУ, 2010. 144 с.
4. Blaik P. Logistyka. Konserpcja zintegrowanego zarzadzania Warszawa: PWE, 2010.
5. Нефедов Н.А. Относительная эффективность развозочных маршрутов // сб. науч. тр. Харьков: 2002. Вып.10. С.82-84.
6. Потаман Н.В, Варнаков В.І. Вибір раціональної технології доставки вантажів в міжміському сполученні // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. 2018. №2(243). С.179-184.
7. Karimi, H.R., Duffie, N., Freitag, M., Lütjen, M., & Chadli, M. Modeling, Planning, and Control of Complex Logistic Processes. *Mathematical Problems in Engineering*, 501, 184267. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/184267>
8. Россолов О.В., Потаман Н.В., Кіяшко Д.О. Визначення раціональних рівнів каналів розподілу продукції ДП «Артемсіль» // Науково-технічний збірник «Коммунальное хозяйство городов». 2017. №137 (2017). С.55-60
9. Наумов В. С. Оценка спроса на транспортно-экспедиционные услуги // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля: Наук. журнал. Луганськ. 2010. Вип. 4 (146). Ч. 1. С. 201 – 206.
10. Мороз О.В. Загальна постановка задачі, маршрутизації перевезень вантажів малими партіями // зб. наук. пр. Київ. 2003. Вип. 2. с.5
11. Шептура А.Н. Повышение эффективности автомобильных перевозок партионных грузов при переменном спросе на перевозки: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. / Шептура А.Н. – Харьков: ХНАДУ, 2004. –158 с.
12. Ye. Nagornij , O. Shulika, O. Severyn, O. Orda. Improving the efficiency of road transport companies by optimizing the costs of information and advertising activities // SHS Web of Conferences- EDP Sciences, 67, 03009 (2019)
13. Шуліка О. О. Формування процесу доставки тарно-штучних вантажів автомобільним транспортом у міжміському сполученні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01 - транспортні системи. – Харьков, ХНАДУ, 2017. 20 с.
14. N. Potaman, O.Shulika, O.Orda. Modelling of the route network for perishable cargo delivery in the regional traffic on the basis of petri nets // Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». 2021. №164 (2021). С.240-245
15. Яковлева Я.С., Дудніков О.М, Сокирко В.М. Удосконалення методики організації перевезення штучних дрібнопартійних вантажів автомобільним транспортом // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. 2009. No 2(9). С. 81–87.

REFERENCES

1. Naumov, V., Shulika, O., Velikodnyi, D. (2015) Results Of Experimental Studies On Choice Of Automobile Intercity Transport Delivery Schemes For Packaged Cargo. *Motrol. Commission Of Motorization And Energetics In Agriculture*, 17 (7), 87–91.
2. Nagornij Є.В., Naumov V.S., Shulika O.O. (2013) Formuvannya variantiv tekhnologii dostavki tarno-shtuchnikh vantazhiv avtomobil'nim transportom u mizhmis'komu spoluchenni [Formation of variants of technology of delivery of tare-piece cargoes by motor transport in long-distance communication] // *Avtomobil'nyj transport : sb. nauch. tr. / M-vo obrazovaniya i nauki Ukrainy, KHNADU*, 32, 61-66. [In Ukrainian].

3. Naumov V.S. (2010) *Osnovy povysheniya ehffektivnosti ehkspedicionnogo obsluzhivaniya na avtomobil'nom transporte* [Fundamentals of improving the efficiency of forwarding services in road transport] Kharkiv: KHNADU [In Russian]
4. Blaik, P. (2010). *Logistyka. koncepcja Zintegrowanego Zarządzania*. Pwe, Warszawa. [In Polish]
5. Nefedov N.A. (2002) *Otnositel'naya ehffektivnost' razvozhnykh marshrutov* [Relative efficiency of distribution routes]. *Sb. nauch. tr. Khar'kov, 10*, 82-84 [In Russian]
6. Potaman N.V., Varnakov V.I. (2018) *Vibir racional'noi tekhnologii dostavki vantazhiv v mizhmis'komu spoluchenni* [Choice of rational technology of delivery of cargoes in long-distance communication] *Zhitomir: Visnik skhidnoukrains'kogo nac. Un-tu im. V. Dalya, 2(243)*, 179-184. [In Ukrainian].
7. Karimi, H.R., Duffie, N., Freitag, M., Lütjen, M., & Chadli, M. (2015). Modeling, Planning, And Control Of Complex Logistic Processes. *Mathematical Problems In Engineering*, 501, 184267. Doi: <https://doi.org/10.1155/2015/184267>
8. Rossolov O.V., Potaman N.V., Kiyashko D.O. (2017) *Viznachennya racional'nikh rivniv kanaliv rozpodilu produkcii DP «Artemsil'»* [Determination of rational levels of product distribution channels of SE "Artemsil"]. *Naukovo-tekhnichnij zbirnik «Kommunal'noe khozjajstvo gorodov»*. 137, 55-60. [In Ukrainian]
9. Naumov V. S. (2010) *Ocenka sprosa na transportno-ehkspedicionnye uslugi* [Estimation of demand for freight forwarding services]. *Visnik Skhidnoukr. nac. un-tu im. V. Dalya: Nauk. Zhurnal, 4 (146)*, 201 – 206. [In Russian]
10. Moroz O.V. (2003) *Zagal'na Postanovka Zadachi, Marshrutizacii Perevezen' Vantazhiv Malimi Partiyami* [General statement of the problem, routing of cargo transportation in small batches] *Zb. Nauk. Pr. Kiev, 2, 5* [In Ukrainian].
11. Sheptura A.N. (2004) *Povyshenie ehffektivnosti avtomobil'nykh perevozok partionnykh gruzov pri peremennom sprose na perevozki* [Improving the efficiency of road transport of batch cargo with variable demand for transportation]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Khar'kov: Khnadu. [In Russian]
12. Nagorny, Ye., Shulika, O., Severyn, O., Orda, O. (2019) *Improving the efficiency of road transport companies by optimizing the costs of information and advertising activities*. *Shs Web Of Conferences- Edp Sciences*, 67, 03009. Doi: <https://doi.org/10.1051/Shskonf/20196703009>
13. Shulika O.O. (2017) *Formuvannya procesu dostavki tarno-shtuchnikh vantazhiv avtomobil'nim transportom u mizhmis'komu spoluchenni* [Formation of process of delivery of tare-piece cargoes by motor transport in long-distance communication] *Extended abstract of candidate's thesis*. Khar'kov: Khnadu. [In Ukrainian].
14. Potaman, O.Shulika, O.Orda. (2021) *Modelling of the route network for perishable cargo delivery in the regional traffic on the basis of petri nets*. *Naukovo-Tekhnichnij Zbirnik «Komunal'ne Gospodarstvo MisT»*. 164 (2021). 240-245
15. Yakovleva YA.S., Dudnikov O.M, Sokirko V.M. (2009) *Udoskonalennya metodiki organizacii perevezen'nykh shtuchnikh dribnopratiynnykh vantazhiv avtomobil'nim transportom*. [Improving the methodology of Organization of transportation of artificial small consignments by road]. *News Of The Automobile And Road Institute: Research And Production Collection, 2(9)*, 81–87. [In Ukrainian]

Natalia Potaman¹

¹ Assistant professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo st., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.

FORMATION OF A RATIONAL ROUTE NETWORK FOR DELIVERY OF CONTAINERIZED CARGOES

The formation of a rational route network contributes to the timely and uninterrupted delivery of products and more efficient interaction of supplier organizations, recipient organizations and trucking organizations. However, at present, the issues of increasing the level of customer service, which in market conditions are closely related to the problem of service and quality of service, are becoming increasingly important. The quality of transportation should be understood as the ability of the trucking industry to meet the needs of enterprises and the public in transport services with minimal costs. Thus, there is a question of forming a rational route network, which would improve the quality of customer service with minimal costs. The use of economic and mathematical methods and information technologies in the formation of a rational route network allows to obtain a synergistic effect, namely by reducing overall costs, improve the quality of service. The formation of a rational route network according to the proposed algorithm allows to determine the cost of delivery of goods and the level of service of cargo owners with the specified number of dispatchers and cars at the enterprise and provide companies with practical recommendations on the number of dispatchers and cars needed to meet customer needs. service.

Keywords: route network, consignor, consignee, containerized cargo, regression model, total costs, quality level.

ЗМІСТ

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Панченко С.В., Фомін О.В., Ватуля Г.Л., Ловська А.О., Дериземля С.В., Рибін А.В.</i> Обґрунтування використання наповнювачів в складових несучих конструкцій вантажних вагонів	5
<i>Пузир В.Г., Крашенін О.С., Дацун Ю.М., Обозний О.М., Шапатіна О.О., Задесенець В.І.</i> Вибір стратегії утримання локомотивного парку при запровадженні сервісу	14
<i>Зеленько Ю.В., Калимбет М.В.</i> Виготовлення сорбційного полотна з композитних матеріалів як засіб для ліквідації розливів небезпечних речовин на транспорті	24
<i>Дубравін Ю.Ф., Ткаченко В.П., Співак О.М.</i> Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода електровоза змінного струму	36
<i>Sulym A., Safronov O., Gladkykh I., Lupitko N.</i> Study of performance indicators of transport machine-building and railway industry enterprises in a pandemic condition covid-19	52
<i>Сулим А.О., Хозя П.О.</i> Концепції керування енергетичними процесами на електрорухомому складі з накопичувачами енергії	63
<i>Радкевич М.М., Сапронова С.Ю., Брайковська Н.С., Ткаченко В.П.</i> Удосконалення методики технічного діагностування пасажирських вагонів	80
<i>Агарков І.В.</i> Моделювання рульового керування тролейбуса з підсилювачем рульового приводу на базі електродвигуна з ротором, що котиться	88
<i>Могила В.І., Ковтанець М.В., Морнева М.О.</i> Експериментальні дослідження теплообміну при охолодженні води та конденсації пари в тепловозних радіаторних секціях	107
<i>Равлюк В., Дерев'янчук Я., Погорелов С.</i> Удосконалення механічної гальмової системи пасажирського вагона	115
<i>Мартинов Ю.В., Петренко О.М., Любарський Б.Г.</i> Оцінка та перспективи розвитку ліфтового господарства України	125
<i>Озулу А.Б., Любарський Б.Г.</i> Перспективні електромеханічні амортизатори	133
<i>Riabov I., Safronova S., Tkachenko V., Goolak S., Keršys R.</i> Calculation of traction and energy characteristics electric rolling stock with asynchronous traction electric drive	141
<i>Мартинов І. Е., Калабухін Ю. Є., Труфанова А. В.</i> Концепція життєвого циклу пасажирського вагона	153
<i>Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П., Брайковська Н.С., Зуб Є.П.</i> Науковий підхід до методів збільшення життєвого циклу колісних пар рухомого складу залізниць	164

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<i>Щербина Ю.В.</i> Принципи побудови узагальненої математичної моделі гідравлічного гасителя коливань пасажирського вагона	173
<i>Ловська А.О., Фомін О.В., Скуріхін Д.І., Бондаренко В.В.</i> Комбінаторний підхід до пошуку відмов у системі електрообладнання вагонів	185
<i>Kosarchuk V., Agarkov O., Tverdomeđ V.</i> Life assessment of rails by criterion of occurrence of fatigue cracks	194

<i>Воронко І.О.</i> Диференціально-ігрова модель захисту інформації для комп'ютерних систем транспортної інфраструктури	201
<i>Весела М.А., Клименко І.Ю., Мельнікова Ю.І.</i> Використання нейронних мереж в адаптивному управлінні електромобілем	213
<i>Горобченко О.М.</i> Теоретичні основи оцінки інформативності ознак поїзної ситуації для роботи інтелектуальних систем керування локомотивом	223
<i>Kulbovskiy I., Holub H., Andonova S., Saiarina I., Tkachuk M.</i> Model and methods of management of efficiency of use of production and technological potential of rolling stock of rail transport	232

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

<i>Tkachenko K., Tkachenko O., Tkachenko O.</i> Modeling of system for monitoring of risks in the transport	239
<i>Барибін М.А., Каращук В.О., Клецька О.В., Кірицева О.В., Джус В.С.</i> Модель взаємовпливу екологічних аспектів та нормування енергії на тягу поїздів в логістиці залізниць	247
<i>Потаман Н.В.</i> Формування раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів	263

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 38

Issue 38

Відповідальний за випуск І. О. Саяпіна

Підписано до друку 30.11.2021 р.
Ум. друк. арк. 15,87. Обл.-вид. арк. 21,17
Наклад 50 прим. Зам. № 2166-09/21

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/>