

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ



ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 40



2022

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

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

СЕРІЯ

**«ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ
І ТЕХНОЛОГІЇ»**

ВИПУСК 40

Київ·ДУІТ·2022

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF UKRAINE**

**STATE UNIVERSITY OF INFRASTRUCTURE
AND TECHNOLOGIES**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
PAPERS**

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

SERIES

«TRANSPORT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES»

ISSUE 40

Kyiv·SUIT·2022

УДК 656:62

Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 40. К.: ДУІТ, 2022. 269 с. DOI:10.32703/2617-9040-2022-40

Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series «Transport Systems and Technologies». № 40. K.: SUT, 2022. 269 p. DOI:10.32703/2617-9040-2022-40

ISSN 2617-9059 (Online), ISSN 2617-9040 (Print)

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» (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, професор 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 ТAU, 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;

І.В. Грицук, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія;

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

Б.Г. Любарський, 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;

В. О. Каращук, кандидат технічних наук, доцент кафедри рухомого складу транспортних систем ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»;

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

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

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

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

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

Я. Діжо (J. Džžo), 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);

В. Пиштек (Václav Pištěk) Prof., Dr. Sc. Techn., Brno University of Technology, Technická, Brno (Чехія);

П. Кучера (Pavel Kučera) Assoc. Prof., PhD, Brno University of Technology, Technická, Brno (Чехія);

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

С.О. Гулак, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», ДУІТ (технічний секретар);

І.О. Саятіна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Програмне забезпечення комп'ютерних систем» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Статті збірника проходять обов'язкове подвійне 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 double 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 06 грудня 2022 р.).

Recommended for publication by the Academic Council of DUIT (Minutes № 4 of Desember 06, 2022).

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
та кандидата наук у технічній галузі

(Додаток 11 до наказу Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 № 1528)

та відноситься до категорії "Б" (відповідно до Порядку формування Переліку наукових фахових видань України,
затвердженого наказом МОН України від 15 січня 2018 року № 32) періодичних фахових видань України.

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

© Державний університет інфраструктури та технологій, 2022

Олексій Фомін¹, Альона Ловська²

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

²Професор 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>

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

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ХОПЕРА ДВОСЕКЦІЙНОГО ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗАЛІЗНИЧНИМ ПОРОМОМ

Для підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера запропоновано його удосконалення шляхом розділення кузова на дві окремі секції, що сприяє можливості перевезень в ньому різноманітних вантажів. Для адаптації вагона-хопера до перевезень на залізничних поромках у міжнародному сполученні пропонується постановка на його шворневих балках вузлів для закріплення ланцюгових стяжок. Визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера проведено математичним моделюванням. До уваги прийнятий випадок бортової хитавиці залізничного порому. Розв'язок математичної моделі здійснений в програмному комплексі MathCad. Загальна величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-хопера склала $2,4 \text{ м/с}^2$ ($0,24g$). Отримана величина прискорення врахована при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-хопера. Розрахунок здійснений за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Результати розрахунків встановили, що максимальні еквівалентні напруження дорівнюють $312,3 \text{ МПа}$ та виникають в вузлі для закріплення. Однак вони не перевищують допустимих значень.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-хоперів, а також створенню напрацювань щодо проектування їх перспективних конструкцій.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність, залізнично-поромні перевезення.

Вступ. Забезпечення сталого та безперебійного перевізного процесу можливе за умови технічної оснащеності транспортної галузі. Вже тривалий час залізничний транспорт є одним з найбільш перспективних та використовуваних видів транспорту. Для утримання його лідерських позицій на ринку перевізних послуг важливим є впровадження в експлуатацію високоефективних транспортних засобів, зокрема вагонів.

Одним з найбільш поширених типів вагонів, який використовується для перевезень високотемпературних вантажів є вагон-хопер для перевезення окатишів та гарячого агломерату з температурою до 700°C .

Для підвищення ефективності експлуатації даного типу вагона можливим є удосконалення його несучої конструкції. Запропоноване удосконалення повинно сприяти розширенню багатофункціональності вагона, а також можливості його експлуатації не тільки на магістральних коліях, а і в міжнародному залізнично-водному сполученні. Для цього важливим є урахування на стадії проектування вагонів навантажень, які можуть діяти на них при

перевезеннях на залізничних поромах. Крім того, важливим є адаптація їх несучих конструкцій до надійної взаємодії з засобами закріплення на палубах. Тому актуальним є проведення досліджень в цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Визначення основних показників міцності несучої конструкції вагона проводиться у публікації [1]. Проаналізовано основні причини появи дефектів у складових вагона. Запропоновано заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона шляхом встановлення підсилюючих елементів у найбільш навантажених зонах рами.

Аналіз конструкції вантажного вагона ВСННЛ проводиться в роботі [2]. Наведені можливі варіанти покращення технічних та економічних показників вагонів. Однак запропоновані удосконалення конструкцій вагонів не сприяють їх адаптації до перевезень на залізничних поромах.

У роботі [3] висвітлено результати визначення навантаженості несучої конструкції вагона. При цьому автори обмежилися нормативними значеннями навантажень, які діють на вагон в експлуатації, тобто до уваги не прийняті навантаження, які можуть діяти на нього при перевезеннях на залізничних поромах.

Дослідження міцності удосконаленої несучої конструкції вагона проводиться в роботі [4]. Наведені висновки щодо отриманого напруженого стану несучої конструкції вагона при ударних навантаженнях.

Аналіз можливості модернізації вантажного вагона шляхом використання композитних панелей в його складових проводиться у роботі [5]. Обґрунтовано доцільність запропонованого впровадження в несучу конструкцію вагона. Разом з цим питання удосконалення несучих конструкцій вагонів для забезпечення надійності їх закріплення на залізничних поромах авторами не розглядалися.

У публікації [6] наведено обґрунтування застосування композитних панелей при здійсненні модернізації кузовів вантажних вагонів. Зазначено переваги запропонованої модернізації та перспективи її подальшого розвитку на вузькоколіїних вагонах. Однак запропонована конструкція вагона не адаптована до перевезень на залізничних поромах.

У роботі [7] проводиться визначення навантаженості основних типів вагонів при експлуатаційних режимах. Наведено обґрунтування подальшої експлуатації вантажних вагонів, які вичерпали свій нормативний ресурс. Разом з цим при проведенні розрахунків на міцність авторами не враховано навантажень, які можуть діяти на несучу конструкцію вагона при перевезеннях на залізничних поромах.

Заходи щодо адаптації несучої конструкції вагона-платформи до перевезень на залізничних поромах висвітлені у публікації [8]. Наведено результати визначення динамічної навантаженості та міцності, які підтвердили доцільність запропонованих рішень. Однак авторами не приділялося уваги питанню удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для забезпечення можливості його надійного перевезення на залізничному поромі.

Проведений літературний огляд показує, що питання адаптації несучих конструкцій вагонів до надійного перевезення на залізничних поромах є досить актуальними. Це викликає необхідність проведення досліджень в даному напрямі та створення відповідних напрацювань, які сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вантажних вагонів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є висвітлення результатів щодо динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції вагона-хопера двосекційного при перевезенні залізничним поромом. Для досягнення поставленої мети сформовані такі завдання:

провести визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при перевезенні залізничним поромом;

провести визначення міцності несучої конструкції вагона-хопера при перевезенні залізничним поромом.

Матеріали та методи дослідження. З метою підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера запропоновано його удосконалення шляхом розділення кузова на дві окремі секції, що взаємодіють між собою посередництвом вертикальної стінки та горизонтальних з'єднувальних поясів (рис. 1). При проектуванні вагона як прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП «Укрспецвагон» (Україна).

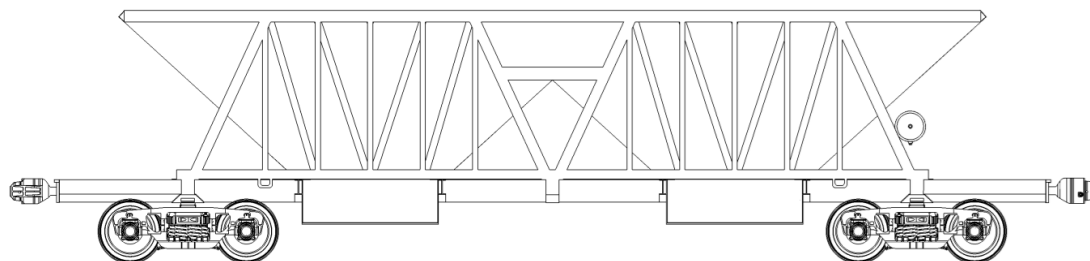


Рис. 1. Несуча конструкція двосекційного вагона-хопера

З метою можливості перевезень вагона-хопера на залізничних поромках у міжнародному сполученні пропонується постановка на його шворневих балках вузлів для закріплення ланцюгових стяжок (рис. 2).

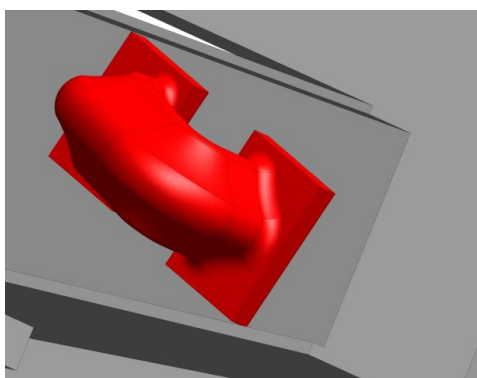


Рис. 2. Розміщення вузла на шворневій балці вагона

Для забезпечення відповідної жорсткості шворневої балки в зонах розміщення вузла є можливим встановлення в неї підсилюючих діафрагм.

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при перевезенні на залізничному поромі проведено математичне моделювання. До уваги прийнятий випадок бортової хитавиці залізничного порому (рис. 3).

Враховано, що вагон жорстко закріплений на палубі та повністю повторює траєкторію переміщень залізничного порому. Авторами використано математичну модель, сформовану у їх попередніх роботах [9]:

$$\frac{D}{12 \cdot g} \cdot (B^2 + 4 \cdot z_g^2) \cdot \ddot{q}_1 + \left(\Lambda_0 \cdot \frac{B}{2} \right) \cdot \dot{q}_1 = p' \cdot \frac{h}{2} + \Lambda_0 \cdot \frac{B}{2} \cdot \dot{F}(t), \quad (1)$$

де q_1 – узагальнена координата, що відповідає кутовому переміщенню залізничного порому з вагонами навколо повздожньої осі X .

D – вагове водовитіснення залізничного порому; B – ширина залізничного порому; h – висота борта залізничного порому; Λ_θ – коефіцієнт опору коливанням; z_g – координата центру ваги залізничного порому; p' – вітрове навантаження на надводну проекцію залізничного порому з вагонами, розміщеними на верхній палубі; $F(t)$ – закон дії зусилля, яке збурює рух залізничного порому з вагонами, розміщеними на його палубах.

Розв'язання математичної моделі (1) здійснено в програмному комплексі Mathcad. При цьому застосований метод Рунге-Кутта [10, 11]. Початкові умови прийняті рівними нулю [12, 13].

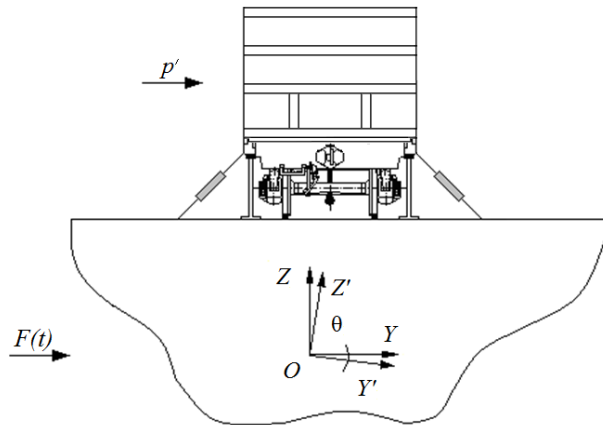


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення динамічної навантаженості вагона-хопера

Розрахунки проведені стосовно залізничного порому «Герои Шипки», що рухається акваторією Чорного моря. Гідрометеорологічні параметри акваторії плавання залізничного порому визначені на підставі довідкової літератури [14]. Результати розрахунків показали, що максимальні прискорення відносно штатного місця вагона на палубі виникають при курсових кутах хвилі по відношенню до корпусу залізничного порому 60° та 120° і складають $0,4 \text{ м/с}^2$ (рис. 4). На осі ординат наведені прискорення з урахуванням різних курсових кутів хвиль по відношенню до корпусу залізничного порому.

Загальна величина прискорення з урахуванням горизонтальної складової прискорення вільного падіння дорівнює $2,4 \text{ м/с}^2$ ($0,24g$).

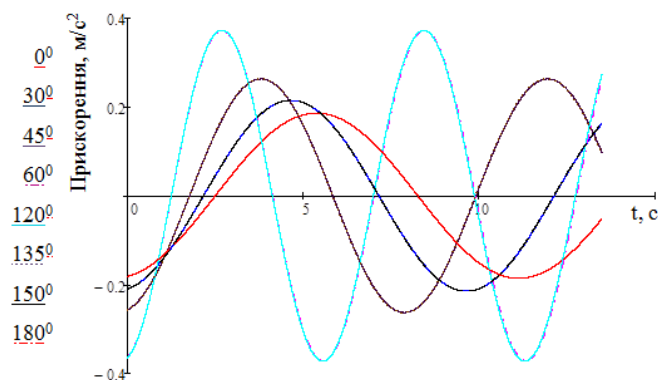


Рис. 4. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-хопера при перевезенні залізничним поромом

Отримана величина прискорення врахована при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-хопера. Розрахунок здійснений за методом скінчених елементів в

програмному комплексі SolidWorks Simulation [15]. При складанні скінчено-елементної моделі вагона-хопера використані ізопараметричні тетраедри.

Оптимальна кількість тетраедрів розрахована за графоаналітичним методом [16, 17]. Кількість елементів сітки складала 1091001, вузлів – 356047. Максимальний розмір елементу сітки дорівнює 40 мм, мінімальний – 8 мм, максимальне співвідношення боків елементів – 442,63, відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 13,7, більше десяти – 8,26. Кількість елементів в колі складала 9. Співвідношення збільшення розміру елементів – 1,7.

При складанні розрахункової схеми несучої конструкції вагона-хопера враховані такі навантаження: вертикальне статичне навантаження $P_{e^{cm}}$, тиск розпору від насипного вантажу P_p та навантаження від ланцюгових стяжок $P_{лс}$ (рис. 5). Внаслідок просторового розміщення ланцюгової стяжки навантаження, яке діє на вузол закріплення через неї розкладалося на складові з урахуванням кутів її розміщення у просторі (рис. 6).

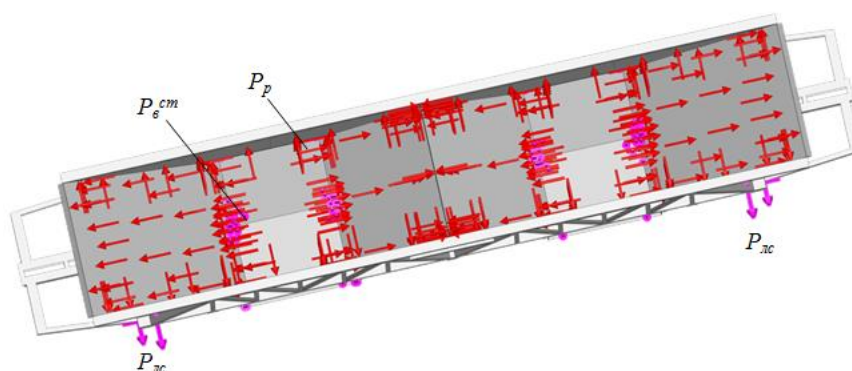


Рис. 5. Розрахункова схема несучої конструкції вагона- хопера

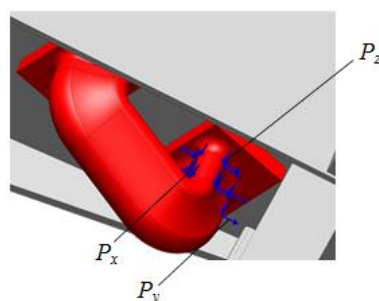


Рис. 6. Схема прикладення навантажень до вузла закріплення

Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання несучої конструкції вагона-хопера на ходові частини, а також робочі поверхні механічних упор-домкратів. Матеріал несучої конструкції вагона-хопера – сталь марки 09Г2С. Результати розрахунків наведені на рис. 7, 8. При цьому максимальні еквівалентні напруження складають 312,3 МПа та виникають в вузлі для закріплення. Однак отримані значення напружень не перевищують допустимих та є меншими за них на 9,5%. У якості допустимих враховані напруження плинності матеріалу конструкції, які дорівнюють 345 МПа.

Максимальні переміщення в конструкції виникають у розвантажувальних бункерах і складають 12,3 мм (рис. 9).

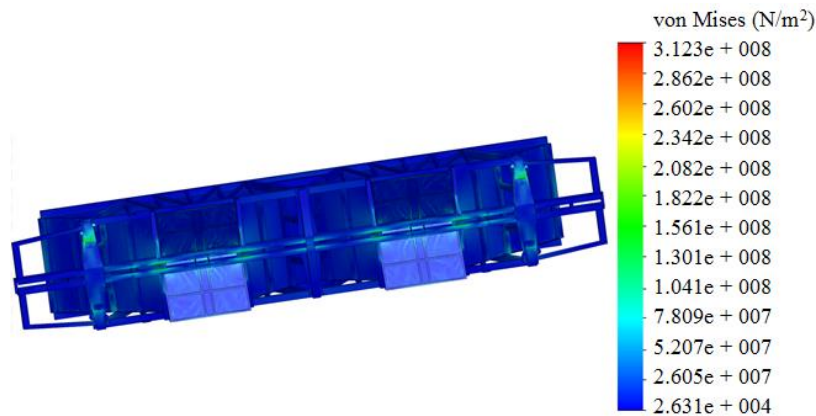


Рис. 7. Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

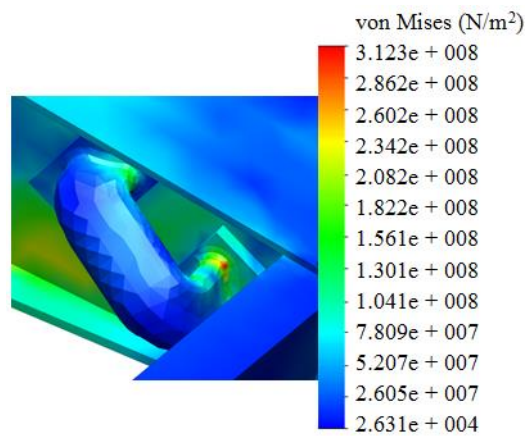


Рис. 8. Напружений стан вузла для закріплення

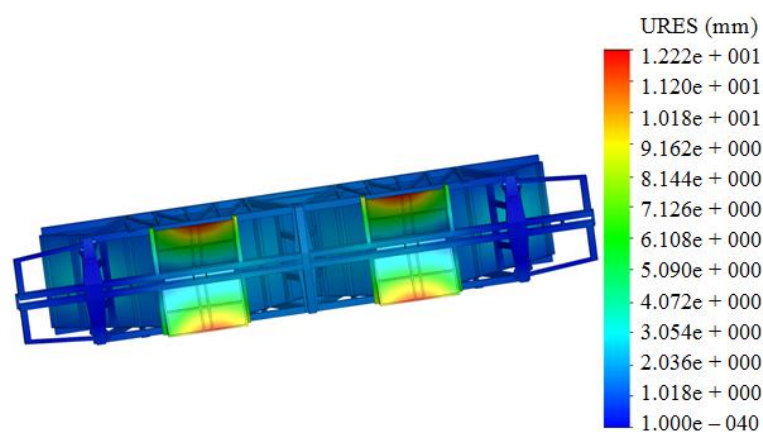


Рис. 9. Переміщення в вузлах несучої конструкції вагон - хопера

Проведені розрахунки показали, що міцність запропонованої несучої конструкції вагона-хопера при перевезенні на залізничному поромі забезпечується [18, 19].

Висновки

1. Проведено визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при перевезенні залізничним поромом. Встановлено, що максимальні прискорення відносно штатного місця вагона на палубі виникають при курсових кутах хвилі по відношенню до корпусу залізничного порому 60^0 та 120^0 і складають $0,4 \text{ м/с}^2$. Загальна величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-хопера, дорівнює $2,4 \text{ м/с}^2$ ($0,24g$).

2. Проведено визначення міцності несучої конструкції вагона-хопера при перевезенні залізничним поромом. Максимальні еквівалентні напруження склали $312,3 \text{ МПа}$ та виникають в вузлі для закріплення. Однак отримані значення напружень не перевищують допустимих та є меншими за них на $9,5\%$. Максимальні переміщення в несучій конструкції виникають у розвантажувальних бункерах і складають $12,3 \text{ мм}$.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-хоперів, а також створенню напрацювань щодо проєктування їх перспективних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Antipin D.Ya., Racin D.Yu., Shorokhov S.G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-top Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 150. P. 150 – 154.
2. Shukla C. P., Bharti P. K. Study and Analysis of Doors of BCNHL Wagons. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2015. Vol. 4. Issue 04. P. 1195 – 1200.
3. Patrascu A. I., Hadar A., Pastrama S. D. Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale plastic*, 2020. Vol. 57(2). P. 140 – 151. <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360>.
4. Street G. E., Mistry P. J., Johnson M. S.. Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*, 2021. Vol. 5(6). P. 152. <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>.
5. Kosobudzki M., Jamrozik K., Bocian M., Kotowski P., Zajac P. The analysis of structure of the repaired freight wagon. *AIP Conference Proceedings*, 2018. Vol. 2029. P. 020030. <https://doi.org/10.1063/1.5066492>.
6. Placzek M., Wróbel A., Olesiejuk M. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*, 2017. Vol. 112. 06022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022>.
7. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>.
8. Lovska A., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Sciences*, 2020. Vol. 10(16). 5710. <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
9. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry. *MATEC Web of Conferences*, 2018. Vol. 235. P. 00003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>.
10. Кирьянов Д. В. *Mathcad 13*. Петербург: БХВ, 2006. 608 с.
11. Дьяконов В. *MATHCAD 8/2000: специальный справочник*. СПб.: Питер, 2000. 592 с.
12. Шишацький А.В. Методика формування сигнально-кодкових конструкцій OFDM-сигналу в умовах впливу навмисних завад та селективних завмирань. *Системи обробки інформації*, 2015. №7 (132). С. 71–77.
13. Шишацький А.В. Методика вибору робочих частот в складній електромагнітній обстановці. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка*, 2017. №1 (41). С. 146-149.
14. *Справочные данные о режиме ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей*. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2006.
15. Fomin O., Lovska A., Skliarenko I., Klochkov Yu. Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 1/7 (103). P. 65 – 74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>.
16. Vatulia G., Rezunenko M., Orel Y., Petrenko D. Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation. *MATEC Web of Conferences*, 2017. Vol. 107. P. 00051. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700051>.
17. Vatulia G. L., Lobiak O. V., Deryzemlia S. V., Verevicheva M. A., Orel Y. F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 664. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
18. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
19. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.

REFERENCES

1. Antipin, D.Ya., Racin, D.Yu., & Shorokhov, S.G. (2013) Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-top Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150 – 154.
2. Shukla, C. P., & Bharti, P. K. (2015). Study and analysis of doors of BCNHL wagons. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(04), 1195-1200.
3. Patrascu, A. I., Hadar, A., & Pastrama, S. D. (2020). Structural analysis of a freight wagon with composite walls. *Mater Plastic*, 57(2), 140-151. <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5360>.
4. Street, G. E., Mistry, P. J., & Johnson, M. S. (2021). Impact resistance of fibre reinforced composite railway freight tank wagons. *Journal of Composites Science*, 5(6), 152. <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>.
5. Kosobudzki, M., Jamroziak, K., Bocian, M., Kotowski, P., & Zajac, P. (2018, October). The analysis of structure of the repaired freight wagon. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2029, No. 1, p. 020030). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.5066492>
6. Płaczek, M., Wróbel, A., & Olesiejuk, M. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 112, p. 06022). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022>.
7. Fomin, O., & Lovska, A. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.*, 2(7(110)), 6-14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
8. Lovska, A., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. (2020). Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Sciences*, 10(16), 5710. <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
9. Fomin, O., Gerlici, J., Lovskaya, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2018). Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry. In *MATEC Web of Conferences*, 235, 00003. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>.
10. Kiryanov, D. V. (2006). Mathcad 13. *Peterburg: BHV*, 608 [in Russian].
11. D'yakonov, V. (2000). MATHCAD 8/2000. *Sankt-Peterburg: Piter*, 592. [in Russian].
12. Shishackij, A.V. (2015). Metodika formuvannya signalno-kodovih konstrukcij OFDM-signalu v umovah vplivu navmisnih zavrad ta selektivnih zavmiran [Method of forming signal-code constructions of OFDM-signal under the influence of intentional interference and selective fading]. *Sistemi obrobki informaciyi*, 7(132), 71–77 [in Ukrainian].
13. Shishackij A.V. (2017). Metodika voboru robochih chastot v skladnij elektromagnitnij obstanovci. Sistemi upravlinnya, navigaciyi ta zv'yazku [Methods of choosing operating frequencies in a complex electromagnetic environment. Control, navigation and communication systems]. *Zbirnik naukovih prac Poltavskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu imeni Yuriya Kondratyuka*, 1(41), S. 146-149 [in Ukrainian].
14. Spravochnye dannye o rezhime vetra i volneniya Baltijskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morej. Rossijskij morskoy registr sudohodstva [Background data on the wind and turbulence regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean seas. Russian Maritime Register of Shipping]. *Sankt-Peterburg*. 2006 [in Russian].
15. Fomin, O., Lovska, A., Skliarenko, I., & Klochkov, Yu. (2020). Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(103)), 65-74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>.
16. Vatulia, G., Rezenenko, M., Orel, Y., & Petrenko, D. (2017). Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 107, p. 00051). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700051>.
17. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., & Orel, Y. F. (2019, October). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 664, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
18. Vagony vantazhni. (2015). 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*. [in Ukrainian].
19. Vagony gruzovye (2016). Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight cars. Strength and Dynamic Requirements], 54. *GOST 33211-2014*. [in Russian].

Oleksij Fomin¹, Alyona Lovska²

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

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

INVESTIGATION OF LOADING STRUCTURE OF HYPER-HOPPER TWO-SECTION CARRIER DURING CARRIAGE BY RAILWAY

To increase the efficiency of operation of the hopper car, it is proposed to improve it by dividing the body into two separate sections, which facilitates the possibility of transporting different types of cargo. In order to adapt the hopper car for transportation on railway ferries in international traffic, it is proposed to install on its pivot beams knots for fastening chain ties. Determination of the dynamic load of the load-bearing structure of the hopper car was performed by mathematical modeling. The case of the on-board rocking of the railway ferry is taken into account. The solution of the mathematical model is implemented in the MathCad software package. The total amount of acceleration acting on the supporting structure of the hopper car was 2.4 m/s^2 (0.24 g). The obtained value of acceleration is taken into account when calculating the strength of the load-bearing structure of the hopper car. The calculation was performed by the finite element method in the SolidWorks Simulation software package. The results of the calculations established that the maximum equivalent stresses are 312.3 MPa and occur in the node for fixing. However, they do not exceed the allowable values.

The conducted researches will promote increase of efficiency of operation of hopper cars, and also creation of developments concerning designing of their perspective designs.

Keywords: *transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, dynamic loading, strength, railway-ferry transportations.*

Олександра Дорошенко¹

¹ Доцент, Кафедра залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. І. Огієнка, 19, м. Київ, 03049, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6724-0709>

* Автор, відповідальний за листування: sane4kador@gmail.com

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ МОДИФІКАЦІЇ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

У статті розглядається обґрунтування використання базальтового волокна, як перспективного матеріалу, за допомогою якого можливо отримати новий клас будівельних матеріалів.

У результаті встановлено, що збільшення температури сприяє підвищенню лугостійкості волокна. Втрата маси при витримці в лужному розчині після 28 діб становить близько 5 %, тоді як початкове волокно за цей час втрачає понад 30 % маси волокна. Подальше збільшення температури ізотермічної витримки не ефективно через зниження лугостійкості волокон та економічної недоцільності.

Для пояснення процесів, що відбуваються в структурі волокна в процесі його термічної обробки, були отримані рентгенограми і спектри вихідного і термообробленого волокна.

У процесі термообробки від 300 до 500 °C відбуваються процеси заліковування дефектів, зміни хімічного складу та структури поверхні волокон в результаті окислення $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$ та утворення залізкокисневих тетраедрів $[FeO_4]Na$ із залученням на поверхню волокон лужних катіонів.

Обґрунтовано доцільність термічної обробки базальтового волокна при температурі 500 °C, що приводить до ущільнення структури фібри та сприяють підвищенню її лугостійкості, що підтверджується морфоструктурними особливостями поверхні термообробленого базальтового волокна, витриманого у цементному розчині.

Ключові слова: базальтове волокно, транспортне будівництво, термічна обробка, структура фібри, лугостійкості волокон, рентгенограми, спектри.

Вступ. Серед характеристик фібробетону зазвичай виділяють його міцність при згинанні та стисканні. У фібробетону значення цього показника перевищує на 10...15% значення звичайного бетону. В конструкціях використовують тільки фібробетон або фібра та стрижнева або дротяна арматура. Вітчизняний та зарубіжний досвід показує, що фібробетон є універсальним матеріалом і знаходить все більше застосування в галузі транспортного будівництва.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Протяжність мережі доріг з цементобетонними покриттями у країнах, таких як Німеччина, становлять 31 %, США – 35 %, у Бельгії – 41 %. Середній термін служби цементобетонних покриттів становить понад 20 років. Навіть у тих країнах де асфальтобетонні покриття мають економічні переваги в порівнянні з цементобетонними, з метою вдосконалення та розвитку конкуруючої технології, за рахунок державних субсидій підтримується будівництво цементобетонних покриттів на рівні 10...20 % загального обсягу будівництва автомобільних доріг з капітальними типами покриттів [1,2]. У

70 роки в Радянському союзі почалося масове будівництво цементобетонних дорожніх покриттів із застосуванням машин із ковзною опалубкою на гусеничному ході. Однак практика експлуатації таких покриттів у Радянському Союзі виявила низку суттєвих недоліків. З'явилися руйнування в температурних швах, лушення поверхневого шару бетону, відколи кромок плит і кутів, утворення вибоїн. Причиною передчасних пошкоджень покриттів, як правило, були порушення технології будівництва, дефіцит якісних цементів, використання низьких марок бетону, недостатнє повітрявтягування у бетон, надмірна дія сольових розчинів на ранній стадії твердіння бетону [3,4].

На відміну від Радянського Союзу, у багатьох країнах світу паралельно з будівництвом асфальтобетонних покриттів продовжувалося будівництво цементобетонних покриттів. Стабільне транспортно-експлуатаційні характеристики та висока довговічність довели їхню перевагу перед покриттями, побудованими із застосуванням органічних в'язучих.

Цементобетонні покриття мають високу розподільну здатність, незначне зношування при стиранні, високий коефіцієнт зчеплення, що мало залежить від зволоження покриття. Міцнісні та деформативні характеристики цементобетону практично не змінюються при зміні температури, вологості та швидкості навантаження. Під час руху транспорту на дорогах з такими покриттями витрачається приблизно на 5...10 % менше палива, ніж на асфальтобетонних. Крім того, для виробництва цементобетонних покриттів є великі сировинні ресурси [5,6].

Сучасні технології будівництва цементобетонних покриттів припускають повну автоматизацію основних процесів з укладання та ущільнення бетонних сумішей, обробки поверхні бетону, влаштування температурних швів та догляду за бетоном.

В останні роки спостерігається тенденція створення дорожніх бетонів підвищеної міцності та довговічності. Це досягається шляхом модифікації структури бетону хімічними добавками: пластифікуючими, повітрявтягуючими та газоутворюючими [7,6]. Розроблено нове покоління високоякісних бетонів (High performance concrete), що мають підвищену морозостійкість, ранню міцність (через 24 години не менше 35 МПа) та інші високі будівельно-технічні властивості. Подібні бетони використовують і в нашій країні, в тому числі на об'єктах транспортного будівництва.

У промислово розвинених країнах (США, Канаді, Австралії, Великій Британії, Німеччині, Швеції, Норвегії, Іспанії та багатьох інших) розширюється будівництво покриттів автомобільних доріг із жорстких цементобетонних сумішей, що ущільнюються укочуванням [8,9].

Під бетоном, що укочується, мають на увазі жорсткий цементобетон, що транспортується великовантажними автосамоскидами або бетонозмішувачами на ділянку будівництва і ущільнюється котками різних типів. Такі бетони можливо використовувати при спорудженні дамб і підпірних стінок гребель. У країнах Європи і Північної Америки бетон у транспортному будівництві використовують при влаштуванні шарів покриттів доріг, призначених для руху важких транспортних засобів (контейнеровози, великовантажних військових автомобілів, машин лісотехнічної промисловості); контейнерних терміналів, автостоянок; під'їзних, сільських, лісових доріг із високими транспортними навантаженнями; другорядних доріг та вулиць, місцевих доріг та автомагістралей, автомобільних під'їздів до аеропортів, злітно-посадкових смуг аеродромів; як шар посилення при реконструкції старих дорожніх покриттів [10].

Аналіз техніко-експлуатаційних показників всіх типів волокон, що використовуються в даний час у дорожньому будівництві, дозволяє говорити про те, що найбільш доцільно як армуючий елемент в цементобетон використовувати базальтове волокно [11,12,13].

В умовах дефіциту коштів назріла необхідність розробити прийнятну з фінансової та технічної точок зору програму будівництва магістральних доріг із використанням фібробетону у конструктивних шарах дорожнього одягу.

Сучасні умови дорожнього будівництва диктують широке використання відходів промисловості – шлаки, горілі сланці відвалів кам'яновугільних шахт, золи, а також практично невичерпні ресурси

– крейдянні поклади та магматичні породи (базальти), які нині мають мале застосування в транспортному будівництві. Враховуючи умови та світовий досвід, доцільно прискорити розробки в галузі технології та розрахунку фібробетону, ширше застосовувати фібробетонні конструкції при проектуванні об'єктів транспортного будівництва, та використовувати як фібру, матеріали оптимальні за вартістю, а також за обсягом покладів в Україні.

Базальтові волокна належать до сучасних ефективних матеріалів, що відрізняються високими фізико-механічними показниками і можуть використовуватися у великому діапазоні температур.

Отримання фібробетону в сучасному будівництві на основі базальтового волокна є перспективним, оскільки вони працюють в агресивних середовищах (стійкість до кислот та лугів), мають гарні експлуатаційні, фізико-механічні характеристики. Всі ці властивості базальтових волокон спричиняють актуальність створення високоефективних будівельних матеріалів та виробів для різних напрямків будівельної галузі. [14]

Встановлено [15], що волокно, що знаходиться в розчині протягом гідратації цементу, характеризується недостатньою лугостійкістю.

Мета і завдання дослідження. Як зазначалося раніше [15], тривале зберігання фібри у розчині сприяє її розчиненню. У зв'язку з цим актуальна розробка способів модифікації поверхневого шару базальтового волокна, які забезпечать високу корозійну стійкість.

Підвищити ефективність використання базальтового волокна у цементобетоні можна шляхом термічної обробки волокна.

Матеріали та методи дослідження. Для вивчення впливу термообробки на властивості волокон фібру піддавали нагрівання в діапазоні температур від 300 до 700 °С з кроком 100 °С. Ізотермічна витримка становила 30 хв. Охолодження відбувалось за кімнатною температурою в повітряному середовищі (табл. 1).

Таблиця 1. Волокно, модифіковане за градієнтом теплової обробки

Виробник	300 ⁰ С	400 ⁰ С	500 ⁰ С	600 ⁰ С	700 ⁰ С
ТОВ Армбуд					
	Колір нормальний	Колір нормальний	Колір освітлений	Зміни в кольорі – більш червоний	Зміни в кольорі – більш червоний

Час температурної обробки був вибраний дослідним шляхом і склав 30 хв.

У процесі проведення досліджень відзначено суттєву зміну кольору волокна залежно від температури обробки (табл. 1). Ймовірним поясненням цього факту є окислення заліза у структурі волокна, внаслідок цього волокно набуло червоного відтінку.

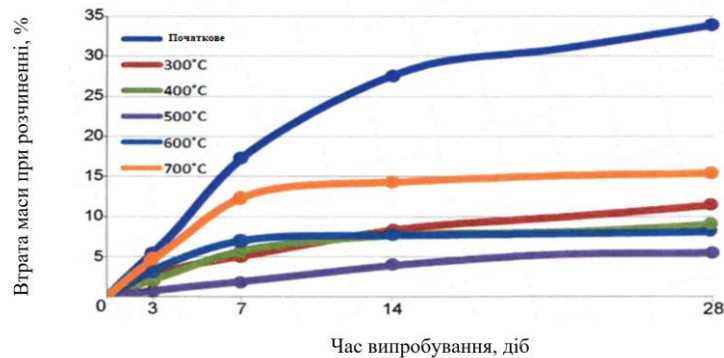


Рис. 1. Втрата маси волокна при розчиненні залежно від часу випробування



Рис. 2. Втрата маси при розчиненні залежно від температурної обробки після витримання в лужному середовищі протягом 28 діб

У результаті встановлено, що збільшення температури з 300 до 500 °C сприяє підвищенню лугостійкості волокна. Втрата маси при витримці в лужному розчині після 28 діб становить близько 5 %, тоді як початкове волокно за цей час втрачає понад 30 % маси волокна. Подальше збільшення температури ізотермічної витримки не ефективно через зниження лугостійкості волокон та економічної недоцільності.

При аналізі мікроструктури як початкового, так і термообробленого армуючого компонента особливих змін немає (рис. 3). Це стосується як розміру (діаметра) (рис. 3 а, г), так і поверхні волокон (рис. 3 б, г). Діаметр окремих волокон коливається у широкому діапазоні – від 2 до 30 мкм. Поверхня фібри досить гладка, проте в окремих частинах її покривають глобулярні утворення, імовірно, продуктів карбонатації, розміром до 1 мкм.

Однак, якщо поверхня вихідної фібри досить сильно координувана (рис. 4, а – в), то після термічної обробки вона покрита глобулярними утвореннями (рис. 4, г – е). На зразках вихідного анізотропного матеріалу є «виїдені» ділянки, поздовжні «борозни» у напрямку витягування волокон, що може говорити про їх внутрішню структуру (рис. 4, б, в). При цьому руйнування відбувається по найбільш слабкій частині – межі розділу, імовірно, окремих ниток волокна з алюмосилікатних ланцюгів. Якщо розглядати ділянку потверджену корозії, вона має чітку межу (рис. 4, б) і глибину вилугування до 400 нм (рис. 4, в). Однак, реальна величина руйнування більша через корозію всього поверхневого шару неупорядкованого алюмосилікатного скла. На самих волокнах є глобулярна речовина, яку можна віднести як до рентгеноаморфного карбонату кальцію, так і до продуктів реакції лугу з алюмосилікатним матеріалом самої фібри.

На волокнах після термічної обробки явних слідів вилугування не виявлено (рис. 4, г – е). Привертає увагу відсутність поздовжніх «борозен», що є наслідком великої стійкості

модифікованої базальтової мікрофібри до лужного середовища. Загалом можна говорити, що морфологія поверхні волокна, підданого термічній обробці, не зазнає серйозних змін під дією агресивного середовища цементного молока (рис. 3).

Низька лугостійкість початкового базальтового волокна може визначатися кількома факторами. В результаті різкого охолодження розплаву при формуванні волокон у них фіксується неоднорідна об'ємна та поверхнева пухка високотемпературна структура. При цьому волокно характеризується наявністю дефектів поверхні (мікротріщини, мікропори, обриви зв'язків тощо). Усе це разом інтенсифікує процес розчинення силікатного каркаса.

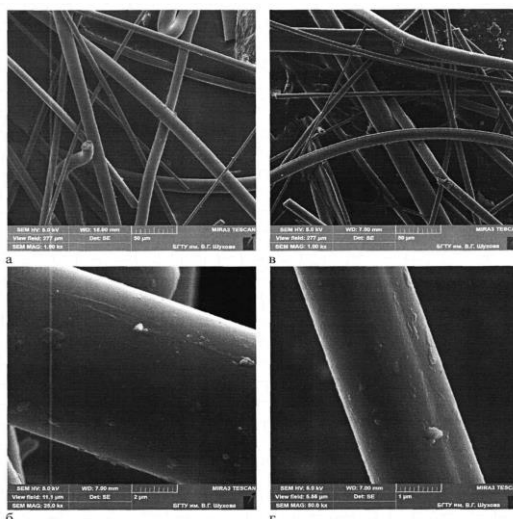


Рис. 3. Мікроструктура базальтового волокна:
а, б – початкового; **в, г** – після термічної обробки при 500 °С

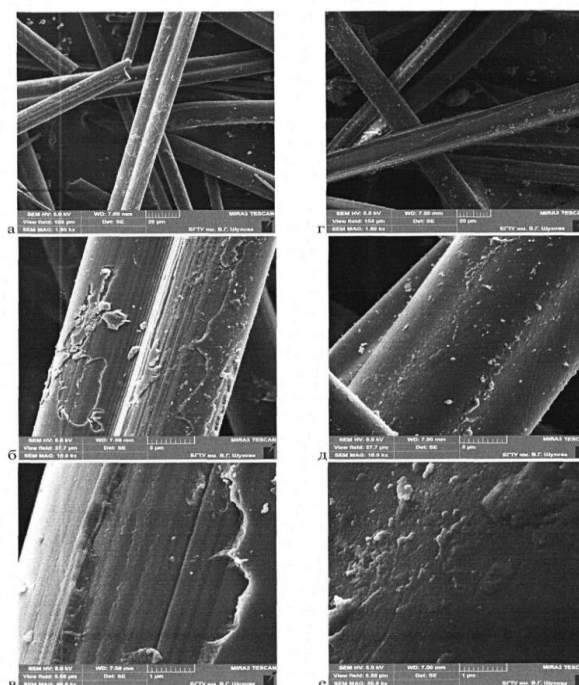


Рис. 4. Вплив лужного середовища модельної системи на мікроструктуру базальтового волокна:
а – в початкового; **г – е** – після термічної обробки при 500 °С

У процесі термообробки від 300 до 500 °С відбуваються процеси заліковування дефектів, зміни хімічного складу та структури поверхні волокон в результаті окислення $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$ та утворення залізоокисневих тетраедрів $[FeO_4]Na$ із залученням на поверхню волокон лужних катіонів. Перелічені процеси найбільш активно проходять при 500 °С – температурі близької до температури склування (кордон переходу з твердого в пластичний стан).

При більш високих температурах у базальтових волокнах, насамперед їх поверхні, починаються структурні зміни, пов'язані з передкристалізаційними процесами (600 °С) і кристалізацією (700 °С). Структурні перебудови, пов'язані з кристалізацією, супроводжуються утворенням різного роду дефектів, що роблять матеріал більш активним у хімічному відношенні та призводить до прискорення взаємодії з лугом. При цьому втрати маси волокон збільшуються.

Для пояснення процесів, що відбуваються в структурі волокна в процесі його термічної обробки, були отримані рентгенограми (рис. 5) і спектри (рис. 6) вихідного і термообробленого волокна.

Для отримання уявлень про мікроструктурний стан початкового та термообробленого базальтового волокна використовувались дані рентгенівської дифракції.

Рентгенограми базальтового волокна є типовими дифракційними картинами структурованих аморфних матеріалів з характерним розширеним профілем інтенсивності в області кутів близько 30° (рис. 5).

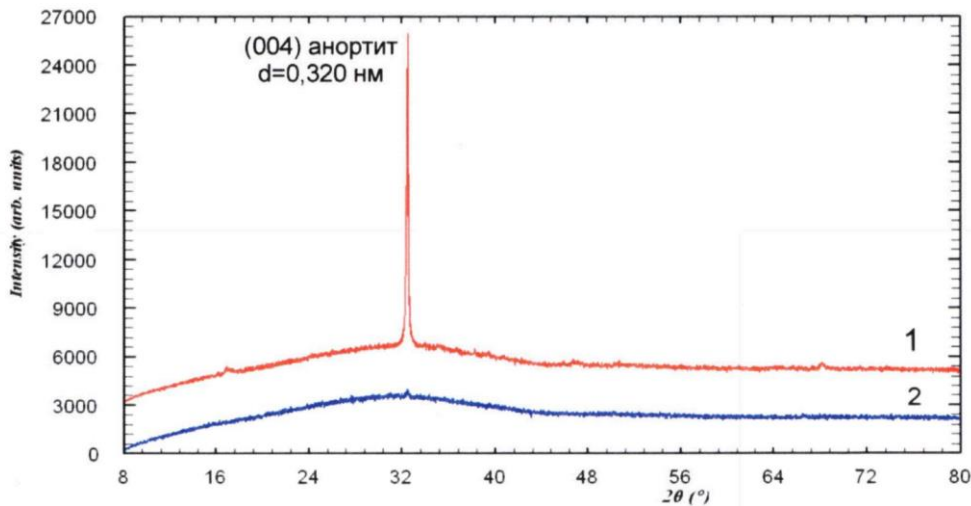


Рис. 5. Рентгенограма базальтового волокна до (1) і після (2) термічної обробки

Характерною особливістю рентгенограм волокна є присутність одного відображення 32,5°, причому найбільш інтенсивно це відображення проявляється на рентгенограмі початкового волокна. Виходячи із загальних уявлень про породоутворюючі мінеральні фази базальтів і на основі рентгенометричної діагностики виконаної із застосуванням дифракційної бази даних, це відображення може бути віднесено до $Ca(Al_2Si_2O_8)$.

Присутність на рентгенограмах відображення цього мінералу можна інтерпретувати як наслідок тонко пластичної форми кристалітів. Ці нанорозмірні мінерали на поверхні волокон відносять до новостворених фаз у процесі витяжки. При термообробці вони зникають з поверхні волокон через структурні перебудови.

Порівняння ІЧ-спектрів базальтового волокна до і після термічної модифікації показало видозміну профілів смуг поглинання алюмосилікатних груп області 1000... 300 cm^{-1} (рис. 6).

Зокрема, термообробка викликає зменшення інтенсивностей смуг поглинання 1019 і 1052 cm^{-1} , характерних для валентних коливань зв'язків Si-O-Si (Al) у ланцюжкових аніонних

угрупованнях (Q^2) клинопіроксенів. З огляду на це відбувається зростання інтенсивностей смуг каркасних структурних фрагментів (Q^4) у сфері хвильових чисел 1084...1300 див^{-1} .

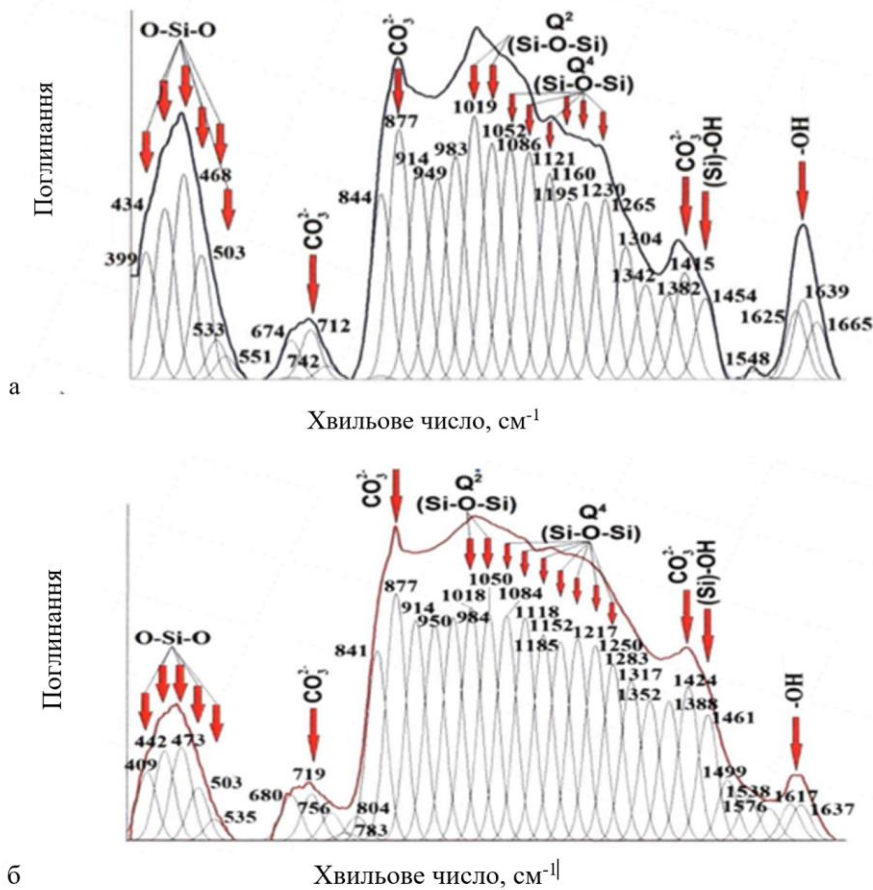


Рис. 6. Порівняння діаграм нормованих профілів ІЧ спектрів початкового (а) та термообробленого (б) волокна

Зазначені обставини свідчать про збільшення рівня полімеризації, т.к. підвищення концентрації каркасних угруповань (Q^4) відбувається за рахунок зменшення кількості ланцюжкових фрагментів (Q^2). Завдяки цьому відбувається ущільнення структури базальтового волокна, що, зрештою, позитивно позначається на стійкості фібри до лужного впливу. Такі структурні зрушення стають можливими через перехід $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$ в результаті термообробки в окислювальних умовах, що відзначається багатьма дослідниками.

Висновки. Обґрунтовано доцільність термічної обробки базальтового волокна при температурі 500 $^{\circ}\text{C}$ з подальшим охолодженням у повітряному середовищі при кімнатній температурі для підвищення його лужної стійкості. Запропоновано модель модифікації базальтового волокна при термічній обробці, засновану на переході $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$ в результаті термообробки в окислювальних умовах. Зміна координаційного оточення, що відбувається при цьому, ініціює утворення зв'язків між $(Si_2O_6)^{-1}$ та їх трансформацію в каркасний структурний тип з утворенням залізовмісних плагіоклазових фаз. Дані процеси призводять до ущільнення структури фібри та сприяють підвищенню її лугостійкості, що підтверджується морфоструктурними особливостями поверхні термообробленого базальтового волокна, витриманого у цементному розчині.

ЛІТЕРАТУРА

1. Толмачев С. Н. Развитие теории разрушения и стойкости дорожных цементных бетонов при действии агрессивных факторов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Укр. держ. акад. залізн. тр-ту. Харьков, 2013. 40 с.
2. Бражник А. В. Монолитные дорожные цементные бетоны высокой морозостойкости с органоминеральным комплексом и фиброй: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Укр. держ. ун-т залізн. тр-та. Харьков, 2015. 26 с.
3. L.Ferrante, J.Tirillò, F.Sarasini, F.Touchard, R.Ecault, M. A.Vidal Urriza, L.Chocinski-Arnault, D.Mellier: Behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites subjected to laser shock wave testing: Preliminary results, *Composites Part B: Engineering*, 2015, № 78. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.084>.
4. Milind V. Mohod Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 2015. Vol. 12, P. 28–36. <https://doi.org/10.9790/1684-12112836>.
5. Subagia I. A., Kim Y., Tijing L. D., Kim C. S., Shon H. K. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part B: Engineering*, 2014. 58. P. 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.027>
6. Dorigato A., Pegoretti A. Flexural and impact behaviour of carbon/basalt fibers hybrid laminates, *Journal of Composite Materials*, 2014. Vol. 48(9). P. 1121-1130. <https://doi.org/10.1177/0021998313482158>.
7. Lim J. II., Rhee K. Y., Kim H. J., Jung D. H. Effect of stacking sequence on the flexural and fracture properties of carbon/basalt/epoxy hybrid composites. *Carbon Letters*, 2014. Vol. 15(2). P. 125-128. <https://doi.org/10.5714/CL.2014.15.2.125>.
8. Khamees S.S., Kadhum M.M., Nameer A.A. Effects of Steel Fibers Geometry on the Mechanical Properties of SIFCON Concrete. *Civ. Eng. J*, 2020. Vol. 6. P. 21–33. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091450>.
9. Ganesh, A.C., Sowmiya, K., Muthukannan M. Investigation on the effect of steel fibers in geopolymer concrete. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 872. P. 012156. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012156>.
10. Chatiras N., Georgiopoulos P., Christopoulos A., Kontou E. Thermomechanical characterization of basalt fiber reinforced biodegradable polymers. *Polym. Compos.* 2019. Vol. 40. P. 4340-4350 <https://doi.org/10.1002/pc.25295>.
11. Kytinou V.K., Chalioris C.E., Karayannis C.G. Analysis of residual flexural stiffness of steel fiber-reinforced concrete beams with steel reinforcement. *Materials*, 2020. Vol. 13(12). P. 2698. <https://doi.org/10.3390/ma13122698>.
12. Wang G., Zhang D., Wan G., Li B., Zhao G. Glass fiber reinforced PLA composite with enhanced mechanical properties, thermal behavior, and foaming ability. *Polymer (Guildf)*, 2019. Vol. 181, P. 121803. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121803>
13. Overkamp T, Mahltig B, Kyosev Y. Strength of Basalt Fibers Influenced by Thermal and Chemical Treatments. *Journal of Industrial Textiles*, 2018. Vol. 47(5). P. 815-833. <https://doi.org/10.1177/1528083716674905>
14. Sudha. C, Mohan G. S. Behaviour of fibre reinforced concrete using basalt fibre in beam column joint under cyclic loading. *ARNP Journal of Engineering and Applied Science*, 2019. Vol. 14. P. 1463-1470.
15. Дорошенко О.Ю. Обґрунтування можливості використання базальтового волокна як компонента цементобетону для транспортного будівництва. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ Харків*, 2021. вип.198. С. 22-29.

REFERENCES

1. Tolmachev S. N. (2013). Razvitie teorii razrusheniya i stojkosti dorozhnyh cementnyh betonov pri dejstvii agressivnyh faktorov [Development of the theory of destruction and resistance of road cement concrete under the action of aggressive factors]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Harkov: Ukr. derzh. akad. zaliznichn. tr-ra [in Ukrainian].
2. Brazhnik A. V. (2015). Monolitnye dorozhnye cementnye betony vysokoj morozostojkosti s organomineralnym kompleksom i fibroj [Monolithic road cement concretes of high frost resistance with organo-mineral complex and fiber]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Harkov: Ukr. derzh. akad. zaliznichn. tr-ra [in Ukrainian].
3. L.Ferrante, J.Tirillò, F.Sarasini, F.Touchard, R.Ecault, M. A.Vidal Urriza, L.Chocinski-Arnault, & D.Mellier. (2015). Behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites subjected to laser shock wave testing: Preliminary results, *Composites Part B: Engineering*, 78, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.084>.
4. Milind V. (2015). Mohod Performance of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 12(1), 28–36. <https://doi.org/10.9790/1684-12112836>.
5. Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S., & Shon, H. K. (2014). Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part B: Engineering*, 58, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.027>.
6. Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2014). Flexural and impact behaviour of carbon/basalt fibers hybrid laminates. *Journal of Composite Materials*, 48(9), 1121-1130. <https://doi.org/10.1177/0021998313482158>.
7. Lim, J. II., Rhee, K. Y., Kim, H. J., & Jung, D. H. (2014). Effect of stacking sequence on the flexural and fracture properties of carbon/basalt/epoxy hybrid composites. Effect of stacking sequence on the flexural and fracture properties of carbon/basalt/epoxy hybrid composites, *Carbon Letters*, 15(2), 125–128. <https://doi.org/10.5714/CL.2014.15.2.125>.
8. Khamees, S. S., Kadhum, M. M., & Nameer, A. A. (2020). Effects of steel fibers geometry on the mechanical properties of SIFCON concrete. *Civil Engineering Journal*, 6(1), 21-33. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091450>.
9. Ganesh, A. C., Sowmiya, K., & Muthukannan, M. (2020, June). Investigation on the effect of steel fibers in

geopolymer concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 872, No. 1, p. 012156). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012156>.

10. Chatiras, N., Georgiopoulos, P., Christopoulos, A., & Kontou, E. (2019). Thermomechanical characterization of basalt fiber reinforced biodegradable polymers. *Polymer Composites*, 40(11), 4340-4350. <https://doi.org/10.1002/pc.25295>.

11. Kytinou, V. K., Chalioris, C. E., & G. Karayannis, C. (2020). Analysis of residual flexural stiffness of steel fiber-reinforced concrete beams with steel reinforcement. *Materials*, 13(12), 2698. <https://doi.org/10.3390/ma13122698>.

12. Wang, G., Zhang, D., Wan, G., Li, B., & Zhao, G. (2019). Glass fiber reinforced PLA composite with enhanced mechanical properties, thermal behavior, and foaming ability. *Polymer*, 181, 121803. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121803>.

13. Overkamp, T., Mahltig, B., & Kyosev, Y. (2018). Strength of basalt fibers influenced by thermal and chemical treatments. *Journal of Industrial Textiles*, 47(5), 815-833. <https://doi.org/10.1177/1528083716674905>.

14. Sudha, C., & Mohan, G. S. (2019). Behaviour of fibre reinforced concrete using basalt fibre in beam column joint under cyclic loading. *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, 14(8), 1463-1470.

15. Doroshenko, O.Yu. (2021) Obgruntuvannya mozhlivosti vikoristannya bazaltovogo volokna yak komponenta cementobetonu dlya transportnogo budivnictva [Justification of the possibility of using basalt fiber as a component of cement concrete for transport construction]. Harkiv: Zbirniku naukovih prac UkrDUZT Harkiv, 198. 22-29 [in Ukrainian].

Oleksandra Doroshenko

Associate Professor, department of railway track and track economy State University of Infrastructure and Technology. St. I. Ohienko, 19, Kyiv, 03049, Ukraine.

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES OF BASALT FIBER MODIFICATION WITH THE PURPOSE OF INCREASING THE EFFICIENCY OF ITS APPLICATION IN TRANSPORT CONSTRUCTION

The article examines the experimental and theoretical justification of the use of basalt fiber, as a promising material, with the help of which it is possible to obtain a new class of building materials.

As a result, it was established that an increase in temperature contributes to an increase in alkali resistance of the fiber. The mass loss during aging in an alkaline solution after 28 days is about 5%, while the initial fiber loses more than 30% of the fiber mass during this time. A further increase in the temperature of isothermal aging is not effective due to a decrease in alkali resistance of the fibers and economic impracticability.

To explain the processes occurring in the structure of the fiber during its heat treatment, X-ray images and spectra of the original and heat-treated fiber were obtained.

In the process of heat treatment from 300 to 500 °C, the processes of defect healing, changes in the chemical composition and surface structure of the fibers occur as a result of $Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$ oxidation and the formation of iron oxide tetrahedra $[FeO_4]Na$ with the attraction of alkaline cations to the surface of the fibers.

The expediency of thermal treatment of basalt fiber at a temperature of 500 °C is substantiated, which leads to compaction of the fiber structure and contributes to increasing its alkali resistance, which is confirmed by the morphostructural features of the surface of heat-treated basalt fiber aged in cement mortar.

Keywords: basalt fiber, transport construction, heat treatment, fiber structure, alkali resistance of fibers, X-ray patterns, spectra.

Андрій Сулим^{1*}, Олександр Сафронів², Павло Хозя³, Андрій Стринжа⁴

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

² Директор, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5865-7756>

³ Завідувач науково-дослідної лабораторії, Науково-дослідна лабораторія експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-6032>

⁴ Завідувач науково-дослідної лабораторії, Науково-дослідна лабораторія вантажного та спеціального рухомого складу, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-7006>

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

ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВАГОНА ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

Описано вид та характеристики такого вантажу як залізорудні окатиші. Наведено технологію виробництва залізорудних окатишів на гірничозбагачувальному комбінаті. Розглянуто процес перевезення залізорудних окатишів магістральними коліями АТ «Укрзалізниця» в напрямку споживачів цієї продукції на прикладі ПАТ «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат». Встановлено, що магістральними коліями залізорудні окатиші перевозяться одним із таких типів вантажних вагонів: універсальними напіввагонами з глуходонним кузовом або розвантажувальними люками, спеціалізованими вагонами-хоперами для перевезення окатишів та агломерату, думпкарми магістрального призначення. Виконано порівняльний аналіз ефективності використання зазначених типів вантажних вагонів за такими техніко-економічними показниками (критеріями) як маса тари, вантажопідйомність, об'єм кузова, питома матеріалоемність, питомий об'єм, габарит, термін служби, міжремонтні пробіги, навантажувальний коефіцієнт тари, коефіцієнт використання місткості кузова, погонне навантаження, вартість, вартість життєвого циклу. Визначено, що найбільш раціональним варіантом для перевезення залізорудних окатишів є використання універсального напіввагона. Подальші дослідження необхідно спрямувати на розроблення типорозмірного ряду спеціалізованих вантажних вагонів з підвищеним погонним навантаженням та покращеними техніко-економічними показниками для перевезення залізорудних окатишів на базі універсального напіввагона.

Матеріали статті сприятимуть раціональному вибору вантажного рухомого складу для перевезення залізничними магістральними коліями такого вантажу як залізорудні окатиші.

Ключові слова: вагон-хопер, вантажний рухомий склад, думпкар, залізорудні окатиші, напіввагон.

Вступ. Залізорудні окатиші – сферичні кульки, одержувані під час подрібнення залізної руди в порошок. Цей оксид заліза формується в окатиші під час використання глини як сполучного компонента, потім обпалюється в печі за температури 1315 °С. Цей вантаж

негорючий, не має особливих небезпек, спеціальні вимоги під час перевезення не встановлені. Насипна щільність залізородних окатишів складає 1,9–2,4 т/м³ [1]. Залізородні окатиші під час перевезення залізничним транспортом належать до категорії вантажів, які не потребують захисту від атмосферних опадів.

Технологія виробництва залізородних окатишів включають такі основні етапи: підрих гірської породи в кар'єрі, перевезення гірської породи з кар'єру до пунктів перевантаження, перевезення залізної руди з пунктів на переробний комплекс, а пустої породи на відвали, виробництво та відвантаження залізородних окатишів, формування рухомого складу з залізородними окатишами та його перевезення до споживачів [2].

Дані статистичних досліджень [3] показують, що обсяги перевезення залізородних окатишів залізничним транспортом щороку збільшуються, що свідчить про збільшення видобутку залізної руди та необхідність пошуку шляхів удосконалення технології перевезень цього типу вантажу.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми. Оптимізацію технології перевезення залізної руди залізничним транспортом на території гірничозбагачувального комбінату, підвищення пропускної спроможності залізничної інфраструктури гірничозбагачувального комбінату в умовах збільшення обсягів перевезення залізної руди, удосконалення та модернізації залізничного рухомого складу магістрального та промислового призначення розглянуто в роботах [4–13]. Аналіз робіт останнього періоду [14–16] дозволив встановити, що поліпшення конструкцій вантажного рухомого складу для перевезення залізородних окатишів передусім направлено на удосконалення несівної та розвантажувальної систем. Однак в зазначених дослідженнях питання раціонального вибору вантажного рухомого складу для перевезення залізородних окатишів магістральними коліями залізниці не розглядалось. Ця тема дослідження має практичне значення та є актуальною, оскільки від вибору вантажного рухомого складу для перевезення залізородних окатишів будуть залежати техніко-економічні показники ефективності використання цього складу, в тому числі його термін окупності.

Мета – здійснити раціональний вибір серед існуючого типу вантажного рухомого складу та обґрунтувати необхідність розроблення спеціалізованого вагона для перевезення залізородних окатишів магістральними коліями АТ «Укрзалізниця».

Матеріал та результати досліджень. В цій роботі здійснення раціонального вибору вантажного рухомого складу для перевезення залізородних окатишів запропоновано розглянути на прикладі функціонування ПАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», яке має повний технологічний цикл – від видобутку сирової залізної руди до виробництва залізородних окатишів.

Процес відвантаження окатишів автоматизований. Щодобово в цеху завантажуються під 40 тис. тонн залізородних окатишів (середня норма 35–36 тис. тон), що становить 9–10 поїздів загальною вагою близько 3700 тонн кожен [2]. Склад формується на території заводу та виставляється на станцію Золотнишине.

Перевезення залізородних окатишів здійснюється на експорт за трьома напрямками – порт Південний, порт Ізмаїл, Західна Європа в співвідношенні 50 %/20 %/ 30 % [2]. За всіма напрямками залізородні окатиші доставляються магістральними коліями залізничного транспорту, де потім вони перевантажуються на вагони з шириною колії 1435 мм або в портах – на судна. Власний парк вагонів покриває потребу в перевезеннях магістральними коліями на 75–80 %, інші 20–25 % – це оренда рухомого складу АТ «Укрзалізниця» або приватних власників. Перевезення залізородних окатишів магістральними коліями з ПАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» здійснюється одним з таких типів вантажного рухомого складу: універсальними напіввагонами з глухо донним кузовом або розвантажувальними люками, спеціалізованими вагонами-хоперами для перевезення окатишів та агломерату, думпкарами магістрального призначення (рис. 1).



Рис. 1. Тип вантажного рухомого складу для перевезення залізрудних окатишів, який використовується ПАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

Як вантажні вагони переважно використовуються напіввагони люкові моделі 12-783, напіввагони глухдонні моделі 12-7019, вагони-хопери для перевезення окатишів та агломерату моделі 20-4015, думпкари магістрального призначення моделі 31-673. Технічні характеристики зазначених типів вантажних вагонів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики вантажних вагонів [17]

Найменування характеристики	Модель вантажного вагона			
	12-783	12-7019	20-4015	31-673
Вантажопідйомність, т	70,0	72,0	70,0	66,0
Об'єм кузова, м ³	78,0	77,5	45,0	35,0
Маса тари вагона, т	24,0	22,0	24,0	27,5
Технічний коефіцієнт тари	0,343	0,306	0,343	0,42
Питомий об'єм, м ³ /т	1,114	1,076	0,643	0,53
Розрахункове навантаження від колісної пари на рейку, кН (тс)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)	230,5 (23,5)
Погонне навантаження, кН/м	66,2	66,2	81,6	77,9
Конструкційна швидкість, км/год	120	120	120	120
Максимальна ширина кузова, мм	3230	3210	3154	3197
Довжина по осях зчеплення, мм	13920	13920	12000	11830
Модель візка	18-100, 18-7055	18-100	18-100	18-100
Габарит по ГОСТ 9238	1-ВМ	1-ВМ	1-ВМ	1-Т
Нормативний строк служби, років	22	22	15	22
Рік постановки на серійне виробництво	2006	2005	1989	1988
Підприємство-виробник	ПАТ «КВБЗ»	ПАТ «КВБЗ»	ПрАТ «Дніпро-вагонмаш»	ВАТ «ДМЗ»

У переважній більшості випадків вантажні вагони завантажуються до максимальної вантажопідйомності на гірничо-збагачувальному комбінаті та слідує одним з вищезазначених напрямків. В зворотному напрямку вантажний рухомий склад слідує порожнім. Таким чином,

перевезення відбуваються на замкнених маршрутах з відносно прогнозованим стабільним графіком. Вивантаження залізрудних окатишів відбувається переважно за допомогою вагоноперекидачів. Далі в цій роботі більш детально зупинимось на процесі перевезення залізрудних окатишів магістральними коліями АТ «Укрзалізниця» зазначеними типами вантажних вагонів з метою визначення серед них раціонального типу шляхом виконання порівняльного аналізу техніко-економічних показників ефективності використання.

Під час вибору вантажного рухомого складу для перевезення того чи іншого вантажу найбільшу роль відіграють два взаємозалежні завдання: визначення спеціалізації вагона та підбір вантажопідйомності. Вантажопідйомність є одним з основних параметрів, однак вона не завжди виражає дійсну кількість вантажу, який може бути перевезено певним типом вантажного вагона.

Для здійснення правильного вибору вантажного вагона мають враховуватися такі елементи (фактори) [18]:

транспортні: вид вантажу і його характеристика; кількість вантажу; обсяг і стабільність перевезень; відстань перевезень; способи навантаження-розвантаження й складська облаштуваність; вид маршрутів і організація перевезень;

конструкційні: кузов; використання маси;

експлуатаційні якості: адаптація кузова; вантажомісткість; зручність використання;

економічні й натуральні критерії: продуктивність вагона, собівартість перевезення; зведені витрати; трудомісткість перевезень; позатранспортний ефект.

Перший елемент (транспортний) розглянуто вище у вступній частині за результатами аналізу матеріалів довідкового характеру та організації процесу перевезення залізрудних окатишів на прикладі ПАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат». Інші елементи (конструкційні, експлуатаційні, економічні й натуральні критерії) запропоновано розглянути за результатами порівняльного аналізу техніко-економічних показників вищеперерахованих моделей вантажних вагонів, здатних здійснювати перевезення залізрудних окатишів магістральними коліями АТ «Укрзалізниця».

Обґрунтування вибору вантажного рухомого складу запропоновано здійснити шляхом виконання порівняльного аналізу за такими техніко-економічними показниками: технічний коефіцієнт тари або питома матеріалоемність, навантажувальний коефіцієнт тари, експлуатаційний коефіцієнт тари, навантажувальний (корисний) об'єм, коефіцієнт використання місткості кузова вагона, питома об'єм, питома вантажопідйомність, вартість, вартість життєвого циклу, питома вартість життєвого циклу в розрахунку на 1 тону вантажу.

Технічний коефіцієнт тари або питома матеріалоемність характеризується співвідношенням маси тари до вантажопідйомності вагона. Цей конструкційний показник для кожної моделі вагона наведено в таблиці 1. Чим цей коефіцієнт менший, тим краща конструкція вагона. Однак технічний коефіцієнт не відображує масу тари вагона, що припадає на тону фактично перевезеного вантажу у визначених умовах експлуатації.

Навантажувальний коефіцієнт тари визначають за формулою [18]:

$$k = \frac{q_m}{\lambda \cdot P_{en}}, \quad (1)$$

де q_m – маса тари вагона, т; λ – кількість використання вантажопідйомності вагона;

P_{en} – вантажопідйомність вагона, т.

$$\lambda = \frac{P_{cm}}{P_{en}^{cp}}, \quad (2)$$

де P_{cm} – статичне навантаження вагона, т; P_{en}^{cp} – середня вантажопідйомність вагона, т.

Цей коефіцієнт дозволяє більш точно відображати експлуатаційні якості вагона та враховувати можливе використання вантажопідйомності вагонів під час перевезення характерних типів вантажів. При цьому навантажувальний коефіцієнт не враховує порожній пробіг вагонів, що залежить від його конструкції.

Експлуатаційний коефіцієнт тари визначають за формулою [18]:

$$k_e = \frac{q_m(1 + \alpha_{nop})}{P_{дн}}, \quad (3)$$

де α_{nop} – коефіцієнт порожнього пробігу (відношення порожнього пробігу вагона до навантаженого); $P_{дн}$ – середнє динамічне навантаження вагона, т.

Навантажувальний корисний об'єм $V_{на\epsilon}$, м³ – та частина повного об'єму, що може бути використана для завантаження вагона певним вантажем. Цей показник визначається як відношення вантажопідйомності вагона до насипної щільності вантажу.

Коефіцієнт використання місткості кузова вагона визначається як відношення навантажувального корисного об'єму кузова вагона для певного роду вантажу до вантажопідйомності вагона [18]:

$$k_v = \frac{V_{на\epsilon}}{V_{пов}}, \quad (4)$$

де $V_{пов}$ – повний геометричний об'єм кузова вагона, т (див. табл. 1).

Питомий об'єм $V_{пит}$, м³/т – співвідношення об'єму кузова вагона і його вантажопідйомності. Значення цього показника для кожної моделі вагона наведено в таблиці 1.

Питома вантажопідйомність – це частина вантажопідйомності вагона, що припадає на 1 м³ геометричного об'єму кузова (т/м³), вона зворотна питомому об'єму кузова вагона [18]:

$$P_{пит} = \frac{P_{ен}}{V_{пов}}. \quad (5)$$

Середня продуктивність вагона E_e робочого парку визначається відношенням вантажообігу загальної кількості експлуатаційних тонно-кілометрів (нетто) до робочого парку вагонів [18, 19]:

$$E_e = \frac{\sum P_{ен} \cdot l_e}{n_e}, \quad (6)$$

де l_e – середньодобовий пробіг вагона робочого парку, км; n_e – кількість вагонів у складі поїзда (робочий парк), шт.

Кількість вагонів у складі поїзда залежно від типу визначається за формулою:

$$n_e = \frac{l_{не}}{L}, \quad (7)$$

де $l_{не}$ – обмеження довжина поїзда, м; L – довжина вагона по осях автотрєпів, м (табл. 1).

Кількість перевезеного вантажу поїздом (m_n , т) визначається як добуток кількості вагонів у поїзді, вантажопідйомності вагона і коефіцієнта, який показує кількість використання вантажопідйомності вагона:

$$m_n = P_{en} \cdot \lambda \cdot n_e. \quad (8)$$

Під час виконання розрахунків за формулами (1)–(8) прийнято, що насипна щільність залізородних окатишів складає 2,1 т/м³. Інші показники обрано з табл. 1 або отримано за даними особливостей перевезення залізородних окатишів, як то $\lambda=1$; $P_{дн(12-783)}=35$ т; $P_{дн(12-7019)}=36$ т; $P_{дн(20-4015)}=35$ т; $P_{дн(31-673)}=33$ т; $l_e = 192$ км; $\alpha_{ноп}=0,5$.

Результати розрахунків за формулами (1)–(6) наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати розрахунків технічних показників

Найменування характеристики	Модель вантажного вагона			
	12-783	12-7019	20-4015	31-673
Навантажувальний коефіцієнт (k)	0,343	0,306	0,343	0,42
Експлуатаційний коефіцієнт тари (k_e)	1,029	0,917	1,029	1,25
Навантажувальний корисний об'єм ($V_{нае}$, м ³)	33,3	34,3	33,3	31,4
Коефіцієнт використання місткості кузова, (k_v)	0,427	0,443	0,74	0,9
Питома вантажопідйомність, ($P_{пит}$, т/м ³)	0,897	0,929	1,556	1,886
Продуктивність вагона, (E_e , т·км нетто)	13440	13824	13440	12672
Кількість перевезеного вантажу поїздом*, (m_n , т)	4270	4392	4900	4686

*Примітка. Визначення можливої кількості перевезеного вантажу поїздом виконано з урахуванням обмеження довжини поїзда 850 м, який прийнято на підставі стандартної довжини станційних приймально-відправних колій.

Вартість життєвого циклу вантажного вагона розраховують за формулою [20, 21]:

$$LCC = C_e + B_e - B_y, \quad (9)$$

де C_e – вартість нового вагона, тис. грн; B_e – вартість експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу вагона, тис. грн; B_y – вартість утилізації або ліквідаційна вартість вагона, тис. грн.

Експлуатаційні витрати протягом життєвого циклу розраховуються за формулою [20–22]:

$$B_e = B_{ек} \cdot \frac{1 - (1 + R)^{-T}}{R} + \sum_{t=0}^T \frac{B_{рем,t}}{(1 + R)^t}, \quad (10)$$

де $B_{ек}$ – середні річні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, поточним ремонтом, усуненням відмов, тис. грн;

R – ставка дисконту, частка;

T – тривалість життєвого циклу (приймається рівною призначеному строку служби вагонів), років;

t – інтервал часу, років;

$B_{рем,t}$ – витрати, пов'язані з плановими ремонтами вагона, тис. грн.

Вартість утилізації або ліквідаційна вартість вагона визначають за формулою [20–22]:

$$B_y = \frac{B_{лік}}{(1 + R)^T}, \quad (11)$$

де $B_{лік}$ – ліквідаційна вартість вагона (вартість на кінець терміну життєвого циклу), тис. грн.

Питома вартість життєвого циклу в розрахунку на 1 т вантажу, перевезеного вагоном, визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{LCC}{P_{en}} = \frac{LCC \cdot n_e}{m_n}, \quad (12)$$

Протягом експлуатаційного етапу життєвого циклу вантажний вагон може знаходитись у таких технологічних станах, що пов'язані з безпосередньою експлуатацією та утриманням вантажного вагона в технічно справному стані:

1. Обслуговування у вантажних поїздах.
2. Утримання в технічно справному стані шляхом проведення технічного обслуговування у пунктах приймання та відправлення вантажів.
3. Відновлення технічного ресурсу шляхом проведення ремонтів:
 - поточного ремонту з відчепленням;
 - деповського ремонту;
 - капітального ремонту КР;
 - капітального ремонту з продовженням терміну експлуатації КРП.

Далі визначено вартість життєвого циклу для досліджуваних моделей вантажних вагонів, які здійснюють перевезення залізничних окатишів, прийнявши термін життєвого циклу вагонів 22 роки. Співставлення LCC об'єктів досліджень між собою дозволяє оцінити порівняльну економічну ефективність використання вагонів залежно від типу та моделей. Вихідні дані для визначення вартості життєвого циклу вищезазначених моделей вантажних вагонів наведено у таблиці 3.

Таблиця 3. Вихідні дані для визначення вартості життєвого циклу вантажних вагонів

Найменування показника	Модель вантажного вагона			
	12-783	12-7019	20-4015	31-673
Вартість нового вагона без ПДВ (C_0 , тис. грн)	1213	1199	1401	1643
Середні річні витрати на технічне обслуговування, поточні ремонти, усунення відмов ($B_{ек}$, тис. грн.)	25	25	20	15
Витрати на один деповський ремонт ($B_{др}$, тис. грн)	50	48	55	58
Витрати на один капітальний ремонт ($B_{кр}$, тис. грн)	70	68	72	73
Витрати на один капітальний ремонт з продовженням терміну експлуатації ($B_{крп}$, тис. грн)	–	–	85	–
Загальний рівень реальної ставки дисконту (R , %)	13,9			

*Примітка. Вартість нових вагонів наведено станом на вересень 2020 р. Вартість вантажних вагонів моделей 20-4015 та 31-673 наведено з урахуванням вартості вагонів-аналогів, які за своїми технічними характеристиками є ідентичними та продовжують серійно виготовлятися.

Результати розрахунків вартості життєвого циклу, зазначених моделей вантажних вагонів, які можуть здійснювати перевезення залізничних окатишів, а також питомої вартості життєвого циклу в розрахунку на 1 тону перевезеного вантажу, виконаних за формулами (6)–(10), наведено в таблиці 4.

Таблиця 4. Результати розрахунку вартості життєвого циклу вагона

Найменування показника	Модель вантажного вагона			
	12-783	12-7019	20-4015	31-673
Вартість життєвого циклу вагона LCC, тис. грн	1476	1459	1711	1899
Питома вартість життєвого циклу в розрахунку на 1 тону вантажу, тис. грн/т	21,1	20,3	24,4	28,8

За результатами аналізу техніко-економічних показників використання вантажних вагонів під час перевезення залізрудних окатишів (табл. 2, 4) встановлено таке:

вантажопідйомність вантажних вагонів максимально використовується незалежно від типу та розглянутих моделей внаслідок значної насипної щільності залізрудних окатишів;

для всіх типів та моделей характерне недостатнє використання місткості кузова вантажного вагона, особливо це стосується універсальних люкових та глухонних напіввагонів, де ефективність використання кузова вагона складає на рівні 42-44%;

найбільша продуктивність зафіксована для глухонного напіввагона, однак продуктивність інших типів вагонів є меншою в незначній мірі;

з урахуванням обмеження довжини поїзда 850 м найбільшу вантажопідйомність поїзда можна сформувати з спеціалізованих вагонів-хоперів для перевезення окатишів та агломерату – 70 вагонів загальною масою нетто вантажу 4900 т, найменшу – з люкових напіввагонів (61 вагон загальною масою нетто вантажу 4270 т);

переваги перевезення залізрудних окатишів глухонними та люковими напіввагонами полягають у універсальності, порівняно низькому навантажувальному коефіцієнті, експлуатаційному коефіцієнті тари; меншій вартості вагона, вартості життєвого циклу, питомій вартості життєвого циклу в розрахунку на 1 тону перевезеного вагоном вантажу. Глухонні напіввагони мають кращі техніко-економічні показники завдяки меншому значенню технічного коефіцієнта тари. При цьому серед недоліків найбільш неефективне використання місткості кузова у порівнянні з іншими типами вагонів;

переваги перевезення залізрудних окатишів спеціалізованими вагонами-хоперами полягають у можливості завантаження вантажу при високих температурах, наявності автоматизованого механізму розвантаження, порівняно низькому навантажувальному коефіцієнті, експлуатаційному коефіцієнті тари; ефективному використанні місткості кузова порівняно з напіввагонами, незначна довжина по осях зчеплення та наявна вантажопідйомність дозволяє сформувати поїзд максимальної ваги. Серед недоліків значна вартість вагона, вартість його життєвого циклу, питома вартість життєвого циклу в розрахунку на 1 тону перевезеного вагоном або поїздом вантажу, неможливість розвантаження за допомогою вагоноперекидача. При цьому слід зазначити, що у вітчизняному вантажному парку залишилась незначна кількість цього типу рухомого складу (близько 5500 вагонів) та його чисельність постійно скорочується;

переваги перевезення залізрудних окатишів думпкарми магістрального призначення полягають у наявності автоматизованого механізму розвантаження, найбільш ефективному використанні місткості кузова порівняно з напіввагонами та спеціалізованими вагонами-хоперами для перевезення окатишів та агломерату, незначна довжина по осях зчеплення та наявна вантажопідйомність дозволяє сформувати поїзд більшої ваги порівняно з напіввагонами. Серед недоліків: високий навантажувальний коефіцієнт, експлуатаційний коефіцієнт тари, значна вартість вагона, вартість його життєвого циклу, питома вартість життєвого циклу в розрахунку на 1 тону перевезеного вантажу, неможливість розвантаження за допомогою вагоноперекидача. При цьому слід зазначити, що у вітчизняному вантажному парку цей тип рухомого складу має найбільшу зношеність на рівні з вагонами хопер-дозаторами (рівень зносу > 98 %) та його чисельність постійно скорочується (на разі налічується близько 2000 вагонів).

Результати розрахунків показали недостатню ефективність використання існуючих типів вантажних вагонів під час перевезення такого вантажу як залізорудні окатиші, головним чином внаслідок недостатнього використання місткості кузова. За техніко-економічними показниками найбільш доцільним є використання універсальних напіввагонів завдяки показникам вартості вагона, вартості життєвого циклу, можливості швидкого розвантаження за допомогою вагоноперекидача та ряду інших показникам. Тому, одним з перспективних напрямів створення спеціалізованого вагона для перевезення залізорудних окатишів є модернізація конструкції універсальних напіввагонів шляхом підвищення ефективності використання місткості кузова та погонного навантаження.

Таким чином, існує потреба в розробленні типорозмірного ряду спеціалізованого вагона для перевезення залізорудних окатишів на базі універсального напіввагона, що дозволить зменшити необхідну чисельність парку вагонів, підвищити ефективність використання вагонів та поліпшити пропускну здатність станцій.

Висновки

1. На прикладі ПАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» визначено, що залізорудні окатиші перевозяться магістральними коліями АТ «Укрзалізниця» одним з наступних типів вантажного рухомого складу: універсальними напіввагонами з глухо донним кузовом або розвантажувальними люками, спеціалізованими вагонами-хоперами для перевезення окатишів та агломерату, думпкарми магістрального призначення.

2. За результатами порівняльного аналізу техніко-економічних показників використання вантажних зазначених типів встановлено, що для перевезення залізорудних окатишів найбільш раціональним є використання універсальних напіввагонів. Основні переваги використання універсальних напіввагонів полягають у мінімальній вартості нового вагона, вартості життєвого циклу, можливості розвантаження за допомогою вагоноперекидача та ряду інших технічних показників.

3. Результати розрахунків показали недостатню ефективність використання існуючих типів вантажних вагонів під час перевезення такого вантажу як залізорудні окатиші, головним чином внаслідок недостатнього використання місткості кузова. Тому, існує необхідність розроблення спеціалізованого вантажного вагона для перевезення залізорудних окатишів з ефективним використанням місткості кузова.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на розроблення типорозмірного ряду спеціалізованих вантажних вагонів з підвищеним погонним навантаженням та покращеними техніко-економічними показниками для перевезення залізорудних окатишів на базі універсального напіввагона.

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила надання послуг у морських портах України. Наказ Мінінфраструктури від 05.06.2013 р. № 348 зі змінами від 12.08.2014 р. № 390; від 30.12.2020 р. № 850. Офіційний вісник України. 2021. № 6, с. 246, стаття 317.
2. Окатышева логистика: Как работает транспорт Полтавского ГОКа. URL: https://cfts.org.ua/poezdka_s_cts/okatyshaya_logistika_kak_rabotaet_transport_poltavskogo_goka_2 (Дата звернення: 19.07.2022)
3. Державна служба статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (Дата звернення: 19.07.2022)
4. Козаченко Д.М., Малашкін В.В., Березовий М.І., Іскра О.І. Дослідження пропускну спроможності залізничної інфраструктури гірничозбагачувального комбінату в умовах збільшення обсягів перевезення сировини. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В.Лазаряна. Серія "Транспортні системи та технології". 2020. Вип. 20. С. 86–93. <https://doi.org/10.15802/tstt2020/217417>.
5. Анофрієв В.Г., Зародов О.О., Ільчишин В.В., Ісепенко І.В., Можейко С.Р., Мокрій Т.Ф., Позняков В.Д., Рейдемейстер О.Г., Ушкалов В.Ф., Шаповал А.В. Розробка конструкцій та машинобудівних технологій створення вантажних вагонів нового покоління. 2014. № 10 (91). С. 4–9.
6. Донченко А.В. Стратегічні плани розвитку галузі транспортного машинобудування щодо створення нових видів рейкового рухомого складу для залізниць та міського господарства у 2008-2020 роках. Збірник наукових праць "Рейковий рухомий склад". 2009. Вип. 1. С. 7–13.

7. Донченко А.В., Сафронов О.М. Вимоги до формування типорозмірного ряду вагонів нового покоління для забезпечення підвищеної провізної спроможності залізниць. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2016. Вип. 13. С. 36–40.
8. Рябов Є.С., Мосін С.В., Овер'янова Л.В., Кондратьєва Л.Ю., Демидов О.В., Гулак С.О. Оцінка технічних параметрів локомотива для залізничного кар'єрного транспорту. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2022. Вип. 39. С. 83–100. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>.
9. Сулим А.О., Стринжа А.М., Бородай О.О., Федоров В.В. Технічні характеристики та шляхи удосконалення вагонів-думпкарів для промислового транспорту. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2021. Вип. 23. С. 54–73. <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-54-73>.
10. Сафронов О.М., Водяніков Ю.Я., Хозя П.О., Можейко А.Є. Гальмівна ефективність кар'єрних поїздів з шестивісними думпкарами підвищеного осьового навантаження до 27,7 тс. Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». 2021. Вип. 23. С. 111–126. <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-111-126>.
11. Сулим А.О., Хозя П.О., Стринжа А.М., Речкалов В.С., Федоров В.В. Шляхи та перспективи удосконалення вагонів-думпкарів. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2022. Вип. 39. С. 51–65. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-6>.
12. Костриця С.А., Федоров Є.Ф., Болотов В.В., Грановська Н.Й. Ходові динамічні та міцнісні випробування вагона-платформи моделі 13-7133 на візках з ковзунами зазорного типу для перевезення крупногабаритних контейнерів // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції, 22-23 квітня 2021 р. / за заг. ред. А.В. Радкевича, Р.В. Рибалки. Дніпров. нац. ун-т. залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2021. С. 307–308.
13. Фомін О.В., Стукало А.В. Оцінка ефективності використання вантажних вагонів удосконалених конструкцій з урахуванням мультиплікативного ефекту для економіки України. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2016. Вип. 35. С. 130–141.
14. Фомін О.В., Сапронова С.Ю., Кочешкова Н.С., Фомін В.В. Аналіз випробувань модернізованих вагонів-хоперів для окатишів та агломерату моделі 20-9749. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». 2017. Вип. 1(37). С. 392–401.
15. Патент України на корисну модель № 122540, МПК (2017.01) В61D 17/00, В61D 3/00 Залізничний напіввагон-хопер для гарячих окатишів та агломерату // Фомін О.В., Фоміна Ю.В., Коваленко В.В., Горбунов М.І., Фомін В.В., Бурлуцький О.В. (Україна); власник СНУ ім. В. Даля. № u2017 01093; заявка 06.02.2017; публ. 26.06.2017; Бюл. 12.
16. Fomin O., Lovska, A., Skliarenko I., Klochkov YU. Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 1, No. 7 (103), P. 65-74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>
17. Альбом-справочник "Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм". 002И-2010 ПКБ ЦВ. 742 с.
18. Вантажні перевезення на залізничному транспорті: Підручник / О.В. Лаврухін та інші. Харків: УкрДУЗТ, 2015. Ч.1. 260 с.
19. Горбенко А.П., Мартинов І.Є. Конструювання та розрахунки вагонів: Навчальний посібник. Харків: УкрДУЗТ, 2007. 150 с.
20. Мартинов І.Є., Калабухін Ю.Є., Труфанова А. Концепція життєвого циклу пасажирського вагона. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2021. Вип. 38. С. 153–163. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-150-14>.
21. Гненний О.М. До питання оцінки та застосування вартості життєвого циклу продукції машинобудування. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В.Лазаряна. Серія "Проблеми економіки транспорту". 2016. Вип. 12. С. 7–13.
22. Мурадян Л.А. Розвиток наукових основ забезпечення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / ДНУЗТ ім. акад. В.Лазаряна. Дніпро, 2020. 377 с.

REFERENCES

1. Pravyly nadannia posluh u morskyykh portakh Ukrainy [Rules for providing services in seaports of Ukraine]. (2021). Nakaz Mininfrastruktury vid 05.06.2013 r. № 348 zi zminamy vid 12.08.2014 r. № 390; vid 30.12.2020 r. № 850 - Order of the Ministry of Infrastructure dated June 5, 2013 No. 348 with amendments dated August 12, 2014, No. 390; dated 12/30/2020 No. 850, *Ofitsiyniy visnyk Ukrainy - Official Gazette of Ukraine*, 6, Art. 317 [in Ukrainian]
2. *Okatyshevaya logistika: Kak rabotaet transport Poltavskogo GOKa [Pellets logistics: How the transport of Poltava GOK works*. URL: https://cfts.org.ua/poezdka_s_cts/okatyshevaya_logistika_kak_rabotaet_transport_poltavskogo_goka_2 (Accessed July 07, 2022)
3. *Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]*. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (Accessed at: July 07, 2022) [in Ukrainian]
4. Kozachenko D.M., Malashkin V.V., Berezovyi M.I., & Iskra O.L. (2020). Doslidzhennia propusknoi spromozhnosti zaliznychnoi in-frastruktury hirnychozbahachovalnoho kombinatu v umovakh zbilshennia obsiahiv perevezennia syrovyny [Study of the throughput capacity of the railway infrastructure of the mining and processing plant in conditions of increased volumes of raw material transportation]. *Zbirnyk naukovykh prats DNUZT im. akad. V.Lazariana. Seriya "Transportni systemy ta*

tehnolohii"- Collection of scientific works of DNUZT named after Acad. V. Lazarian. "Transport systems and technologies" Series, 20, 86–93, <https://doi.org/10.15802/tst2020/217417> [in Ukrainian]

5. Anofriiev, V.H., Zarodov, O.O., Ilchysyn, V.V., Isopenko, I.V., Mozheiko, Ye.R., Mokrii, T.F., Pozniakov, V.D., Reidemeister, O.H., Ushkalov, V.F., & Shapoval, A.V. (2014). Rozrobka konstruktssii ta mashynobudivnykh tekhnolohii stvorennia vantazhnykh vahoniv novoho pokolinnia [Development of structures and machine-building technologies for the creation of new generation freight cars]. *Vahonnyi park – Car fleet*, 10 (91), 4–9 [in Ukrainian]

6. Donchenko, A.V. Stratehichni plany rozvytku haluzi transportnoho mashynobuduvannia shchodo stvorennia novykh vydiv reikovoho rukhomoho skladu dla zaliznyts ta miskoho hospodarstva u 2008-2020 rokakh. [Strategic plans for the development of the transport engineering industry for the creation of new types of rail rolling stock for railways and urban economy in 2008-2020]. (2009). *Zbirnyk naukovykh prats "Reikovy rukhomyi sklad" - Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock"*, 7–13. [in Ukrainian]

7. Donchenko, A.V., & Safronov, O.M. (2016). Vymohy do formuvannia typorozmirmoho riadu vahoniv novoho pokolinnia dla zabezpechennia pidvyshchenoi proviznoi spromozhnosti zaliznyts [Requirements for the formation of a standard-sized series of new-generation wagons to ensure increased transport capacity of railways]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock"*, 36–40 [in Ukrainian]

8. Riabov, Ye.S., Mosin, S.V., Overianova, L.V., Kondratieva, L.Iu., Demydov, O.V., & Hulak, S.O. (2022). Otsinka tekhnichnykh parametriv lokomotyva dla zaliznychnoho kariernoho transport [Evaluation of technical parameters of the locomotive for railway quarry transport]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Serii «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific papers DUIT. "Transport systems and technologies" series*, 39, 83–100. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>. [in Ukrainian]

9. Sulym, A.O., Strynzha, A.M., Borodai, O.O., & Fedorov, V.V. (2021). Tekhnichni kharakterystyky ta shliakhy udoskonalennia vahoniv-dumpkariv dla promysloвого transportu [Technical characteristics and ways of improving dump trucks for industrial transport]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock"*, 23, 54–73. <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-54-73> [in Ukrainian]

10. Safronov, O.M., Vodiannikov, Yu.Ia., Khozia, P.O., & Mozheiko, A.Ie. (2021). Halmivna efektyvnist kariernykh poizdiv z shestyvis-nymy dumpkaramy pidvyshchenoho osovoho navantazhennia do 27,7 ts. [Braking efficiency of quarry trains with six-axle dump trucks of increased axial load up to 27.7 tons]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovy rukhomyi sklad» - Collection of scientific works "Railbound Rolling Stock"*, 23, S. 111–126. <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2021-23-111-126> [in Ukrainian]

11. Sulym, A.O., Khozia, P.O., Strynzha, A.M., Rechkalov, V.S., & Fedorov, V.V. (2022). Shliakhy ta perspektyvy udoskonalennia vahoniv-dumpkariv [Ways and prospects of improvement of dump trucks]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Serii «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific papers DUIT. "Transport systems and technologies" series*, 39, 51–65. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-6>. [in Ukrainian]

12. Kostytsia, S.A., Fedorov, Ye.F., Bolotov, V.V., Hranovska, N.I. (2021). Khodovi dynamichni ta mitsnosni vyprobuvannia vahona-platformy modeli 13-7133 na vizkakh z kovzunamy zazornoho typu dla perevezennia krupnotonazhnykh konteineriv [Running dynamic and strength tests of the platform wagon model 13-7133 on trolleys with clearance-type slides for the transportation of large-tonnage containers]. A.V. Radkevych, R.V. Rybalka (Eds.), // Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu - Problems and prospects for the development of railway transport. *Proceedings of the 81st International Scientific and Practical Conference, April 22-23.* (pp. 307–308). Dnipro: DNUZT im. akad. V. Lazariana [in Ukrainian].

13. Fomin, O.V., & Stukalo, A.V. (2016). Otsinka efektyvnosti vykorystannia vantazhnykh vahoniv udoskonalenykh konstruktssii z urakhuvanniam multiplykatyvnoho efektu dla ekonomiky Ukrainy [Evaluation of the effectiveness of the use of freight cars of improved designs, taking into account the multiplier effect for the economy of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Serii «Transportni systemy i tekhnolohii» - Collection of scientific papers DUIT. "Transport systems and technologies" series*, 35, 130–141 [in Ukrainian]

14. Fomin, O.V., Saponova, S.Iu., Kocheshkova, N.S., & Fomin, V.V. (2017). Analiz vyprobuvan modernizovanykh vahoniv-khoperiv dla okatyshiv ta ahlomeratu modeli 20-9749 [Analysis of tests of modernized hopper wagons for pellets and agglomerate model 20-9749]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Serii «Tekhnichni nauky» - Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*, 1(37), 392–401.

15. Fomin, O.V., Fomina, Yu.V., Kovalenko, V.V., Horbunov, M.I., Fomin, V.V., & Burlutskiy, O.V (2017) *Patent Ukrainy na korysnu model № 122540, MPK (2017.01) B61D 17/00, B61D 3/00 Zaliznychnyi napivvahon-khoper dla hariachykh okatyshiv ta ahlomeratu [Patent of Ukraine for utility model No. 122540, IPC (2017.01) B61D 17/00, B61D 3/00 Railway open hopper wagon for iron ore pellets and agglomerate]*. Vlasnyk SNU im. V. Dalia – Owned by SNU named after V. Dalia. No. u2017 01093; application date is February 06, 2017; publ. June 26, 2017; Bul. 12.

16. Fomin, O., Lovska, A., Skliarenko, I., & Klochkov, Yu. (2020). Substantiating the optimization of the load-bearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1, No. 7 (103), pp. 65-74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>

16 Al'bom-spravochnik "Gruzovye vagony zheleznyh dorog kolei 1520 mm" [Album-reference book "Freight wagons of 1520 mm gauge railways"]. *002I-2010 PKB TsV* [in Russian]

15. Lavrukhin, O.V. (2015). *Vantazhni perevezennia na zaliznychnomu transporti [Freight transportation by rail]*. Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian]

16. Horbenko, A.P., & Martynov, I.E. (2007). *Konstruiuvannia ta rozrakhunky vahoniv [Design and calculations of wagons]* Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian]
17. Martynov, I.E., Kalabukhin, Yu.Ie., & Trufanova A. (2021). Kontsepsiia zhyttievoho tsykladu pasazhyrskoho vahona [Concept of the life cycle of a passenger car]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriia «Transportni systemy i tekhnologii» - Collection of scientific works of DUIT. Series "Problems of transport economy"*, 38, 153–163. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-150-14> [in Ukrainian]
18. Hnennyi, O.M. (2016). Do pytannia otsinky ta zastosuvannia vartosti zhyttievoho tsykladu produktsii mashynobuduvannia [Concerning the issue of evaluation and application of the life cycle cost of engineering products]. *Zbirnyk naukovykh prats DNUZT im. akad. V.Lazariana. Seriia «Problemy ekonomiky transportu» - Collection of scientific works of DNUZT named after Acad. V. Lazaryan. Series "Problems of transport economy"*, 12, 7–13 [in Ukrainian]
19. Muradian, L.A. (2020). Rozvytok naukovykh osnov zabezpechennia nadiinosti vantazhnykh vahoniv na etapakh zhyttievoho tsykladu [Development of the scientific basis for ensuring the reliability of freight cars at the stages of the life cycle]. *Candidate's thesis*. Dnipro: DNUZT im. akad. V.Lazariana [in Ukrainian].

Andrii Sulym^{1*}, Oleksandr Safronov², Pavlo Khozia³, Andrii Strynzha⁴

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

² Director, State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

³ Head of research laboratory, Research laboratory of experimental studies of railway engineering, State Enterprise "Ukrainian Railway Car Building Research Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

⁴ Head of research laboratory, Research laboratory of freight and special rolling stock, State Enterprise "Ukrainian Railway Car Building Research Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE NEED FOR CONSTRUCTION OF A SPECIALIZED WAGON FOR TRANSPORTATION OF IRON ORE PELLETS

The type and characteristics of such cargo as iron ore pellets are described. The manufacturing technique of iron ore pellets at the mining processing plant is given. The process of transporting iron ore pellets along the main tracks of JSC "Ukrzaliznytsia" to the consumers of these products was considered using the example of PJSC "Poltava Mining and Processing Plant". It has been established that iron ore pellets are transported on the main railway tracks by one of the following types of freight wagons: universal gondola cars with a hollow-bottom body or discharge doors, specialized hopper wagons for the transportation of pellets and agglomerate and mainline dump cars. A comparative analysis of the efficiency of the use of the specified types of freight wagons was carried out according to such technical and economic indicators (criteria) as tare weight, carrying capacity, car body volume, material intensity, specific volume, dimensions, service life time, overhaul life, tare loading coefficient, coefficient body capacity utilization, running load, cost, life cycle cost. It was determined that the most rational option for the transportation of iron ore pellets is the use of a universal gondola car. Further research should be directed to the development of a standard-sized series of specialized freight wagons with increased linear load and improved technical and economic indicators for the transportation of iron ore pellets based on a universal gondola car.

The content of the article will contribute to the rational choice of freight rolling stock for the transportation of such kinds of cargo as iron ore pellets on mainline railways.

Keywords: hopper wagon for transporting pellets and agglomerate, rolling stock, dump car, iron ore pellets, gondola-car.

Юрій Калабухін¹, Ігор Мартинов², Альона Труфанова³, Станіслав Мартинов^{4*}

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

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

³ Доцент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>

⁴ Аспірант, Кафедра маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5239-7802>

* Автор, відповідальний за листування: st.mrtvn@gmail.com

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

У статті викладено результати розробки методологічного підходу до визначення складових ефективності модернізації моторвагонного рухомого складу на прикладі використання буксових вузлів з підшипниками нового покоління.

Проаналізовано чинники, що впливають на величину додаткових капітальних витрат на здійснення модернізації електропоїздів удосконаленими буксовими вузлами. Показано, що додаткові капітальні вкладення обумовлені витратами на науково-дослідницькі і дослідно-конструкторські роботи, які пов'язані з модернізацією електропоїздів, а також витратами на придбання та обладнання електропоїзда буксовими вузлами нового покоління взамін базових.

Запропоновано розрахунок річних експлуатаційних витрат на роботу електропоїзда адаптувати до умов конкретного маршруту, що ним обслуговується, та до існуючої системи утримання моторвагонного рухомого складу в технічно справному стані. При цьому виконано розрахунок експлуатаційних показників використання електропоїзда на маршруті.

Проаналізовано вплив модернізації електропоїзда на зміну річних експлуатаційних витрат господарства приміських залізничних перевезень. Визначена середньорічна економія експлуатаційних витрат на ремонт та обслуговування буксових вузлів нового покоління в розрахунку на один електропоїзд серії ЕПЛ9т та дисконтований економічний ефект від модернізації за залишковий період експлуатації електропоїзда. Встановлено, що період повернення додаткових капітальних вкладень не перевищує 5,5 років.

Запропонована науково-практична процедура визначення складових ефективності дозволяє науково обґрунтувати доцільність модернізації електропоїздів буксовими вузлами нового покоління з урахуванням залишкового періоду їх експлуатації.

Ключові слова: моторвагонний рухомий склад, електропоїзд, модернізація, ремонт, обслуговування, ефективність, експлуатаційні витрати, залишковий період експлуатації.

Вступ. Залізничний транспорт є важливою складовою частиною транспортної системи України. Саме залізниці виконують значну частину пасажирообігу, що виконується усіма видами соціального транспорту. Особливо це стосується приміських пасажирських перевезень,

де за кількістю пасажирів, що перевозяться однією одиницею рухомого складу за рейс, моторвагонний рухомий склад (МВРС) не має конкурентів»

Але фінансово-економічні проблеми не обминули АТ «Укрзалізниця». Парк МВРС України складається з моделей, які будувалися переважно у 60-80 рр. минулого сторіччя. Так, станом на 2016 рік в межах нормативного терміну служби знаходилися лише 29 % електро- та дизель-поїздів, а у 45 % був подовжений термін служби. У 2021 році виключення з інвентарного парку потребувала переважна більшість МВРС, тобто їх ресурс практично вичерпаний.

В умовах жорсткої конкуренції на ринку транспортних послуг залізницям зараз вже недостатньо мати просто електро- та дизель-поїзди збільшеної місткості. МВРС нового покоління повинні мати не лише підвищену надійність та поліпшені комфортні умови для пасажирів, але й бути максимально ефективними як з точки зору витрачання енергоресурсів, так і з точки зору утримання в технічно справному стані.

Одним з найбільш вразливих елементів конструкції вагонів електропоїздів є буксові вузли. Їх рівень надійності безпосередньо впливає на рівень безпеки руху. Враховуючи високу вартість буксових підшипників, витрати на їх ремонт та технічне обслуговування займають значну частку у вартості життєвого циклу електропоїзда.

У буксах вагонів електропоїздів протягом багатьох років використовуються циліндричні роликові підшипники з короткими роликами. Багаторічний досвід експлуатації свідчить, що ця конструкція вже не відповідає сучасним вимогам до складових частин МВРС.

У нашій країні і за кордоном ведуться дослідження з питань модернізації та підвищення надійності буксових вузлів рухомого складу з підшипниками кочення. Зусилля вчених і конструкторів спрямовані на оптимізацію параметрів існуючих конструкцій буксових вузлів, а також пошук нових конструктивних і технологічних рішень. За кордоном питанням підвищення надійності буксових вузлів присвячені роботи провідних фірм, що займаються виробництвом підшипників: «SKF» (Швеція), «Timken» (США), «FAG» (Німеччина), «Brenco» (США) та ін.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питанням забезпечення ефективності використання моторвагонного рухомого складу та підвищення якості приміських пасажирських перевезень на залізницях України присвячена значна кількість досліджень як науковців, так і фахівців залізничного транспорту. Основні напрями забезпечення соціально-економічної ефективності приміських пасажирських перевезень висвітлені у роботі [1].

Автори аналізують чинники, що визначають попит на послуги приміського транспорту, структуру переміщень населення у приміському сполученні і приходять до висновку, що показники ефективності повинні бути орієнтованими на розв'язання широкого кола соціально-економічних задач і формувати узагальнений критерій ефективності.

Автор статті [2] справедливо стверджує, що приміські перевезення залізничним транспортом стикаються з рядом проблем, серед яких планова збитковість та небажання місцевих бюджетів покривати збитки, а також критичний знос основних фондів господарства приміських залізничних перевезень. Нині моторвагонний рухомий склад зношений на 86,7 %, дизель-поїзди – 97,1%.

У дослідженні [3] Ейтутіс Г.Д. зазначає, що традиційне збереження за приміськими залізничними перевезеннями статусу соціально значущих у теперішній суспільно-економічній системі України є малообґрунтованим. Він пропонує використовувати нормативно-правові важелі впливу у вигляді контрактів або угод із місцевими держадміністраціями для поступового відновлення та трансформації стратегічного потенціалу залізничного транспорту без утисків соціально незахищених верств населення та інших пільгових категорій громадян.

У роботі [4] розглянуто проблеми та перспективи фінансування приміських пасажирських перевезень. Визначено основні можливі напрями вирішення цих проблем: формування механізмів ефективної фінансово-господарської діяльності залізничного транспорту, а також взаєморозрахунки по відокремлених бізнес-процесах.

Резерви зниження збитковості перевезень за рахунок впровадження нових форм організації розрахункових взаємовідносин подано в статтях [5, 6]. Серед них можна відзначити модернізацію платформ та інших споруд, введення механізму опосередкованого придбання послуг, впровадження автоматизованої обліково-платіжної системи, удосконалення тарифоутворення та ін.

У роботі [7] надається загальний підхід до оцінки економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті, а в роботі [8] визначається методичний підхід щодо визначення ефективності функціонування окремого приміського пасажирського поїзда.

Ефективність приміських пасажирських перевезень залізничним транспортом залежить від багатьох чинників. Серед них необхідно відзначити як технічний стан моторвагонного рухомого складу (рівень спрацювання несучих елементів, довговічність ходових частин, автогальм тощо, зношеність систем забезпечення комфорту, надійність електричних машин), так і здатність існуючої системи ремонту та технічного обслуговування відновлювати працездатний стан. Але переважна більшість досліджень в цьому напрямку спрямована на саме на підвищення ефективності використання електричних машин [9, 10, 11]. Питання підвищення надійності елементів механічної частини залишилось поза увагою дослідників.

Результати досліджень свідчать, що одним із шляхів підвищення надійності роликів букс є використання здвоєних конічних підшипників касетного типу [12, 13, 14, 15].

Це пояснюється тим, що при наявності зіставних за величиною радіальних і осьових навантажень, що характерно для залізничного буксового вузла, конічні підшипники мають найменші сили тертя та рівень нагріву.

На теперішній час у світовій практиці в основу техніко-економічного обґрунтування інвестиційних заходів покладено методологію оцінки життєвого циклу. Враховуючи той факт, що запропонована модернізація розповсюджується на існуючий парк електропоїздів, ефективність даного заходу слід розглядати за залишковий період їх експлуатації. Проведення такої оцінки передбачає досконале вивчення та урахування економіко-технологічних властивостей буксових вузлів нового покоління, їх надійність та ремонтпридатність з урахуванням тривалого періоду експлуатації.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка науково-практичної процедури визначення складових ефективності модернізації електропоїздів буксовими вузлами нового покоління з урахуванням залишкового періоду експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

провести аналіз чинників, що впливають на величину додаткових капітальних витрат при здійсненні модернізації;

адаптувати процедуру визначення економії річних експлуатаційних витрат від модернізації електропоїздів до умов експлуатації та до існуючої системи утримання їх в технічно справному стані;

проаналізувати вплив модернізації електропоїзду на зміну в структурі річних експлуатаційних витрат господарства приміських залізничних перевезень;

розглянути ефективність модернізації за залишковий період експлуатації електропоїзда.

Матеріали та методи дослідження. Ефективність модернізації електропоїздів буксовими вузлами нового покоління взамін базових визначається додатковими капітальними витратами та економією експлуатаційних витрат.

Витрати на обладнання електропоїздів буксовими вузлами нового покоління визначаються:

програмою обладнання за роками розрахункового періоду, N_t ;

вартістю робіт з обладнання одного електропоїзда, K_m , грн.

Економія експлуатаційних витрат обумовлена зменшенням витрат на ремонт та обслуговування буксових вузлів за рахунок підвищення надійності їх роботи та зменшення трудомісткості робіт з утримання їх в технічно справному стані.

В цій статті розглядаються лише питання зменшення витрат на ремонт та обслуговування буксових вузлів електропоїздів.

Додаткові капітальні вкладення $\Delta K_{\text{нддкр}}$, що обумовлені розробкою, виробництвом та втіленням буксових вузлів нового покоління до експлуатації визначаються кошторисом витрат на науково-дослідницькі і дослідно-конструкторські роботи, які пов'язані з модернізацією електропоїздів.

Додаткові капітальні витрати безпосередньо на здійснення модернізації з обладнання вагонів електропоїзда буксовими вузлами нового покоління взамін базових пов'язані з монтажньо-демонтажними роботами і визначаються вартістю робіт з обладнання одного електропоїзда буксовими вузлами. Ці витрати обумовлені, в основному, витратами на матеріали, на заробітну плату, відрахуваннями на соціальні заходи та витратами на придбання буксових вузлів нового покоління. В розрахунку на один електропоїзд ці витрати визначаються за формулою

$$\Delta K_{\text{м}} = \Delta K_{\text{пр.}} + K_{\text{дем}} + K_{\text{монт}}, \quad (1)$$

де $\Delta K_{\text{пр.}}$ – додаткові витрати на придбання буксових вузлів нового покоління взамін базових для оснащення електропоїзда, грн.;

$K_{\text{дем}}$ – витрати на демонтаж базових буксових вузлів електропоїзда, грн.;

$K_{\text{монт}}$ – витрати на монтаж буксових вузлів нового покоління для оснащення електропоїзда, грн.

Додаткові витрати на придбання буксових вузлів нового покоління взамін базових для оснащення електропоїзда визначаються за формулою

$$\Delta K_{\text{пр.}} = 4 \times 2 \times n_{\text{в}} \times (\text{Ц}_{\text{б.в}}^{\text{н}} - \text{Ц}_{\text{б.в}}^{\text{б}}), \quad (2)$$

де 4 – кількість вісей вагона електропоїзда;

2 – кількість буксових вузлів на одну вісь вагона електропоїзда;

$n_{\text{в}}$ – кількість вагонів у складі електропоїзда;

$\text{Ц}_{\text{б.в}}^{\text{н}}$ – ціна придбання буксового вузла нового покоління, грн.;

$\text{Ц}_{\text{б.в}}^{\text{б}}$ – ціна придбання базового буксового вузла, грн.

Витрати на демонтаж базових буксових вузлів електропоїзда визначаються за формулою

$$K_{\text{дем}} = 4 \times 2 \times n_{\text{в}} \times [c_i \times t_{\text{дм}} \times (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{дод}}) \times (1 + k_{\text{с.з}}) + V_{\text{дм}}^{\text{м}}], \quad (3)$$

де c_i – годинна тарифна ставка слюсаря i -го розряду при відрядній формі оплати праці, грн.;

$t_{\text{дм}}$ – трудомісткість демонтажу одного базового буксового вузла, чол-год.;

$k_{\text{пр}}$ – коефіцієнт, який враховує виплату премії;

$k_{\text{дод}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату;

$k_{\text{с.з}}$ – коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні заходи;

$V_{\text{дм}}^{\text{м}}$ – витрати на матеріали на демонтаж одного базового буксового вузла, грн.

Витрати на монтаж буксових вузлів нового покоління для оснащення електропоїзда визначаються за формулою

$$K_{\text{монт}} = 4 \times 2 \times n_{\text{в}} \times [c_i \times t_{\text{м}} \times (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{дод}}) \times (1 + k_{\text{с.з}}) + V_{\text{м}}^{\text{м}}], \quad (4)$$

де $t_{\text{м}}$ – трудомісткість монтажу одного буксового вузла нового покоління, чол-год.;

$V_{\text{м}}^{\text{м}}$ – витрати на матеріали на монтаж одного буксового вузла нового покоління, грн.

Вважаємо, що модернізація електропоїздів за рахунок використання буксових вузлів нового

покоління виконується під час проведення капітального ремонту. Розглядаються тільки електропоїзди змінного струму серії ЕПЛ19Г, як ті, що мають найбільший залишковий період експлуатації.

Використання буксових вузлів нового покоління для електропоїздів дозволить скоротити експлуатаційні витрати господарства приміських залізничних перевезень на ремонт та обслуговування буксових вузлів за рахунок підвищення надійності їх роботи та зменшення трудомісткості робіт з утримання їх в технічно справному стані.

Розрахунок річних експлуатаційних витрат на роботу електропоїзда слід проводити стосовно типових умов експлуатації або за умовами конкретного маршруту, що ним обслуговується [8]. Цьому передують розрахунок експлуатаційних показників використання електропоїзда на маршруті за парним та непарним напрямком. До них слід віднести пасажирообіг $AL_{обк}$ та вантажообіг $QL_{обк}$ за k -им маршрутом, який обслуговується електропоїздом.

Пасажирообіг за k -м маршрутом визначається за формулою

$$AL_{обк} = \sum_{k=п.н.}^{нп.н} \sum_{i=1}^{i=n} (A_i \cdot l_i), \quad (5)$$

де A_i – кількість пасажирів, що знаходяться в електропоїзді на i -му перегоні маршруту, пас.;

l_i – довжина i -го перегону маршруту, км;

п.н., нп.н. – напрямок руху електропоїзда відповідно, парний та непарний;

n – кількість перегонів на маршруті.

Вантажообіг за k -им маршрутом визначається за формулою

$$QL_{обк} = \frac{m_{пас} \cdot AL_{обк}}{1000} + 2 \times L_k \times (n_{г.} \times m_{т.г.} + n_{п.} \times m_{т.п.} + n_{м.} \times m_{т.м.}), \quad (6)$$

де $m_{пас}$ – середня маса пасажирів з багажем, кг;

($n_{г.}$, $n_{п.}$, $n_{м.}$ – кількість вагонів у складі електропоїзда відповідно, головних, причіпних та моторних;

$m_{т.г.}$, $m_{т.п.}$, $m_{т.м.}$ – маса тари вагонів відповідно, головних, причіпних та моторних, т.;

L_k – довжина k -ого маршруту електропоїзда, км.

Оборот електропоїзда на k -му маршруті визначається за формулою

$$T_{обк} = \tau_{пр.о.д.} + \tau_{пр.об.д.} + \frac{1}{60} \times \left[\sum_{i=1}^{i=n} (t_i^{п.н.} + t_i^{нп.н.}) + \sum_{j=1}^{j=m} (\tau_j^{п.н.} + \tau_j^{нп.н.}) \right], \quad (7)$$

де $\tau_{пр.о.д.}$, $\tau_{пр.об.д.}$ – час простою електропоїзда відповідно, в основному та оборотному депо, год.;

$t_i^{п.н.}$, $t_i^{нп.н.}$ – час руху електропоїзда відповідно, у парному та непарному напрямках на i -му перегоні маршруту без урахування часу простою на зупиночних пунктах, хв.;

$\tau_j^{п.н.}$, $\tau_j^{нп.н.}$ – час простою електропоїзда на j -му зупиночному пункті маршруту відповідно, у парному та непарному напрямках, хв.;

n , m – кількість відповідно, перегонів та зупиночних пунктів на маршруті.

Час руху електропоїзда, час простою на зупиночних пунктах на конкретному маршруті визначається графіком руху приміських поїздів.

Річна кількість днів курсування електропоїзда на k -му маршруті залежно від графіка

курсуювання протягом тижня визначається за формулою:

$$D_{k.pik_k} = \frac{365 \times D_{k.tzdk}}{7}, \quad (8)$$

де $D_{k.tzdk}$ – кількість днів курсування електропоїзду на k -му маршруті протягом тижня, днів.

Річний пасажирообіг за маршрутами, які обслуговуються електропоїздом, визначається за формулою

$$AL_{pik} = \sum_{k=1}^{k=z} (AL_{ob_k} \times D_{k.pik_k}) = \sum_{k=1}^{k=z} (AL_{ob_k} \times \frac{365 \times D_{k.tzdk}}{7}), \quad (9)$$

де z – кількість маршрутів, які обслуговуються електропоїздом.

Річний вантажообіг за маршрутами, які обслуговуються електропоїздом визначається за формулою:

$$QL_{pik} = \sum_{k=1}^{k=z} (QL_{ob_k} \times D_{k.pik_k}) = \sum_{k=1}^{k=z} (QL_{ob_k} \times \frac{365 \times D_{k.tzdk}}{7}). \quad (10)$$

Річний час роботи електропоїзда на маршрутах визначається за формулою

$$T_{pik} = \sum_{k=1}^{k=z} (T_{ob_k} \times D_{k.pik_k}) = \sum_{k=1}^{k=z} (T_{ob_k} \times \frac{365 \times D_{k.tzdk}}{7}). \quad (11)$$

Річний пробіг електропоїзда за маршрутами визначається за формулою

$$S_{pik} = \sum_{k=1}^{k=z} \left(2 \times L_k \times \frac{365 \times D_{k.tzdk}}{7} \right). \quad (12)$$

Середньодобовий пробіг електропоїзда визначається за формулою

$$S_{dob} = \frac{24 \times S_{pik}}{T_{pik}}. \quad (13)$$

Враховуючи той факт, що буксовими вузлами нового покоління буде оснащатися існуючий парк електропоїздів, кожен з котрого має залишковий період експлуатації $T_{з.п}$, кількість повної заміни буксових вузлів нового покоління за цей період визначається за формулою

$$f_{б.в}^н = \frac{T_{з.п}}{T_{б.в}^н} - 1, \quad (14)$$

де $T_{б.в}^н$ – термін служби буксового вузла нового покоління, роки.

Для базових буксових вузлів кількість повної заміни за залишковий період експлуатації електропоїзда визначається за формулою

$$f_{б.в}^б = \frac{T_{з.п}}{T_{б.в}^б} - 1. \quad (15)$$

де $T_{б.в}^б$ – термін служби базового буксового вузла, роки.

Витрати на заміну буксових вузлів після завершення їх терміну служби визначаються за формулами:

НОВОГО ПОКОЛІННЯ

$$B_{3.б.в}^H = 4 \times 2 \times n_B \times [\Pi_{б.в}^H + c_i \times (t_M^H + t_{DM}^H) \times (1 + k_{пр} + k_{дод}) \times (1 + k_{с.з}) + B_M^H], \quad (16)$$

БАЗОВИХ

$$B_{3.б.в}^б = 4 \times 2 \times n_B \times [\Pi_{б.в}^б + c_i \times (t_M^б + t_{DM}^б) \times (1 + k_{пр} + k_{дод}) \times (1 + k_{с.з}) + B_M^б], \quad (17)$$

де n_B – кількість вагонів у складі електропоїзда;

$\Pi_{б.в}^H, \Pi_{б.в}^б$ – ціна одного буксового вузла відповідно, нового покоління та базового, грн.;

c_i – годинна тарифна ставка слюсаря i -го розряду при відрядній формі оплати праці, грн.;

t_M^H, t_{DM}^H – трудомісткість монтажу та демонтажу одного буксового вузла нового покоління, чол.-год.;

$t_M^б, t_{DM}^б$ – трудомісткість монтажу та демонтажу одного базового буксового вузла, чол.-год.;

$k_{пр}$ – коефіцієнт, який враховує виплату премії;

$k_{дод}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату;

$k_{с.з}$ – коефіцієнт, який враховує відрахування на соціальні заходи;

$B_M^H, B_M^б$ – витрати на матеріали на монтаж одного буксового вузла відповідно, нового покоління та базового, грн.

Економія експлуатаційних витрат на заміну буксових вузлів після завершення їх терміну служби за весь залишковий період експлуатації електропоїзда визначається за формулою

$$\Delta B_{3.б.в} = f_{б.в}^б \times B_{3.б.в}^б - f_{б.в}^H \times B_{3.б.в}^H. \quad (18)$$

На теперішній час в основу утримання тягового рухомого складу залізниць України в технічно справному стані покладено планово-попереджувальну систему ремонту, яка регламентується відповідним положенням Укрзалізниці з встановленням міжремонтних періодів та міжремонтних пробігів [16]. Для електропоїздів цим документом передбачено для проведення технічного обслуговування ТО-3 та поточного ремонту ПР-1 міжремонтні періоди в добах, для поточних та капітальних ремонтів – міжремонтні пробіги в км.

Виходячи з норм міжремонтних пробігів кількість ремонтів та обслуговувань електропоїзда за залишковий період експлуатації визначається за формулами:

$$N_{КР-2} = \frac{S_{рік} \times T_{з.п}}{L_{КР-2}}, \quad (19)$$

$$N_{КР-1} = \frac{S_{рік} \times T_{з.п}}{L_{КР-1}} - N_{КР-2}, \quad (20)$$

$$N_{ПР-3} = \frac{S_{рік} \times T_{з.п}}{L_{ПР-3}} - N_{КР-2} - N_{КР-1}, \quad (21)$$

$$N_{ПР-2} = \frac{S_{рік} \times T_{з.п}}{L_{ПР-2}} - N_{КР-2} - N_{КР-1} - N_{ПР-3}, \quad (22)$$

де $T_{з.п}$ – залишковий період експлуатації електропоїзда, роки;

$L_{КР-2}, L_{КР-1}, L_{ПР-3}, L_{ПР-2}$ – норми міжремонтних пробігів електропоїзда між ремонтами відповідно, КР-2, КР-1, ПР-3, ПР-2, тис. км.

Виходячи з норм міжремонтних періодів кількість ремонтів ПР-1 та обслуговувань ТО-3 електропоїзда за залишковий період експлуатації визначається за формулами:

$$N_{\text{ПР-1}} = \frac{365 \times T_{3.п}}{t_{\text{ПР-1}}} - N_{\text{КР-2}} - N_{\text{КР-1}} - N_{\text{ПР-3}} - N_{\text{ПР-2}}, \quad (23)$$

$$N_{\text{ТО-3}} = \frac{365 \times T_{3.п}}{t_{\text{ТО-3}}} - N_{\text{КР-2}} - N_{\text{КР-1}} - N_{\text{ПР-3}} - N_{\text{ПР-2}} - N_{\text{ПР-1}}, \quad (24)$$

де $t_{\text{ПР-1}}$ – норма міжремонтного періоду електропоїзда між ремонтами ПР-1, діб.

$t_{\text{ТО-3}}$ – норма міжремонтного періоду електропоїзда для проведення технічного обслуговування ТО-3, діб.

Середня кількість поточних ремонтів, що припадає на один рік залишкового періоду експлуатації електропоїзда визначається за формулами:

$$\bar{n}_{\text{ПР-3}} = \frac{N_{\text{ПР-3}}}{T_{3.п}}. \quad (25)$$

$$\bar{n}_{\text{ПР-2}} = \frac{N_{\text{ПР-2}}}{T_{3.п}}. \quad (26)$$

$$\bar{n}_{\text{ПР-1}} = \frac{N_{\text{ПР-1}}}{T_{3.п}}. \quad (27)$$

Середня кількість технічних обслуговувань ТО-3, що припадає на один рік залишкового періоду експлуатації електропоїзда визначається за формулою

$$\bar{n}_{\text{ТО-3}} = \frac{N_{\text{ТО-3}}}{T_{3.п}}. \quad (28)$$

Середньорічна економія експлуатаційних витрат господарства приміських залізничних перевезень на утримання буксових вузлів в технічно справному стані в розрахунку на один електропоїзд визначається за формулою

$$\Delta B_{\text{у.б.в}} = 4 \times 2 \times n_{\text{в}} \times (\bar{n}_{\text{ПР-3}} \times \Delta B_{\text{ПР-3}} + \bar{n}_{\text{ПР-2}} \times \Delta B_{\text{ПР-2}} + \bar{n}_{\text{ПР-1}} \times \Delta B_{\text{ПР-1}} + \bar{n}_{\text{ТО-3}} \times \Delta B_{\text{ТО-3}}), \quad (29)$$

де 4 – кількість вісей вагона електропоїзда;

2 – кількість буксових вузлів на одну вісь вагона електропоїзда;

$n_{\text{в}}$ – кількість вагонів у складі електропоїзда;

$\Delta B_{\text{ПР-3}}, \Delta B_{\text{ПР-2}}, \Delta B_{\text{ПР-1}}, \Delta B_{\text{ТО-3}}$ – економія поточних витрат на утримання буксового вузла в технічно справному стані в обсязі ремонтних робіт відповідно, ПР-3, ПР-2, ПР-1, ТО-3.

Середньорічна економія експлуатаційних витрат господарства приміських залізничних перевезень на повну заміну та утримання буксових вузлів в технічно справному стані в розрахунку на один електропоїзд визначається за формулою

$$\Delta B_{б.в} = \frac{\Delta B_{з.б.в}}{T_{з.п}} + \Delta B_{у.б.в}. \quad (30)$$

У таблиці 1 наведено результати розрахунку економічного ефекту від модернізації електропоїзда.

Таблиця 1. Результати розрахунку економічного ефекту від модернізації електропоїзда

Найменування показника	Значення показника
Серія електропоїзда	ЕПЛ9Т
Кількість вагонів у складі електропоїзда:	
головних	2
моторних	4
причпних	2
Періодичність курсування, днів за тиждень	7
Середньодобовий пробіг електропоїзда, км	668
Річний пробіг електропоїзда, км	243820
Залишковий період експлуатації електропоїзда, років	16
Пробіг електропоїзда за залишковий період експлуатації, тис. км	3901,12
Періодичність:	
- капітального ремонту КР-2, тис. км	2100
- капітального ремонту КР-1, тис. км	700
- поточного ремонту ПР-3, тис. км	350
- поточного ремонту ПР-2, тис. км	175
- поточного ремонту ПР-1, діб	60
- технічного обслуговування ТО-3, діб	7
Середня кількість поточних ремонтів електропоїзда, що припадає на один рік залишкового періоду:	
- ПР-3	0,313
- ПР-2	0,375
- ПР-1	4,69
Середня кількість технічних обслуговувань ТО-3, що припадає на один рік залишкового періоду експлуатації електропоїзда	46,1
Витрати на НДДКР, тис. грн.	66,0
Додаткові капітальні витрати на модернізацію електропоїзда, тис. грн.	697,8
Середньорічна економія експлуатаційних витрат на ремонт та обслуговування буксових вузлів електропоїзда, тис. грн.	186,4
Дисконтований економічний ефект за залишковий період експлуатації, тис. грн.	694,55
Період повернення додаткових капітальних вкладень, років	5,5

На рис. 1 наведено динаміку зміни дисконтованого економічного ефекту від експлуатації модернізованого електропоїзда за роками залишкового періоду.

Висновки. В роботі запропоновано науково-практичну процедуру визначення складових ефективності модернізації електропоїздів буксовими вузлами нового покоління. Проведено аналіз чинників, що впливають на величину додаткових капітальних витрат на здійснення

модернізації. Розрахунок річних експлуатаційних витрат на роботу електропоїзда адаптовано до умов конкретного маршруту, що ним обслуговується та до існуючої системи утримання моторвагонного рухомого складу в технічно справному стані.

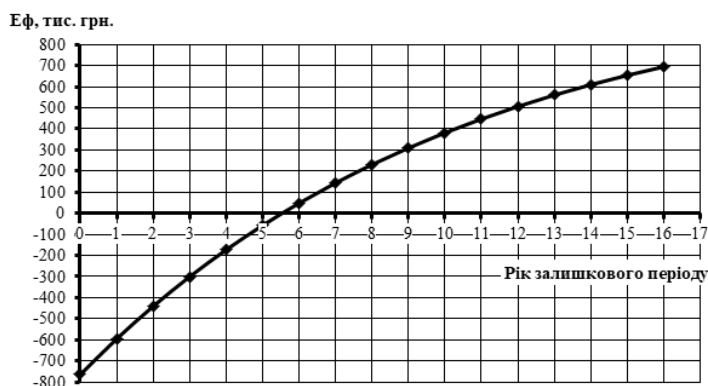


Рис. 1. Динаміка зміни дисконтованого економічного ефекту від експлуатації модернізованого електропоїзда за роками залишкового періоду

Середньорічна економія експлуатаційних витрат на ремонт та обслуговування буксових вузлів нового покоління складає 186,4 тис. грн. в розрахунку на один електропоїзд серії ЕПЛ9т.

Дисконтований економічний ефект від модернізації за залишковий період експлуатації електропоїзда складає 694,55 тис. грн., а період повернення додаткових капітальних вкладень – 5,5 років.

Даний підхід дозволяє науково обґрунтувати доцільність модернізації існуючого парку електропоїздів буксовими вузлами нового покоління з урахуванням залишкового періоду експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кристопчук М. Є., Лобашов О. О. Приміські пасажирські перевезення: навч. посіб. Харків: НТМТ, 2012. 224 с.
2. Дода К. С. Реформа приміських пасажирських залізничних перевезень і розвиток регіонів. Сайт журналу "Центр транспортних стратегій". URL: https://cfts.org.ua/blogs/reforma_primiskikh_pasazhirskikh_zaliznichnikh_perevezen_i_rozvitok_reghoniv_431 (дата звернення: 17.08.2022).
3. Ейтутіс Г. Д. Стратегія реформування залізниць України на основі регіоналізації транспортного обслуговування: дис. ...д-ра економ. наук: 08.00.03 / Рада по вивченню продуктивних сил України НАН України. Київ, 2010. 452 с.
4. Дикань В. Л., Елагин Ю. В. Перспективи фінансування приміських пасажирських перевезень в умовах акціонування залізничного транспорту. Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету, 2016. № 4. С. 46-48.
5. Яновський П. О., Гудкова В. П., Гудков О. М. Транспортне забезпечення населення у приміському сполучення. Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту. Сер. Економіка і управління. Київ: КУЕТТ, 2005. Вип. 7. С. 105-113.
6. Яновський П. О., Гудкова В. П., Гудков О. М. Фактори розвитку приміських перевезень на залізничному транспорті. Збірник наукових праць Київського університету економіки і технологій транспорту. Сер. Проблеми підвищення ефективності інфраструктури. Київ: КУЕТТ, 2006. Вип. 12. С. 173-177.
7. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: навч. посібник / Є. І. Балака, та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.
8. Бараш Ю.С., Сначов М. П., Матусевич О. О., Кравченко Х. В. Методичний підхід щодо визначення ефективності функціонування окремого приміського пасажирського поїзда. Зб. наук. пр. ДНУЗТ імені В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту», 2014. Вип. 7. С. 88-100.
9. Жемеров Г. Г., Холод О. І. Пути модернізації систем електропостачання метрополитена. Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силовa електроніка та енергоефективність", 2012. Ч. 1. С. 27-35.
10. Гетьман Г. К., Марикуца С. Л. Выбор рациональных параметров номинального режима электропоездов с асинхронным тяговым приводом. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 3 (69) С. 65-74.

11. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. 444 с.
12. Конструкция осевых подшипников экспериментального высокоскоростного поезда Star-21. Железные дороги мира, 1996. № 7. С.21-24.
13. Ioannides E., Berling G., Gabelli A. The SKF formula for rolling bearing life. Evolution, 2001. №1. P. 25-28.
14. Tarawneh C. M., Sotelo L., Villarreal A. A., de los Santos N., Lechtenberg R. L., Jones, R. Temperature profiles of railroad tapered roller bearings with defective inner and outer rings. ASME/IEEE Joint Rail Conference. 2016, April. American Society of Mechanical Engineers, 2016. Vol. 49675, p. V001T06A018. <https://doi.org/10.1115/JRC2016-5816>.
15. Lima J.D. Residual service life prognostic models for tapered-roller bearings. Master's Thesis, University of Texas Rio Grande Valley, 2020. 62 p.
16. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового та моторвагонного рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро- та дизель- поїздів): затв. Наказом Укрзалізниці 429-Ц/ОД від 15.10.2015 р. – Київ: Укрзалізниця, 2015. 45 с.

] REFERENCES

1. Krystopchuk, M. YE., & Lobashov, O. O. (2012). *Prymis'ki pasazhyrs'ki perevezennya [Suburban passenger transportation]*. Kharkiv: NTMT [in Ukrainian].
2. Doda, K. C. *Reforma prymis'kykh pasazhyrs'kykh zaliznychnykh perevezen' i rozvytok rehioniv [Reform of suburban passenger rail transportation and development of regions]*. (2019). Sayt zhurnalu "Tsentр transportnykh stratehiy" [Site of the magazine "Center of Transport Strategies"]. Retrieved from https://cfts.org.ua/blogs/reforma_primiskikh_pasazhirsikh_zaliznichnikh_perevezen_i_rozvitok_rehioniv_431 [in Ukrainian]
3. Eytutis, H. D. (2010) *Stratehiya reformuvannya zaliznyts' Ukrayiny na osnovi rehionalizatsiyi transportnoho obsluhovuvannya [The strategy of reforming the railways of Ukraine based on the regionalization of transport services]*. Doctor's thesis. / Kyiv: Rada po vyvchennyu produktyvnykh syl Ukrayiny NAN Ukrayiny [in Ukrainian].
4. Dykan', V. L., & Elahyn, Yu. V. (2016). *Perspektyvy finansuvannya prymis'kykh pasazhyrs'kykh perevezen' v umovakh aktsionuvannya zaliznychnoho transportu [Prospects for financing suburban passenger transport in conditions of shareholding of railway transport]*. *Naukovyy visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu – Scientific Bulletin of the International Humanitarian University*, 4, 46-48 [in Ukrainian].
5. Yanovs'kyu, P. O., Hudkova V. P., & Hudkov O. M. (2005). *Transportne zabezpechennya naseleennya u prymis'komu spoluchennya [Transport provision of the population in suburban traffic]*. *Zbirnyk naukovykh prats' Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohiy transportu. Ser. Ekonomika i upravlinnya – Collection of scientific papers of the Kyiv University of Economics and Transport Technologies. Ser. Economics and management*. 7, 105-113 [in Ukrainian].
6. Yanovs'kyu, P. O., Hudkova V. P., & Hudkov O. M. (2006). *Faktory rozvytku prymis'kykh perevezen' na zaliznychnomu transporti [Development factors of suburban transportation by rail transport]* *Zbirnyk naukovykh prats' Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohiy transportu. Ser. Problemy pidvyshchennya efektyvnosti infrastruktury – Collection of scientific papers of the Kyiv University of Economics and Transport Technologies. Ser. Problems of improving infrastructure efficiency*, 12, 173-177 [in Ukrainian].
7. Balaka, Ye. I., Zorina, O. I., Kolesnykova, N. M., & Pysarevs'kyi I. M. (2005). *Otsinka ekonomichnoyi dotsil'nosti investytsiy v innovatsiyini proekty na transporti [Assessment of the economic feasibility of investments in innovative transport projects]*. Kharkiv: UkrDAZT,210 [in Ukrainian].
8. Barash, Yu. S., & Snachov, M. P., & Matushevych, O. O., & Kravchenko KH. V. (2014). *Metodychnyy pidkhid shchodo vyznachennya efektyvnosti funktsionuvannya okremoho prymis'koho pasazhyrs'koho poyizda [A methodical approach to determining the effectiveness of the functioning of a separate suburban passenger train]*. *Zbirnyk naukovykh prats' Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni V. Lazaryana «Problemy ekonomiky transportu» – Collection of scientific works of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan "Problems of transport economy"*, 7, 88-100 [in Ukrainian].
9. Zhemerov H. H., & Kholod O. Y. (2012). *Puty modernyzatsyyi system élektrosnabzhenyya metropolytena [Ways of modernization of metro power supply systems]*. *Tekhnichna elektrodynamika. Temat. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist" – Technical electrodyamics. Subject. issue "Power electronics and energy efficiency"*, 1. 27-35 [in Ukrainian].
10. Het'man, H. K., & Marykutsa S. L. (2017). *Vybor ratsyonal'nykh parametrov nomynal'noho rezhyma élektropoezdov s asynkronnym tyahovym pryvodom [Selection of rational parameters of the nominal mode of electric trains with asynchronous traction drive]*. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transport – Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 3 (69). 65-74. [in Ukrainian].
11. Get'man, G. K. (2008). *Nauchnyye osnovy opredeleniya ratsional'nogo moshchnostnogo ryada tyagovykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta. [Scientific bases for determining the rational power range of traction means of railway transport]* Dnipropetrovs'k: DNUZT im. akad. V. Lazaryana, 444 [in Ukrainian].

12. Konstruktsiya osevykh podshipnikov eksperimental'nogo vysokoskorostnogo poyezda Star-21 [The design of axial bearings of the experimental high-speed train Star-21] (1996). *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the world*, 7, 21-24 [in Russian]

13. Ioannides, E., Bergling, G., & Gabelli, A. (2001). The SKF formula for rolling bearing life. *Evolution*, 1, 25-28.

14. Tarawneh, C. M., Sotelo, L., Villarreal, A. A., de los Santos, N., Lechtenberg, R. L., & Jones, R. (2016, April). Temperature profiles of railroad tapered roller bearings with defective inner and outer rings. In *ASME/IEEE Joint Rail Conference* (Vol. 49675, p. V001T06A018). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/JRC2016-5816>.

15. Lima JD (2020) Residual service life prognostic models for tapered-roller bearings. Master's Thesis, University of Texas Rio Grande Valley, 62/

16. Polozhennya pro planovo-poperedzhuval'nu systemu remontu i tekhnichnoho obsluhovuvannya tyahovoho ta motorvohonoho rukhomoho skladu (elektrovoziv, teplovoziv, elektro- ta dyzel'- poyizdiv). (2015) zatv. Nakazom Ukrzaliznytsi 429-TS/OD vid 15.10.2015 r. – Kyiv, 45.

Yuri Kalabukhin¹, Igor Martynov², Alyona Trufanova³, Stanislav Martynov⁴

¹ Professor, Department Marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach sq., Kharkiv, 61050, Ukraine

² Professor, Department Wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach sq., Kharkiv, 61050, Ukraine

³ Associate Professor, Department Wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach sq., Kharkiv, 61050, Ukraine

⁴ Postgraduate, Department Marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach sq., Kharkiv, 61050, Ukraine

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE EFFICIENCY OF THE MODERNIZATION OF ELECTRIC TRAINS

The article presents the results of the development of a methodological approach to determining the components of the efficiency of the modernization of rolling stock using the example of the exploitation of bushing units with new generation bearings.

Factors affecting the amount of additional capital costs for the modernization of electric trains with improved bushing units are analyzed. It is shown that additional capital investments arise due to the costs of research and development works, which are associated with the modernization of electric trains, as well as the costs of purchasing and equipping an electric train with new-generation bushing units instead of basic ones.

It is proposed to adapt the calculation of the annual operating costs for the operation of the electric train to the conditions of the specific route served by it and to the existing system of maintaining the rolling stock in a technically sound condition. At the same time, the calculation of operational indicators of the use of the electric train on the route was performed.

The influence of electric train modernization on the change in the annual operating costs of the suburban rail transport economy is analyzed. The average annual savings in operating costs for the repair and maintenance of the new generation of bogie assemblies per one electric train of the EPL9t series and the discounted economic effect of modernization for the remaining period of operation of the electric train were determined. It was established that the payback period for additional capital investments does not exceed 5.5 years.

The proposed scientific and practical procedure for determining the components of efficiency allows to scientifically justify the feasibility of modernizing electric trains with new-generation bogies, taking into account the remaining period of their operation.

Keywords: rolling stock, electric train, modernization, repair, maintenance, efficiency, operating costs, residual period of operation.

Євген Рябов^{1*}, Лілія Овер'янова², Дмитро Якунін³, Ірина Білоконь⁴, Сергій Гулак⁵

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

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

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

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

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3995-3162>

⁴ Директор, Кременчуцький фаховий коледж транспортної інфраструктури та технологій, вул. Леонова, 14, м. Кременчук, Полтавська область, 39600, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-3994>

⁵ Доцент, Кафедра «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна.

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

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

ЗАСТОСУВАННЯ МАНЕВРОВИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ДЛЯ ПЕРЕДАТНОЇ ТА ВИВІЗНОЇ РОБОТИ

У роботі проведено огляд маневрових електровозів, використання яких набуває поширення внаслідок менших витрат на паливно-енергетичні ресурси та зниження впливу на навколишнє середовище. Розроблено математичні моделі руху поїзда з маневровим електровозом. Для дослідження запропоновано чотиривісний електровоз потужністю 750 кВт. Розроблено математичну модель руху поїзда з тепловозом ЧМЕЗ. Для порівняння витрат на паливно-енергетичні ресурси для вивізних та передатних операцій проведено моделювання руху поїзда по ділянках шляху Харків-Сортувальний – Мерефа та Харків-Сортувальний – Люботин з різною кількістю вагонів. Моделювання проведено для руху з маневровим електровозом і тепловозом ЧМЕЗ. Встановлено, що витрати на паливно-енергетичні ресурси у випадку застосування маневрового електровозу менші у 2,5 – 3 рази у порівнянні з тепловозом ЧМЕЗ. На основі отриманих результатів запропоновано для оновлення маневрового рухомого складу для електрифікованих ділянок залізниць застосовувати локомотиви системи *dual mode*. Локомотив має бути оснащений енергоефективним електроприводом та комбінованою енергетичною установкою на основі сучасного дизельного двигуна або іншого первинного джерела енергії у поєднанні з бортовою системою накопичення енергії та інтелектуальним управлінням потоками енергії у тяговій системі.

Ключові слова: маневровий локомотив, електрична тяга, тягова задача, витрата палива, енергоефективність, моделювання.

Вступ. Забезпечення транспортних потреб національної економіки за рахунок розвиненого та модернізованого транспорту та декарбонізація транспортної галузі з метою досягнення кліматичної нейтральності визначені Національною економічною стратегією на період до 2030 р. як стратегічні цілі для транспортного напрямку [1]. Ключову роль у досягненні зазначених цілей

посідає вітчизняний залізничний транспорт, який, по-перше, має можливість обслуговувати усі галузі економіки, а по-друге – має великий потенціал та резерви для впровадження сучасних енергоощадних технологій, що позитивно впливає на підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Перевагами електрифікованого залізничного транспорту є низька вартість перевезень та вплив на навколишнє середовище [4]. Зважаючи на те, що наразі близько 50% колій електрифіковано та планується подальша електрифікація ліній, а також враховуючи досвід інших країн щодо застосування електричної тяги для маневрових операцій, вбачається доцільним проведення досліджень з оцінки застосування маневрових електровозів [5].

Першими маневровими електровозами стали локомотиви ЕГМ (рис 1, а) та ЕГТ (рис. 1, б), які були перероблені з тепловозів типу ТГМ для живлення від контактної мережі. Цільовим проєктуванням маневрових електровозів займався Дніпровський електровозобудівний завод. У 1963 р. завод почав виготовляти маневровий електровоз змінного струму ВЛ41 (рис. 2, а) та ВЛ26 (рис. 2, б).

За кордоном маневрові електровози представлені моделями Skoda 33E (рис. 3, а) та Skoda 51E (рис.3, б), які експлуатуються і у теперішній час. Розвитком цих електровозів став маневровий електровоз серії 218 (рис. 3, в), який виготовляється з 2008 р.

У Польщі у 90-х роках минулого сторіччя створено маневровий електровоз ЕМ10 (рис. 4, а), а в Туреччині у 2021 р. – маневровий електровоз Е1000 (рис. 4, б).

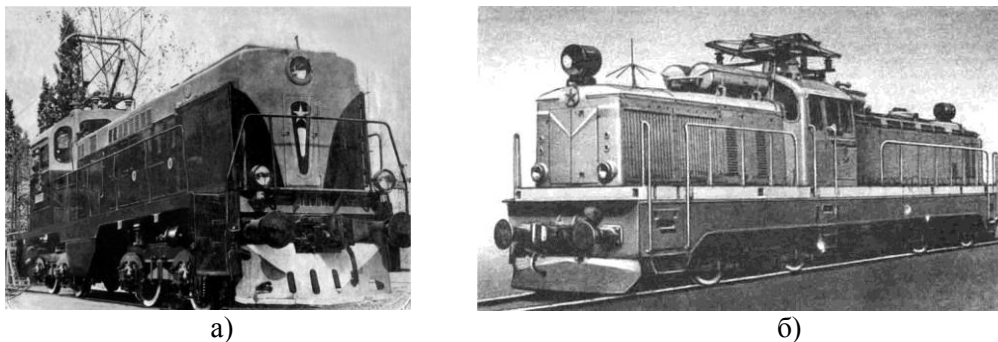


Рис. 1. Маневрові електровози

а – маневровий електровоз ЕГМ; б – маневровий електровоз ЕГТ



Рис. 2. Маневрові електровози розробки ДЕВЗ

а – маневровий електровоз ВЛ41; б – маневровий електровоз ВЛ26

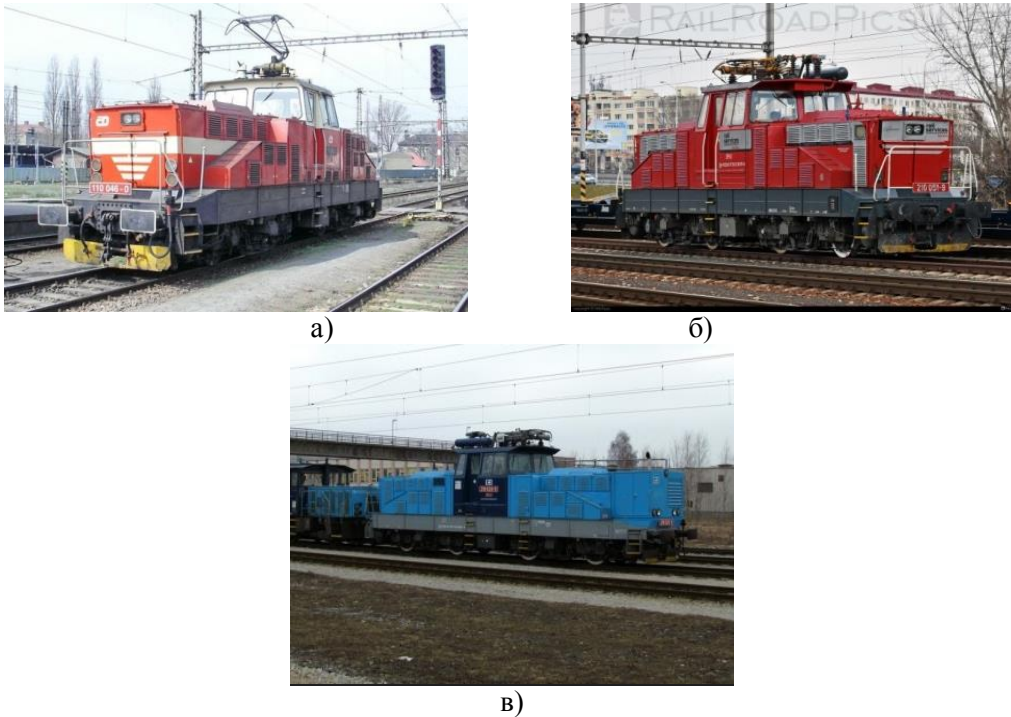


Рис. 3. Маневрові електровози чеських виробників
а – маневровий електровоз Skoda 33E; б – маневровий електровоз Skoda 51E;
в – маневровий електровоз серії 218



Рис. 4. Маневрові електровози
а – маневровий електровоз EM10; б – маневровий електровоз E1000

Найбільшого поширення маневрові електровози знайшли у Швейцарії, мережа залізниць якої майже повністю електрифікована. У різні часи для швейцарських залізниць були створені маневрові електровози як шляхом модернізації старих локомотивів, так і виготовлення нових машин. До першої категорії можна віднести електровози OBV1063 (рис. 5, а) та OBV1163 (рис. 5, б), до другої – електровози E922 (рис. 5, в) та Geaf 2/2 (рис. 5, г).

На теперішній час низка виробників розширює модельний ряд маневрових електровозів.

Компанія Stadler пропонує електровоз He 4/4 для зубчастої залізниці (рис 6, а) та NG Shunting (рис. 6, б).

Китайський виробник локомотивів CRRC пропонує маневрові електровози, побудовані на основі платформи DM20 (рис. 7). Електровоз побудований за концепцією e-hybrid, яка передбачає застосування бортового накопичувача енергії.



а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Маневрові електровози залізниць Швейцарії

а – маневровий електровоз OBB1063; б – маневровий електровоз OBB1163;
в – маневровий електровоз E922; г – маневровий електровоз Geaf 2/2



а)



б)

Рис. 6. Маневрові електровози компанії Stadler

а – електровоз He 4/4 для зубчатої залізниці; б – маневровий електровоз NG Shunting



Рис. 7. Маневровий електровоз DM20 EBB

Також слід зазначити, що ведуться розробки маневрових локомотивів, які будуються за концепцією dual mode: передбачається їх робота як від контактної мережі, так і від дизель-генератора або накопичувача енергії. За такою схемою побудовані локомотиви Class 38 (рис. 8, а) та ED1600 (рис. 8, б).

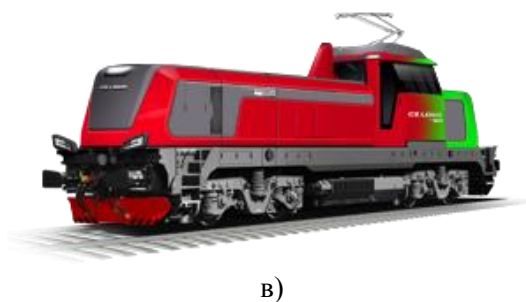
Компанією Alstom створено декілька модифікацій локомотива Prima H4, які передбачають роботу як за концепцією dual mode, так і за принципом e-hybrid (рис. 9, а). Аналогічно побудований локомотив HDB800 розробки Toshiba (рис. 9, б) та проєкт локомотива DualShunter 2000 від CZ LOCO (рис. 9, в).



а) **Рис. 8. Маневрові локомотиви**
а – маневровий локомотив Class 38; б – маневровий локомотив ED1600



а) б)



в)
Рис. 9. Dual mode локомотиви
а – локомотив Alstom Prima H4; б – локомотив Toshiba HDB800;
в – локомотив CZ LOCO DualShunter 2000

З наведених прикладів бачимо, що застосування маневрових електровозів є вельми поширеним на залізницях. Ключові мотиви у цьому – зниження вартості маневрової роботи та зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Загальноприйнятною практикою при впровадженні нових локомотивів є розрахунок вартості їх життєвого циклу відповідно з урахуванням рекомендацій EN 50126 [6]. Практика проведення таких розрахунків показує, що значну частину – 40...60% вартості життєвого циклу складають витрати на паливно-енергетичні ресурси, внаслідок чого зменшення споживання енергоресурсів вважається ключовим напрямом для зниження вартості життєвого циклу [7]. Виходячи з цього, проведено оцінку експлуатаційних втрат при застосуванні маневрових електровозів.

Метою роботи є дослідження застосування маневрових електровозів для передатної та вивізної роботи на електрифікованих ділянках.

Матеріали та методи дослідження. Для аналізу використання нового рухомого складу застосовують моделювання його функціонування на певному циклі роботи [8-13].

Наразі для маневрової роботи на лініях АТ «Укрзалізниця» використовуються тепловози серії ЧМЕЗ [14]. Оскільки порівняння досліджуваного маневрового електровоза буде проводитися співставно до тепловозу ЧМЕЗ, то маневровий електровоз повинен мати тягові характеристики, близькі до характеристик тепловозу ЧМЕЗ. Аналіз його характеристик показує, що при номінальній потужності дизеля його дотична потужність дорівнює 730...750 кВт. Для розрахунків приймаємо 750 кВт.

Приймемо, що маневровий електровоз – чотиривісний. Осьове навантаження – 225 кН. Тоді, з урахуванням рекомендацій щодо коефіцієнту зчеплення локомотивів [15, 16], сила тяги при зрушенні має бути не меншою 300 кН. Це величина менша від сили тяги при зрушенні тепловоза ЧМЕЗ, яка дорівнює 360 кН. Однак оскільки досліджується робота локомотива при «легкій» маневровій роботі, цією відмінністю можна знехтувати. На рис. 10 наведено граничну тягову характеристику досліджуваного маневрового електровоза. Гранична гальмівна характеристика може бути прийнята дзеркальною тяговій відносно осі абсцис.

Для дослідження нами прийнято ділянку шляху між станціями Харків-Сортувальний та Мерефа (профіль ділянки показано на рис. 11, а) а також Харків-Сортувальний та Люботин Південної залізниці (профіль ділянки показано на рис. 11, б).

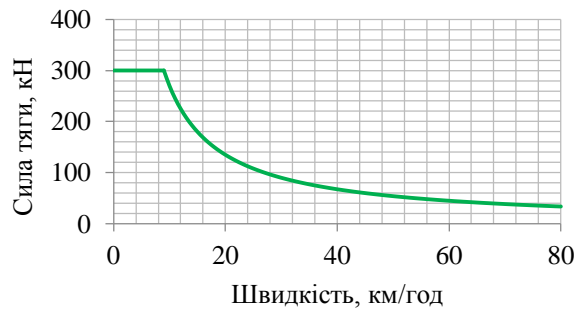


Рис. 10. Гранична тягова характеристика маневрового електровоза

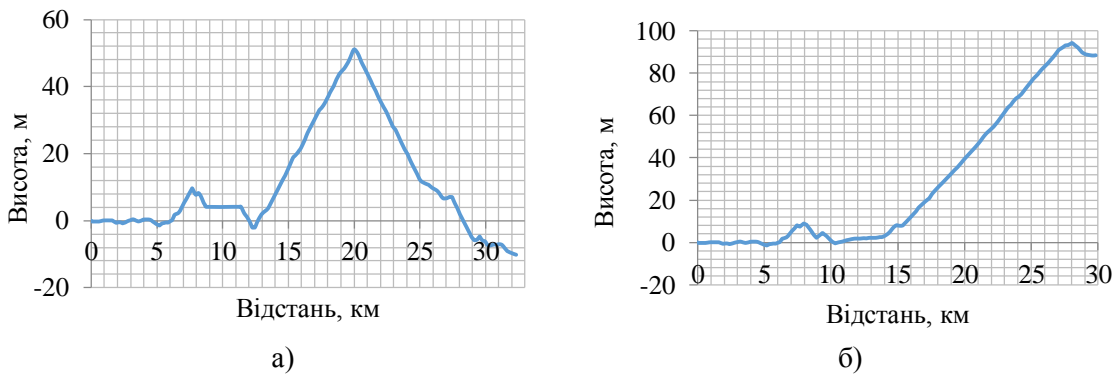


Рис. 11. Профіль шляху

а – ділянка Харків-Сортувальний – Мерефа; б – ділянка Харків-Сортувальний – Люботин

При створенні моделі руху поїзда з маневровим електровозом прийнято, що поїзд моделюється як ланцюг твердих тіл, що з'єднані абсолютно жорстким зв'язком. Це підвищує точність розрахунків сил опору рухові. Система рівнянь руху має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{\xi}{\rho} (f_L - (w_L + w_W) - b), \\ \frac{dS}{dt} = V \end{cases} \quad (1)$$

де ξ – коефіцієнт, що враховує одиниці вимірювання; V – швидкість поїзду; t – час; S – шлях; ρ – коефіцієнт, що враховує обертання вузлів екіпажної частини; f_L – питома дотична сила локомотиву у режимі тяги або електродинамічного гальмування; w_L – питома сила опору рухові електровозу; w_W – питома сила опору рухові вагонів; b – питома гальмівна сила пневматичних гальм.

Питома дотична сила локомотива у режимі тяги або електродинамічного гальмування визначалася за виразом

$$f_L = \frac{F_L}{\sum_{k=1}^s M_{Lk} + \sum_{j=1}^n M_{Wj}}, \quad (2)$$

де F_L – дотична сила електровоза у режимі тяги або електродинамічного гальмування; M_{Lk} – маса секції локомотива; s – кількість секцій локомотива; M_{Wj} – маса вагона; n – кількість вагонів.

Дотична сила локомотива з асинхронним тяговим електроприводом може приймати будь-яке значення у тяговій області [17].

Питомий опір рухові локомотива та вагонів визначався за виразом

$$w = w_o + w_i + w_r + w_p + w_b, \quad (3)$$

де w_o – основний питоми опір рухові; w_i – додатковий питоми опір рухові від ухилу; w_r – додатковий питоми опір рухові від руху по кривій; w_p – додатковий питоми опір рухові; w_b – додатковий питоми опір при рушанні.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору та рекомендації щодо застосування наведено у [18, 19].

При моделюванні прийнято, що службове гальмування для підтримання швидкості руху здійснюється електродинамічним гальмом, а зупиночне – пневматичним гальмом. Розрахунок гальмівної сили пневматичного гальма здійснюється відповідно до [18, 19].

Як зазначалося вище, з метою уточнення розрахунку сил опору, поїзд моделювався як ланцюг твердих тіл. У цьому випадку питоми опір від ухилу та під час руху по кривій визначався для кожного вагона чи секції електровозу окремо. При цьому прийнято припущення, що вагон повністю знаходиться на ділянці шляху, якщо його центр мас знаходиться у межах ділянки.

Модель руху поїзда доповнено регулятором дотичної сили у вигляді

$$F_L = \begin{cases} F_{UC}, & V < (V_{\max} - \Delta V) \\ 0, & (V_{\max} - \Delta V) \leq V < V_{\max} \\ -F_{UC}, & V > V_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

де F_{UC} – сила тяги на граничній тяговій характеристиці при швидкості V , V_{\max} – допустима швидкість руху; ΔV – зона «нечутливості».

У режимі електродинамічного гальмування зростання дотичної сили відбувається з максимальною інтенсивністю. Такий опис зміни дотичної сили у певному сенсі відповідає ручному керуванню електровозом.

Дотична потужність визначалася за виразом

$$P_L = F_L V . \quad (5)$$

Потужність, яка споживається маневровим електровозом, розрахована за виразом

$$P_{IN} = P_L + \Delta P_{TD} + P_{AUX} , \quad (6)$$

де ΔP_{TD} – втрати у тяговому електроприводі, P_{AUX} – потужність, що споживається для живлення допоміжних систем,

Сума втрат у тяговому електроприводі та потужність допоміжних систем розраховується за виразом

$$\Delta P_L = \Delta P_{TD} + P_{AUX} = P_{Lnom} \frac{1 - \eta_L}{\eta_L} , \quad (7)$$

де P_{Lnom} – дотична потужність електровоза у номінальному режимі, дорівнює 750 кВт, η_L – ККД електровоза.

Для даному етапі – стадії попереднього дослідження – можна прийняти, що ККД маневрового електровоза дещо менший за ККД магістрального електровоза, який повинен бути не менш ніж 86...87,5% залежно від виду струму. При подальших розрахунках приймемо, що ККД маневрового електровоза складає 85% при роботі по граничній тяговій характеристиці у зоні постійної потужності. Тоді сума втрат у тяговому електроприводі та потужність допоміжних систем, розраховані за виразом (7), складе 132 кВт.

При роботі у зоні постійної сили тяги припустимо, що сума втрат у тяговому електроприводі та потужність допоміжних систем є постійною величиною.

Енергія, яку споживає електровоз, визначається за виразом

$$E_{IN} = \sum_{k=1}^m \int_0^{t_i} P_{INk}(t) dt , \quad (8)$$

де $P_{INk}(t)$ – залежність потужності, яку споживає електровоз, на k -етапі тягового режиму, m – кількість етапів тягового режиму.

Підвищенню енергоефективності рухомого складу сприяє використання рекуперації. Приймемо, що при рекуперації живлення допоміжних систем електровозу здійснюється від тягового електроприводу, який працює у режимі електродинамічного гальмування. Тоді потужність визначається за виразом

$$P_{OUT} = P_L - \Delta P_L . \quad (9)$$

Енергія, яка може бути віддана, визначається за виразом

$$E_{OUT} = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_i} P_{OUTi}(t) dt, \quad (10)$$

де $P_{OUTi}(t)$ – залежність потужності рекуперації у часі на i -етапі електродинамічного гальмування, n – кількість етапів електродинамічного гальмування.

Таким чином, вирази (1)-(10) становлять математичну модель руху поїзду з маневровим електровозом на ділянці шляху.

При моделюванні руху поїзду з маневровим тепловозом ЧМЕЗ рух поїзду описується виразами (1) – (3) з відповідним використанням даних по цьому тепловозу.

При моделюванні керування використані положення, подані у [20]. Маневровий тепловоз ЧМЕЗ має 8 детермінованих тягових характеристик [14]. Робота на кожній із характеристик задається позицією контролера машиніста. Математичний опис переключень контролера машиніста може мати вигляд

$$DCP = \begin{cases} DCP + 1, & V \leq (V_{\max} - \Delta V), \\ 0, & V > (V_{\max} - \Delta V) \end{cases} \quad (11)$$

де DCP – номер позиції контролера машиніста.

Дотична сила визначається як

$$F_L = \begin{cases} F_{DCP}(V), & V \leq V_{\max} - \Delta V, \\ -B, & V > V_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

де $F_{DCP}(V)$ – тягова характеристика, які відповідає поточній позиції контролера машиніста, B – гальмівна сила.

На тепловозах ЧМЕЗ здебільшого відсутнє реостатне гальмо. Втім для спрощення розрахунків прийемо, що наявна можливість електродинамічного гальмування з граничною тяговою характеристикою, дзеркальною до тягової характеристики при номінальній потужності дизеля.

Загальна витрата палива визначається за виразом

$$G = \sum_{j=1}^p G_{DCPj} t_j, \quad (13)$$

де G_{DCPj} – годинна витрата палива на поточній позиції контролера машиніста на j -му режиму руху, t_j – тривалість j -го режиму роботи, виражена у годинах. p – кількість режимів роботи.

Таким чином, вирази (1)-(3) та (11)-(13) утворюють математичну модель руху поїзду з тепловозом ЧМЕЗ.

У табл. 1 та 2 наведено результати розрахунків споживання паливно-енергетичних ресурсів при русі по ділянках Харків-Сортувальний – Мерефа та Харків-Сортувальний – Люботин при різній кількості вагонів. Розрахунки виконані для руху з маневровим електровозом та маневровим тепловозом ЧМЕЗ. Тягові характеристики тепловозу прийнято відповідно до [14], палива наведена у [21]. При розрахунках прийнято, що вагони – чотиривісні, маса навантаженого вагона – 84 т [18]. Вартість електроенергії прийнята 4 тис.грн/МВт·год [22], вартість палива 53 тис.грн/м³ [23].

Таблиця 1. Результати розрахунків споживання паливно-енергетичних ресурсів під час руху по ділянці Харків-Сортувальний – Мерефа

Параметр	Од.вим.	Значення				
		2	4	6	8	10
Кількість вагонів	шт.	2	4	6	8	10
Енергія, яка споживається маневровим електровозом	кВт·год	205	273	332	382	427
Витрата палива тепловозом ЧМЕЗ	кг	33,8	48,1	62,5	73,5	83,7
Вартість електроенергії	грн	820	1092	1328	1528	1708
Вартість палива	грн	2185	3109	4040	4751	5410

Таблиця 2. Результати розрахунків споживання паливно-енергетичних ресурсів від час руху по ділянці Харків-Сортувальний – Люботин

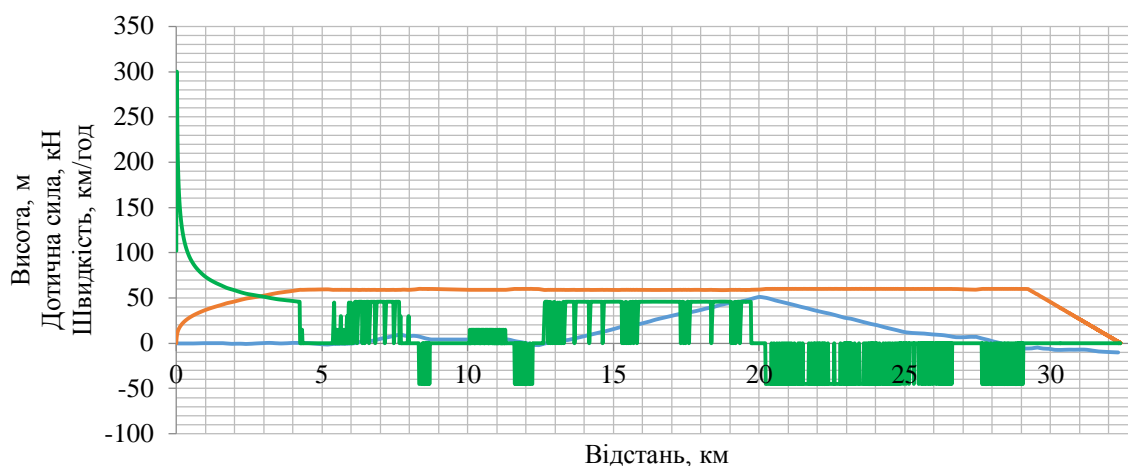
Параметр	Од.вим.	Значення				
		2	4	6	8	10
Кількість вагонів	шт.	2	4	6	8	10
Енергія, яка споживається маневровим електровозом	кВт·год	240	323	395	445	497
Витрата палива тепловозом ЧМЕЗ	кг	53,4	66,5	79,5	88,7	100
Вартість електроенергії	грн	960	1292	1580	1780	1988
Вартість палива	грн	3451	4298	5138	5733	6463

Для ілюстрації розрахунків на рис. 12 та 13 показані графічні залежності швидкості (лінія червоного кольору), дотичної сили (лінія зеленого кольору), витрати палива (лінія фіолетового кольору) від відстані для руху 5-ти вагонного поїзда від станції Харків-Сортувальний до станції Мерефа (рис.12) та станції Люботин (рис.13). Лінією синього кольору на цих рисунках показано поздовжній профіль.

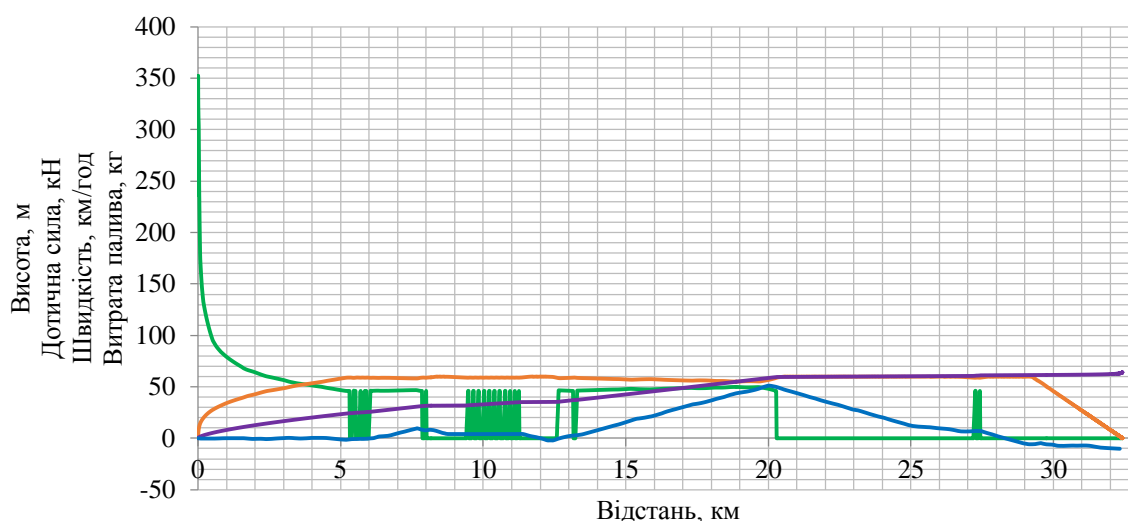
Аналіз даних результатів розрахунків, наведених у табл. 1 і 2 свідчить, що витрати на паливно-енергетичні ресурси у випадку застосування маневрових електровозів у 2,5 – 4 рази нижчі у порівнянні з використанням маневрових тепловозів ЧМЕЗ. Варто зазначити, що у модернізованих тепловозів ЧМЕЗ, де застосовано сучасний дизельний двигун, прогнозована економія палива сягне близько 25 % (а також знизиться у кілька разів споживання моторної оливи) у порівнянні з серійним тепловозом [24]. Та й у цьому випадку витрати на паливо для тепловоза перевищують витрати на оплату електроенергії, спожиту маневровим електровозом.

Зважаючи на припущення, які притаманні будь-якому моделюванню, та неточність і неповність початкових даних, отримана відмінність у величині витрат на паливно-енергетичні ресурси буде змінюватись. Проте варто очікувати, що при використанні маневрових електровозів витрати будуть меншими.

Таким чином, з урахуванням результатів [25], очікуваним результатом від застосування маневрових електровозів є зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси при виконанні маневрових операцій. При оновленні маневрового рухомого складу, для електрифікованих ділянок доцільним є замовлення локомотивів системи dual mode, що забезпечить їх роботу на неелектрифікованих ділянках.



а)



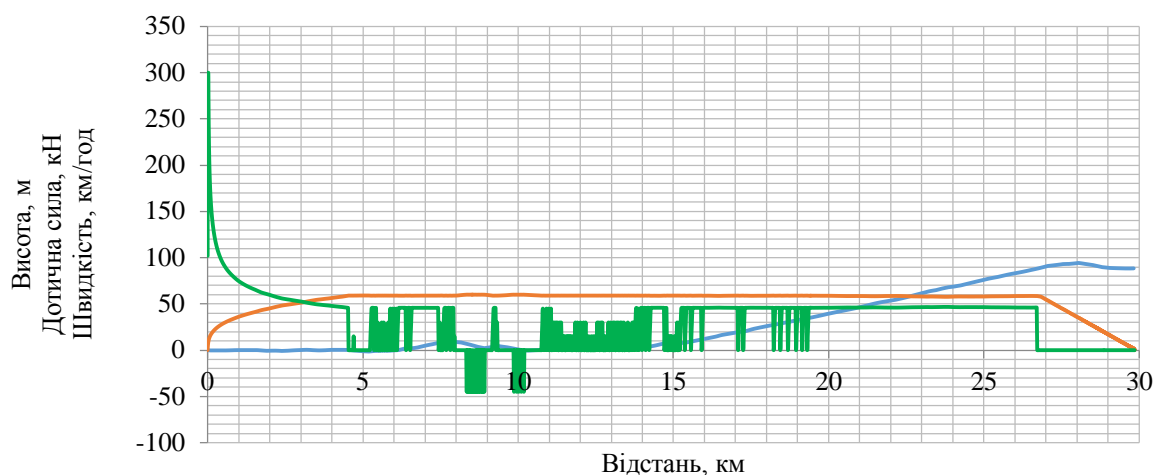
б)

Рис. 12. Результати тягових розрахунків для 5-ти вагонного поїзда під час руху по ділянці Харків-Сортувальний-Мерефа

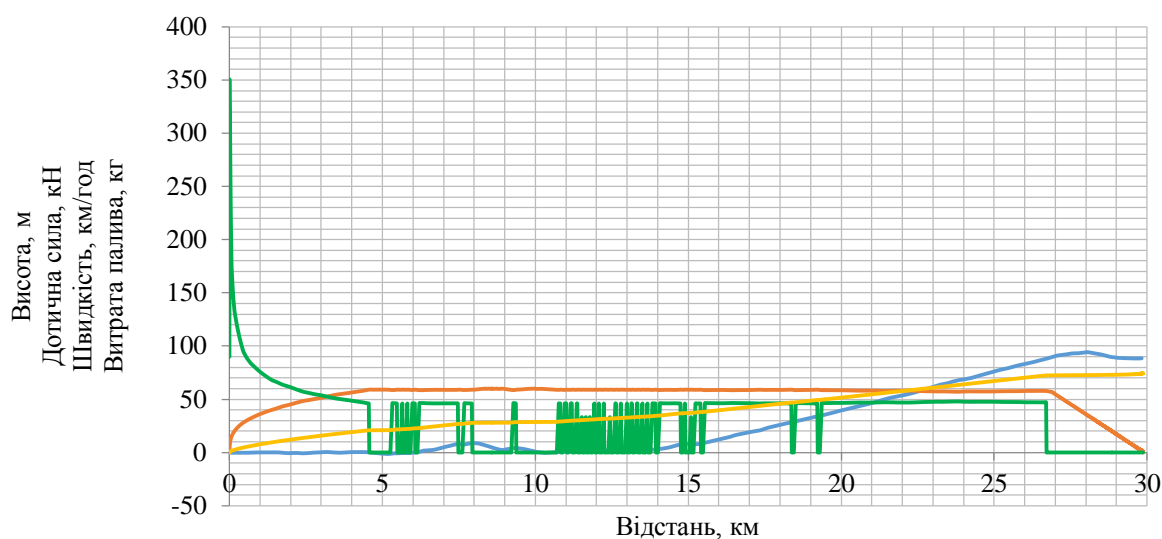
а – рух з маневровим електровозом; б – рух з тепловозом ЧМЕЗ

(лінія синього кольору – профіль шляху, лінія зеленого кольору – дотична сила у режимі тяги або електродинамічного гальмування, лінія червоного кольору – швидкість поїзду, лінія фіолетового кольору – витрата палива)

Вважаємо, що при створенні такого локомотива необхідним є застосування енергоефективного тягового електроприводу [26] та накопичувачів енергії у складі енергетичної установки [21, 27]. У поєднанні з оптимізацією керування системами локомотива та його рухом [20, 28] це забезпечить високу енергетичну ефективність локомотива і, відповідно, сприятиме зниженню витрат на паливно-енергетичні ресурси.



а)



б)

Рис. 13. Результати тягових розрахунків для 5-ти вагонного поїзда під час руху по ділянці Харків-Сортувальний – Люботин

а – рух з маневровим електровозом; б – рух з тепловозом ЧМЕЗ

(лінія синього кольору – профіль шляху, лінія зеленого кольору – дотична сила у режимі тяги або електродинамічного гальмування, лінія червоного кольору – швидкість поїзду, лінія фіолетового кольору – витрата палива)

Висновки. У роботі розглянуто застосування маневрових електровозів на залізницях. Відзначено, що використання маневрових електровозів набуває поширення, внаслідок чого розробці цього типу локомотивів приділяється увага провідних світових виробників.

Для оцінки застосування маневрових електровозів на вивізних та передатних операціях проведено моделювання руху поїзда по ділянці шляху. Розроблено математичну модель руху поїзда та моделі для визначення споживання енергії під час руху поїзда з маневровим електровозом.

Для порівняння проведено моделювання руху поїзду із серійним тепловозом ЧМЕЗ. Встановлено, що витрати на паливно-енергетичні ресурси у випадку застосування маневрового електровоза менші у 2,5 – 3 рази у порівнянні з серійним тепловозом.

На основі отриманих результатів запропоновано для оновлення маневрового рухомого складу для електрифікованих ділянок залізниць застосовувати локомотиви системи dual mode.

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова КМУ від 03 березня 2021 р. № 179 «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179> (дата звернення: 09.05.2022)
2. Харченко О.В., Кужавський М.С. Розроблення стратегії ресурсозбереження на підприємствах залізничного транспорту. *Інтелект XXI*, 2019. № 6. С.151-157. <https://doi.org/10.32782/2415-8801/2019-6.59>.
3. Боровик Ю.Т., Слагін Ю.В. Енергозбереження та енергоефективність як фактори підвищення конкурентоспроможності підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, 2018. № 61. С. 103-110. <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i61.127718>
4. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги. Дн-вск :Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 1–2. 456 с., 364 с.
5. Рябов Е.С. К вопросу создания маневровых электровозов. Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2015. № 3. С.69-72 <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i3.53654>
6. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process. Retrieved from <http://clc.am/qvkvB4g>
7. Иванова Н.Г. Оценка затрат жизненного цикла как критерий выбора наиболее выгодного инвестиционного мероприятия. *Наука та прогрес транспорту*, 2007. №14. С.261–265. <https://doi.org/10.15802/stp2007/18174>.
8. Skoglund M, O'stlund S, & Bark P. "Dual Mode Locomotives: Systems Study of New Freight Locomotives for Sweden." Proceedings of the IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. Wilmington, Delaware, USA. April 22–24, 2008. pp. 263-268. ASME. <https://doi.org/10.1115/JRC2008-63057>.
9. Ahmad S., Spiriyagin M., Cole C. et al. Analysis of positioning of wayside charging stations for hybrid locomotive consists in heavy haul train operations. *Rail. Eng. Science*, 2021. Vol. 29. P. 285–298. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00240-3>.
10. Buriakovskiy S., Liubarskiy B., Maslii A., Pomazan D., Panchenko V., Maslii A. Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 — Proceedings. IEEE, 05 – 07 June 2019. P. 76–79. <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779998>.
11. Kapetanović M., Vajih M., Goverde R.M.P. Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*, 2021. Vol. 14. P. 5920. <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
12. Рябов Е., Мосін С., Овер'янова Л., Кондратьєва Л., Демидов О., Гулак С. Оцінка технічних параметрів локомотива для залізничного кар'єрного транспорту. *Транспортні системи і технології*, 2022. №39. С.83-100. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>.
13. Cipek, M., Bitanga, P., Mlinarić, T., Pavković, D. & Kljaić, Z. (2018) Comparative Analysis of Conventional Diesel-electric and Hybrid-electric Heavy Haul Locomotive based on Mountain Rail Route Driving Scenario. In: Ban, M. (ed.) Digital proceedings of 3rd South East Europe (SEE) Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) conference.
14. Нотик З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ: Пособие машинисту. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1996. 444 с.
15. ДСТУ ГОСТ 25463:2019. Тепловозы магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические требования (ГОСТ 25463-2001, ИДТ).
16. ГОСТ 31428-2011. Тепловозы маневровые с электрической передачей. Общие технические требования.
17. Goolak S., Tkachenko V., Štastniak P., Saponova S., Liubarskiy B. Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. P. 150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
18. Слащов В. А. Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті: навч. посібник для вузів. Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2005. 232 с.
19. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]: утв. Мвом путей сообщения СССР 15.08.80.: – М.: Транспорт, 1985.
20. Буряковський С. Г., Маслій А. С., Панченко В. В., Помазан Д. П., Деніс І. В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ на імітаційній моделі. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018. № 2. С. 59-62.
21. Підвищення експлуатаційних характеристик маневрових тепловозів шляхом використання комбінованих накопичувачів енергії.–Дис... канд. техн. наук: 05.22.07. / Яровий Роман Олександрович. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Северодонецьк, 2019. –175 с.
22. Индекси РДН та середньозважені ціни URL: <https://www.oree.com.ua/index.php/indexes> (дата звернення: 25.09.2022).
23. Цены на бензин, дизтопливо, газ на АЗС Украины URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/> (дата звернення: 25.09.2022).

24. ПТРЗ/Модернізація тягового рухомого складу URL:<https://trz.com.ua/modernization-ua/> (дата звернення: 25.09.2022).
25. Є.С.Рябов, Л.В.Оверьянова, С.О.Гулак, Л.Ю. Кондратьєва. Оцінка застосування маневрових електровозів. Прогресивні технології засобів транспорту. Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції, 23-24 вересня 2021 р. Харків-Миргород: УкрДУЗТ, 2021. 178 с
26. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E.; Gołębowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ЧМЕ3, ЧКД S200). *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 317. <https://doi.org/10.3390/en15010317>.
27. Omelyanenko V. I., Riabov I. S., Overianova L. V., Omelianenko H. V. (2021). Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021. Vol. 4. P. 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08>.
28. Володарець М. В. Удосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників гібридних локомотивів : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів / Микита Віталійович Володарець. Укр. держ. ун-т залізн. трансп. - Харків, 2016. 23 с.

REFERENCES

1. Postanova KМУ vid 03 bereznia 2021 r. № 179 «Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku» [Resolution of the Cabinet of Ministers of March 3, 2021 № 179 "On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030"]. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-179> [in Ukrainian].
2. Kharchenko, O.V., & Kuzhavskiy, M.S. (2019) Rozroblennia stratehii resursozberezhennia na pidpriemstvakh zaliznychnoho transportu. [Development of a resource saving strategy at railway transport enterprises]. *Intelligence XXI*, 6, 151-157 <https://doi.org/10.32782/2415-8801/2019-6.59> [in Ukrainian].
3. Borovyk, Yu.T. Yelahin, & Yu.V. (2018) Enerhozberezhennia ta enerhoefektyvnist yak faktory pidvyshchennia konkurentospromozhnosti pidpriemstv zaliznychnoho transportu [Energy saving and energy efficiency as factors of increasing the competitiveness of railway transport enterprises]. *Herald of the economy of transport and industry*, 61, 103-110. <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i61.127718> [in Ukrainian].
4. Hetman, H. K. (2011). Teoriya elektrycheskoi tiahuy [Theory of electric traction]. Dn-vsk: Izd-vo Makovetsky, 2011. Vol. 1–2. 456 p., 364 p. [in Russian].
5. Riabov, E.S. (2015) K voprosu sozdaniya manevrovyykh elektrovovozov. [Regarding the creation of shunting electric locomotives]. *Information and control systems in railway transport*, 3, 69-72. <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i3.53654> [in Russian].
6. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process. Retrieved from <http://clc.am/qvkb4g>
7. Ivanova, N.G. (2007) Otsenka zatrat zhyznennoho tsykla kak kryteryi vybora naybolee vyhodnoho ynvestytsyonnoho meropriyatia. [Assessment of life cycle costs as a criterion for choosing the most profitable investment measure]. *Science and progress of transport*, 14, 261–265. <https://doi.org/10.15802/stp2007/18174> [in Russian].
8. Skoglund, M, O'stlund, S, & Bark, P. (2008). Dual Mode Locomotives: Systems Study of New Freight Locomotives for Sweden. Proceedings of the IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. IEEE/ASME/ASCE 2008 Joint Rail Conference. Wilmington, Delaware, USA. April 22–24, 2008. (pp. 263-268). ASME. <https://doi.org/10.1115/JRC2008-63057>
9. Ahmad, S., Spiryagin, M., Cole, C., Wu, Q., Wolfs, P., & Bosomworth, C. (2021). Analysis of positioning of wayside charging stations for hybrid locomotive consists in heavy haul train operations. *Railway Engineering Science*, 29(3), 285-298. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00240-3>
10. Buriakovskiy, S., Liubarskyi, B., Maslii A., Pomazan, D., Panchenko, V., & Maslii, A. (2019, June). Mathematical Modelling of Prospective Transport Systems Electromechanical Energy Transducers on Basis of the Generalized Model. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019 — Proceedings. IEEE, 05 – 07 June 2019, 76–79. <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8779998>.
11. Kapetanović, M., Vajih, M., & Goverde, R.M.P. (2021) Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains. *Energies*, 14, 5920-5935. <https://doi.org/10.3390/en14185920>.
12. Riabov, Ye., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Hulak, S. (2022) Otsinka tekhnichnykh parametriv lokomotyva dlia zaliznychnoho kariernoho transportu [Evaluation of technical parameters of a locomotive for railway quarry transport]. *Transport systems and technologies*, 39, 83-100. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9> [in Ukrainian].
13. Cipek, M., Bitanga, P., Mlinarić, T. J., Pavković, D., & Kljaić, Z. (2018). Comparative analysis of conventional diesel-electric and hybrid-electric heavy haul locomotive based on mountain rail route driving scenario. In *Digital proceedings of 3rd South East Europe (SEE) Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) Conference Proceedings*. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

14. Notyk Z. Kh. (1996). Teplovozy ChME3, ChME3T, ChME3E: Posobyе mashynystu. [ChME3, ChME3T, ChME3E diesel locomotives: Driver's manual]. 2nd ed., revised. and additional - M.: Transport [in Russian].
15. DSTU GOST 25463:2019. (2019). Teplovozy mahystralnykh zheleznykh doroh koley 1520 mm. Obshchye tekhnicheskyye trebovaniya [Diesel locomotives of main railways gauge 1520 mm. General technical requirements] (GOST 25463-2001, IDT) [in Russian].
16. GOST 31428-2011. (2011). Teplovozy manevrovyye s elektrycheskoi peredachei Obshchye tekhnicheskyye trebovaniya [Shunting diesel locomotives with electric transmission General technical requirements] [in Russian].
17. Goolak, S.; Tkachenko, V.; Šfastniak, P.; Sapronova, S.; Liubarskyi, B. (2022) Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*, 14, 150-170. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
18. Slashchov VA. (2005) Tiahovi ta halmovi rozrakhunky na reikovomu transporti [Traction and brake calculations on rail transport]. *Luhansk: SNU Publishing House. V.Dalya* [in Ukrainian].
19. Pravyla tiahovykh raschetov dlia poezdnoi raboty. (1985). [Rules of traction calculations for train work] [Text]: approved. Ministry of Railways of the USSR 15.08.80. M.: Transport [in Russian].
20. Buriakovkyi, S.H., Maslii, A.S., Panchenko, V.V., Pomazan, D.P., & Denis, I.V. (2018). Doslidzhennia rezhymiv roboty teplovoza ChME3 na imitatsiynii modeli [Study of operating modes of the ChME3 diesel locomotive on a simulation model]. *Electrical engineering and electromechanics*, 59-62. [in Ukrainian].
21. Yarovy, R. O. (2019). Pidvyshchennia ekspluatatsiynykh kharakterystyk manevrovyykh teplovoziv shliakhom vykorystannia kombinovanykh nakopychuvachiv enerhii. (2019). [Increasing the operational characteristics of shunting diesel locomotives by using combined energy storage devices].– Diss... candidate. technical Sciences: 05.22.07. *Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal, Severodonetsk* [in Ukrainian].
22. Indeksy RDN ta serednozvazheni tsiny [RDN index and weighted average prices]. Retrieved from: <https://www.oree.com.ua/index.php/indexes> [in Ukrainian].
23. Tseny na benzyn, dyztoplyvo, haz na AZS Ukrainy [Prices for gasoline, diesel, gas at gas stations in Ukraine] Retrieved from: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/> [in Russian].
24. PTRZ/Modernization of traction rolling stock [PTRZ/Modernization of traction rolling stock] Retrieved from: <https://trz.com.ua/modernization-ua/> [in Ukrainian].
25. Ye.S.Riabov , L.V.Overianova, S.O.Hulak, & L.Iu. Kondratieva. (2021, September). Otsinka zastosuvannia manevrovyykh elektrovoziv [Evaluation of the use of shunting electric locomotives. Progressive technologies of means of transport]. Materials of the first international scientific and technical conference, September 23-24, 2021. Kharkiv-Myrhorod: UkrDUZT. (p. 178) [in Ukrainian].
26. Kuznetsov, V., Kardas-Cinal, E., Gołębiowski, P., Liubarskyi, B., Gasanov, M., Riabov, I., Kondratieva, L., & Opala, M. (2022) Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ЧМЕ3, ЧКД S200). *Energies*, 15, 317-337. <https://doi.org/10.3390/en15010317>.
27. Omelyanenko, V. I., Riabov, I. S., Overianova, L. V., & Omelianenko, H. V. (2021). Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08>
28. Volodarets M. V. (2016). Udokonalennia metodiv ta modelei vyznachennia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv hibrnydykh lokomotyviv [Improvement of methods and models for determining technical and economic indicators of hybrid locomotives]: autoref. thesis ... candidate technical Sciences: 05.22.07 – railway rolling stock and train traction. *Ukraine state Railway University transp. – Kharkiv* [in Ukrainian].

Ievgen Riabov^{1*}, Liliia Overianova², Dmytro Iakunin³, Bilokon Iryna⁴, Sergiy Goolak⁵

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

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

³Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3995-3162>

⁴Director, Kremenchyk Applied College of Transport Infrastructure and Technology, 14 Leonova str., Kremenchuk, Poltava Region, 39600, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4675-3994>

⁵Assistant professor, 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>

APPLICATION OF MANEUVERING ELECTRIC LOCOMOTIVES FOR TRANSFER AND FREIGHT WORK

The paper reviews shunting electric locomotives, the use of which is becoming widespread due to lower costs of fuel and energy resources and a reduction in the impact on the environment. Mathematical models of the movement of a train with a shunting electric locomotive have been developed. A four-axle electric locomotive with a power of 750 kW is proposed for research. A mathematical model of the movement of a train with a ChME3 diesel locomotive has been developed. To compare the costs of fuel and energy resources for freight and transfer operations, simulations of train movement were carried out on sections of the route Kharkiv-Sortuvalny – Merefa and Kharkiv-Sortuvalny – Lyubotyn with different numbers of cars. The simulation was carried out for movement with a shunting electric locomotive and a ChME3 diesel locomotive. It was established that the costs of fuel and energy resources in the case of using a shunting electric locomotive are 2.5-3 times lower compared to a ChME3 diesel locomotive. Based on the obtained results, it is proposed to use dual mode locomotives for the renewal of shunting rolling stock for electrified sections of railways. The locomotive must be equipped with an energy-efficient electric drive and a combined power plant based on a modern diesel engine or other primary energy source in combination with an on-board energy storage system and intelligent management of energy flows in the traction system.

Keywords: *shunting locomotive, electric traction, traction task, fuel consumption, energy efficiency, modeling.*

УДК 629.4.018:629.4.086

Євген Зуб¹, Світлана Сапронова²

¹Аспірант, кафедра вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6560-0662>

²Професор, 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>

*Автор, відповідальний за листування: doc.sapronova@gmail.com

ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ ПОЛОЖЕННЯ КОЛІСНИХ ПАР ВАНТАЖНОГО ВАГОНА НА СПРЯМОВУЮЧІ ЗУСИЛЛЯ

У статті висунута гіпотеза, відповідно до якої, порушення номінальної установки колісних пар у візках залізничного рухомого складу є основною причиною підвищення спрямовуючих зусиль в гребневих контактах коліс вантажних вагонів з рейками. Підвищені навантаження у гребневих контактах є причиною низки інших негативних явищ: підвищення інтенсивності зносу (підрізу) гребенів, підвищення зносу бокових поверхонь головок рейок, зниження коефіцієнту запасу стійкості вагонів від сходу з рейок, тощо. Для перевірки цієї гіпотези проведено дослідження для отримання залежностей, насамперед, це – характеристики впливу геометричних відхилень положення колісних пар у візку на рівень спрямовуючих зусиль в контактах коліс із рейками та знос гребенів коліс. Актуальність цього дослідження підтверджується даними про катастрофічний знос рейок та суцільнокатаних коліс вагонів.

Зроблено аналіз статистичних даних про експлуатаційні перекося колісних пар у візках в плані внаслідок забігання бокових рам, який показує, що у 80% вагонів ці кути можуть складати до 0,015 рад (0,85 град). Уточнено формулу критичного щодо сходу з рейок співвідношення рамної сили до вертикального навантаження на колесо, на відміну від формули Надаля, яка додатково враховує сили відведення у контактні колеса, що збігає.

Ключові слова: колісна пара, гребневий контакт, спрямовуючі зусилля, відхилення положення, візок, спрямування.

Вступ. Українська мережа залізниць є однією з найбільш розвинутих серед європейських країн. Зокрема, за обсягами вантажних перевезень вона посідає четверте місце на євразійському континенті. Але негативною особливістю парку вантажних вагонів української залізниці є значний ступінь його зношеності. Строк служби переважної кількості вагонів перевищив або наближається до встановленого заводом-виробником строку експлуатації. Близько 90% вантажних вагонів Укрзалізниці мають візки різних модифікацій моделі 18-100. Особливістю конструкції візків моделі 18-100 є нежорстка схема з'єднання бокових рам і проміжної балки, що у поєднанні із значним ступенем зношеності вагонів створює передумови перекося колісних пар у візках відносно їх нормального, перпендикулярного до повздовжньої осі рами візка положення. Актуальність цієї науково-технічної задачі підтверджується даними про катастрофічне зниження в останнє десятиріччя строку служби рейок та суцільнокатаних коліс вагонів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Додаткове несиметричне притиснення гребня до рейки може виникати через значну різницю діаметрів кругів кочення коліс однієї колісної пари, значну нерівномірність навантаження коліс, монтажний перекося колісних пар у рамі візка, розпирання візків у рейковій колії при гальмуванні потяга тощо.

Максимальна сила притиснення гребня колеса до робочої грані рейки N_6 при різниці діаметрів середніх кругів кочення коліс, згідно [1] визначається за формулою:

$$N_6 = Y'_p + \sqrt{(Y'_p)^2 + c \cdot m \cdot (v'_c)^2}, \quad (1)$$

де Y'_p – рамна сила, що виникає в момент притиснення гребня колеса до рейки;
 c – поперечна горизонтальна жорсткість рейок в колії;
 m – маса колісної пари;
 v'_c – швидкість руху центра мас колісної пари в момент притиснення гребня колеса до бокової поверхні рейки.

При цьому

$$Y'_p = M \cdot \left(\frac{V_n^2}{R} - \frac{h_0}{S} \cdot g \right), \quad (2)$$

де M – підресорена маса, що приходить на колісну пару;
 V_n^2 – швидкість руху потяга;
 R – радіус криволінійності прямої ділянки при наявності рихтування;
 h_0 – узвишся рейки на прямій ділянці колії;
 S – ширина колії.

Сила притиснення гребня колеса до рейки в залежності від різниці діаметрів коліс, виглядає так

$$N_6 = \frac{2M}{S} \cdot \left[V_n^2 \cdot \frac{(D_1 - D_2) - [D_1 - D_2]}{D_1} \cdot g \cdot h_0 \right], \quad (3)$$

де D_1, D_2 – діаметри коліс по кругах кочення;
 $[D_1 - D_2]$ – допустима різниця діаметрів коліс.

Зміщення колісних пар у візку в межах ± 3 мм практично не впливає на інтенсивність зносу гребенів. У той же час, перекіс колісних пар у щодо рами візка, що викликає їх непаралельність, у межах $\pm 0,005$ рад (0,28 град.), що відповідає повздовжньому забіганню букс на ± 4 мм, приводить до збільшення інтенсивності зносу гребенів у 1,5–2 рази [1].

Останній висновок підтверджується дослідженнями у роботі [2] відзначається, що при симетричній установці колісної пари в рамі візка тривалість взаємодії гребенів коліс з рейками не перевищує 20%, у той час, як перекіс колісної пари усього на 12' (0,2 град) призводить до збільшення тривалості взаємодії гребня колеса і рейки до 78% загального часу руху. Цей висновок стає особливо важливим з урахуванням того, що в експлуатації перекіс колісної пари в колії може досягати 3 град.

Відомо, що зміщення шляхом поворотів колісних пар в площині колії від номінального положення відбуваються не тільки при русі по кривим ділянкам колії, а і в прямих, якщо мають місце зазори у зв'язках букс із рамами візків в наслідок зношення в експлуатації. Це призводить навіть під час руху в прямих ділянках колії до появи значних кутів набігу гребенів на бічні грані рейок, і спостерігається постійне контактування із ними, що також сприяє швидкому зношенню гребенів [3, 13].

У науковій статті [4] досліджувалися такі фактори, як різниця в діаметрах коліс колісної пари та перекіс осей колісних пар, причиною яких є забіги боковин візків, відхилення базових розмірів бокових рам візка, знос буксових тощо. В статті відмічається, що у 40% вагонів візки

мають усталені відносні забіги бічних рам, що сприяє перекосу колісних пар. Поздовжні відносні забіги бічних рам особливо шкідливі при русі у кривих ділянках колії, через розвороти колісних пар у площині колії проти спрямування кривою. Причини цього – технологічні і експлуатаційні. Наприклад, відмінності у товщині стінок букс, у 20% вагонів досягають 3 мм, а у 4% вагонів – 6 мм. Це призводить до додаткового перекосу колісних пар до 0,003 рад навіть при креслярських розмірах елементів рам візку.

Спрямування сил тертя завжди спричинятиме збільшення кутів набігу гребенів на рейки, якщо не спрацювують зв'язки, які утримують колісні пари у їх номінальному положенні. Тому, наприклад, поява в наслідок зносу наднормативних зазорів у зв'язках букс із рамами візків неодмінно призведе до зростання інтенсивності зносу гребенів коліс [5]. Вважається, що перекоси колісних пар у візку на 2 градуси ($\approx 0,035$ рад) викликають п'ятикратне збільшення інтенсивності зносу гребенів коліс. Кут набігу і фактор зносу гребня також залежать від величини взаємних перекосів колісних пар: перекося у 0,004 рад збільшує фактор зносу в 4...8 разів [6]. Відхилення від паралельності осей колісних пар понад 0,003 рад не припустимо.

З аналізу наукових досліджень можна стверджувати, що відхилення положення колісних пар у візках рухомого складу залізниць впливають на зусилля в контакт з рейками і приводять до збільшення зносів в гребневих зонах. Ця проблема є актуальною і повинна досліджуватись.

Метою дослідження є аналіз впливу відхилень положення колісних пар у візку від номінального на спрямовуючі зусилля в контактах коліс вантажних вагонів із рейками і, як наслідок, на інтенсивність зносу гребенів.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити такі **задачі**:

аналіз статистичних даних щодо зносу гребнів коліс вантажних вагонів на українській залізниці;

моделювання руху колісної пари в положенні перекосу в рейковій колії з кутом набігання;

визначення залежності навантажень в гребневих контактах коліс із рейками від відхилення установки колісних пар у візку від номінального положення.

Матеріали та методи дослідження. Висунута гіпотеза, відповідно до якої, порушення номінальної установки колісних пар у візках є основною причиною підвищення спрямовуючих зусиль в гребневих контактах коліс вантажних вагонів з рейками. Підвищені навантаження у гребневих контактах є причиною низки інших негативних явищ: підвищення інтенсивності зносу (підрізу) гребенів, підвищення зносу бокових поверхонь головок рейок, зниження коефіцієнту запасу стійкості вагонів від сходу з рейок тощо [7, 8, 9]. Передумовою цих явищ є особливості конструкції візків моделі 18-100, а саме – нежорстка схема з'єднання бокових рам і проміжної балки. У поєднанні із значним ступенем зношеності вагонів це створює передумови перекосів колісних пар у візку відносно їх нормального, перпендикулярного до повздовжньої осі візка, положення.

На рис. 1 показано схему перекосу колісних пар у візку при забіганні бокових рам. Кут перекосу колісних пар у візку можна визначити за простою формулою

$$\beta = \varepsilon / B , \quad (4)$$

де ε – відносний забіг бокових рам візка у повздовжньому напрямку;

B – відстань між повздовжніми осями бокових рам.

Величина ε може досягати в експлуатації 14 мм. Для візків моделі 18-100 та їх модифікацій приймаємо $B = 2036$ мм. Таким чином максимально-можливий кут перекосу колісних пар у візку може складати 0,007 рад (0,4 град.).

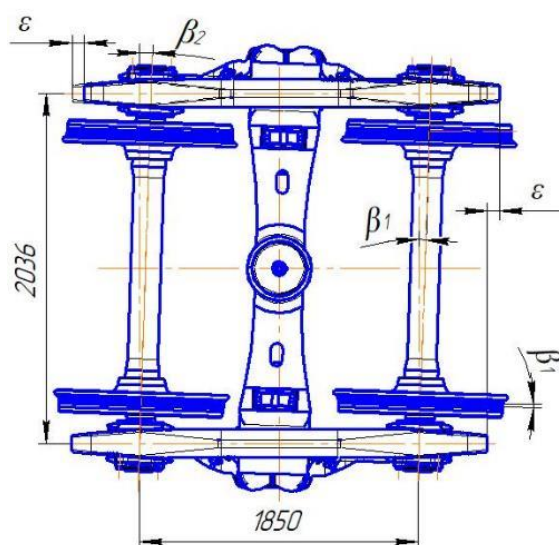


Рис. 1. Схема перекосу колісних пар у візку при забіганні бокових рам

Проведено порівняльний аналіз даних про знос гребенів коліс вантажних і пасажирських вагонів по вагонному депо Київ-Пасажирський (пасажирські вагони), по вагонному депо Дарниця (вантажні вагони). Завданням аналізу було виявити принципову різницю у характері зносу гребенів колісних пар, встановлених у жорсткій рамі (пасажирські вагони) і колісних пар візків моделі 18-100 та її модифікацій, що мають нежорстку раму з можливістю відносного забігання бокових рам візків і, як наслідок, постійного перекосу колісних пар візках.

Основним параметром цього аналізу була різниця між товщиною гребня правого і лівого коліс. На основі висунутої гіпотези, нежорстке з'єднання бокових рам у візку повинно приводити в експлуатації до прогресуючого та такого, що накопичується, перекосу колісних пар відносно номінального положення і, як наслідок, переважного зносу гребенів однієї із сторін колісних пар. Накопичення перекосу пов'язане із нерівномірним навантаженням фрикційних поверхонь рами візка, що відповідають за фіксацію бокових рам відносно надресорної балки: напрямних накладок щелеп та букс; фрикційних поверхонь клинів гасників коливань, таких, що контактують із вертикальними фрикційними поверхнями бокових рам та похилими поверхнями надресорної балки, а також поверхонь бокових рам і надресорної балки, що контактують із фрикційними клинами. При аналізі експериментальних даних було зроблено припущення, що товщина гребенів коліс, що вимірюється при періодичному огляді колісних пар, зворотно-пропорційна інтенсивності зносу гребенів, а різниця у товщині гребенів лівого і правого коліс колісних пар є показником нерівномірного зносу коліс колісної пари і непрямим доказом постійного перекосу колісних пар відносно рами візка.

Оброблені дані журналів огляду колісних пар вагонного депо Дарниця за період з вересня 2016 р. по грудень 2021 р. та вагонного депо Київ-Пасажирський за період з жовтня 2020 р. по грудень 2021 р. дають розподіл абсолютної різниці товщини гребеня колісної пари (табл. 1).

Щільність розподілу абсолютної різниці товщини гребенів правого і лівого коліс колісних пар в експлуатації

$$\varphi(\Delta b_i) = \left(\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \right) \cdot e^{-\frac{(\Delta b_i - m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

де Δb_i – поточне значення різниці товщин гребенів коліс колісної пари (абсолютна величина);

m – математичне сподівання різниці товщин гребенів лівого і правого коліс колісної пари;
 σ – дисперсія Δb_i відносно m .

У даному випадку математичне сподівання m знаходиться, як середня величина абсолютних значень різниць товщин гребенів лівих і правих коліс колісних пар.

Дисперсія σ визначається, як міра розсіяння значень випадкової величини (у даному випадку – різниці товщин гребенів Δb_i) відносно середнього значення розподілу, тобто математичного сподівання m . Більші значення дисперсії свідчать про більші відхилення значень випадкової величини від центру розподілу. Дисперсія дозволяє виміряти наскільки далеко випадкові значення Δb_i розподілені від їх середнього значення m . Дисперсія дорівнює математичному сподіванню квадрата відхилення Δb_i від її математичного сподівання (середнього значення) m :

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta b_i - m)^2$$

Таблиця 1. Статистичні характеристики розподілу абсолютної різниці товщини гребня лівого і правого коліс колісних пар

Типи вагонів: пасажирські, вантажні	Абсолютна різниця товщини гребня коліс колісної пари	
	Математичне очікування, m , мм	Дисперсія, σ
Вагонне депо Київ-Пасажирський (пасажирські вагони)	1,9	0,71
Вагонне депо Дарниця (вантажні вагони)	3,7	0,96

На рис. 2 наведено графіки щільності розподілу абсолютної різниці товщини гребнів правого і лівого коліс колісних пар в експлуатації по депо Київ-Пасажирський (пасажирські вагони) і депо Дарниця (вантажні вагони).

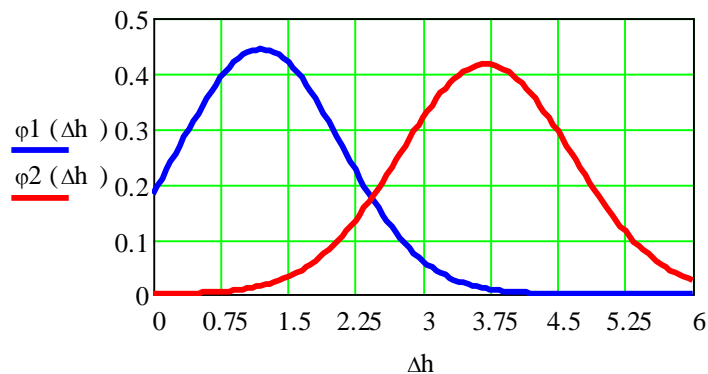


Рис. 2. Щільність розподілу абсолютної різниці товщини гребнів правого і лівого коліс колісних пар в експлуатації: $\varphi_1(\Delta h)$ – по депо Київ-Пасажирський (пасажирські вагони); $\varphi_2(\Delta h)$ – по депо Дарниця (вантажні вагони)

У [10, 11, 12, 15] досліджені характеристики сходу транспортних засобів на основі математичних моделей просторової конфігурації колеса і рейки. Відзначається, що детальна характеристика процесу взаємодії колеса та рейки мають вирішальне значення для точності динамічного аналізу залізничних транспортних засобів.

Для перевірки гіпотези розглянемо кінематику спрямування колісної пари рейковою колією.

Складемо модель рух колісної пари в положенні перекосу в рейковій колії з кутом набігання α . На рис. 3 показано просторові векторні схеми швидкостей (сині вектори) і сил (червоні вектори) в контактах колісної пари з рейками. Колесо що набігає (2) має двоточковий контакт з рейкою в точках K_{21} (основний контакт) і K_{22} (гребеневий контакт). Колесо, що збігає (1), при цьому має одноточковий контакт в точці K_{11} . Розглядається випадок, коли колесо, що набігає, знаходиться в стані сходу з рейок. За умову сходу прийнято рівність нулю навантаження в основному контакті колеса, що набігає (контакт K_{21}).

При моделюванні кінематичних характеристик контакту колісної пари з рейками розглядаються такі параметри й їх позначення:

V – швидкість руху центру колісної пари уздовж осі колії;

$V_{\phi 11}$ – окружна швидкість колеса в точці контакту K_{11} , пов'язана з обертанням колісної пари щодо власної осі;

V_{11} – швидкість проковзування колеса по рейці в точці контакту K_{11} ;

V_{11x}, V_{11y} – проекції швидкості V_{11} , відповідно, на осі Ox і Oy ;

$V_{\phi 22xy}$ – проекція окружної швидкості колеса в точці контакту K_{22} , на горизонтальну площину Oxy ;

V_{22xy} – проекція швидкості ковзання колеса по рейці в точці контакту K_{22} , на горизонтальну площину Oxy ;

V_{22x}, V_{22y} – проекції швидкості V_{22} , відповідно, на осі Ox і Oy ;

V_{22xz} – проекція швидкості V_{22} на поздовжню вертикальну площину Oxz ;

Y_f – осьова реакція в буксовому вузлі, що діє на колісну пару – рамна сила;

S_{11y}, S_{22y} – проекції сил тертя S_{22} в контактах K_{11}, K_{22} на вісь Oy ;

$S_{22xz}, S_{22x}, S_{22z}$ – проекції сили тертя S_{22} в контакті K_{22} , відповідно на поздовжню вертикальну площину Oxz , вісь Ox і вісь Oz ;

λ_f – кут нахилу гребня.

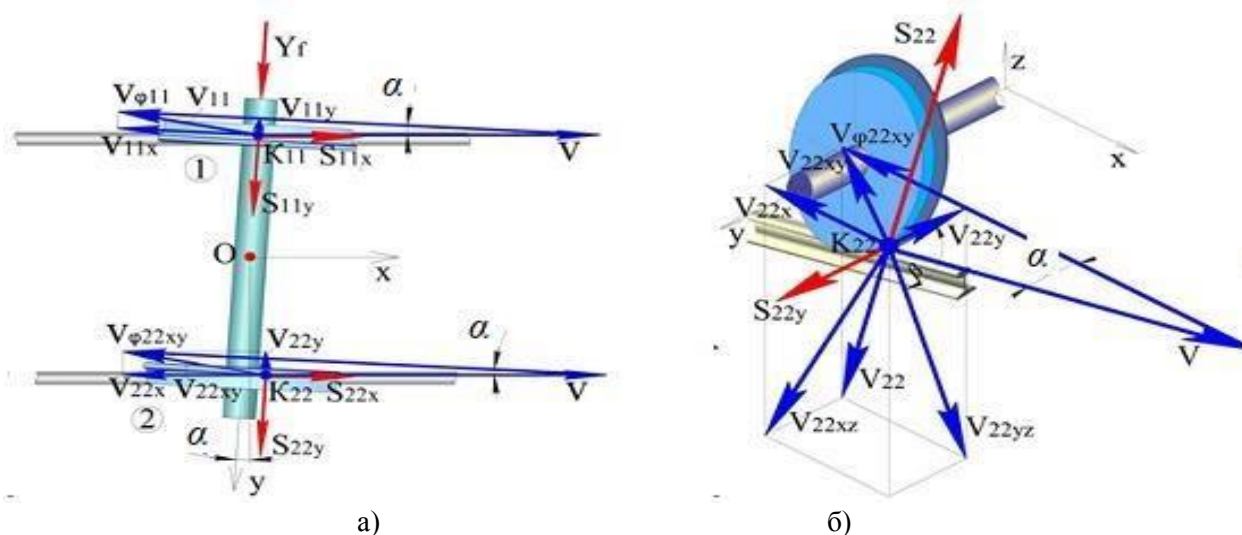


Рис. 3. Схема векторів швидкостей (синій колір) і сил (червоний колір) в контактах колісної пари з рейками:

а) – проекції швидкостей і сил в контактах колісної пари з рейками на горизонтальну площину Oxy ; б) – просторова картина швидкостей і сил в гребневому контакті колеса, що набігає

Векторні рівняння швидкостей проковзування в контактах K_{11} , K_{22} отримані на основі принципу суперпозиції як компоненти відносного переміщення поверхонь кочення коліс і рейок:

$$\bar{V}_{11} = \bar{V} + \bar{V}_{\phi 11}, \quad \bar{V}_{22xy} = \bar{V} + \bar{V}_{\phi 22xy} \quad (6)$$

$$\bar{V}_{22} = \bar{V}_{22xy} + \bar{V}_{22xz} + \bar{V}_{22yz} \quad (7)$$

Розглянемо контактні сили, що діють на колісну пару та рівняння рівноваги. На рис. 4 показана схема контактних сил в гребеновому контакті в проекціях на поздовжню вертикальну площину Oxz і поперечну вертикальну площину Oyz .

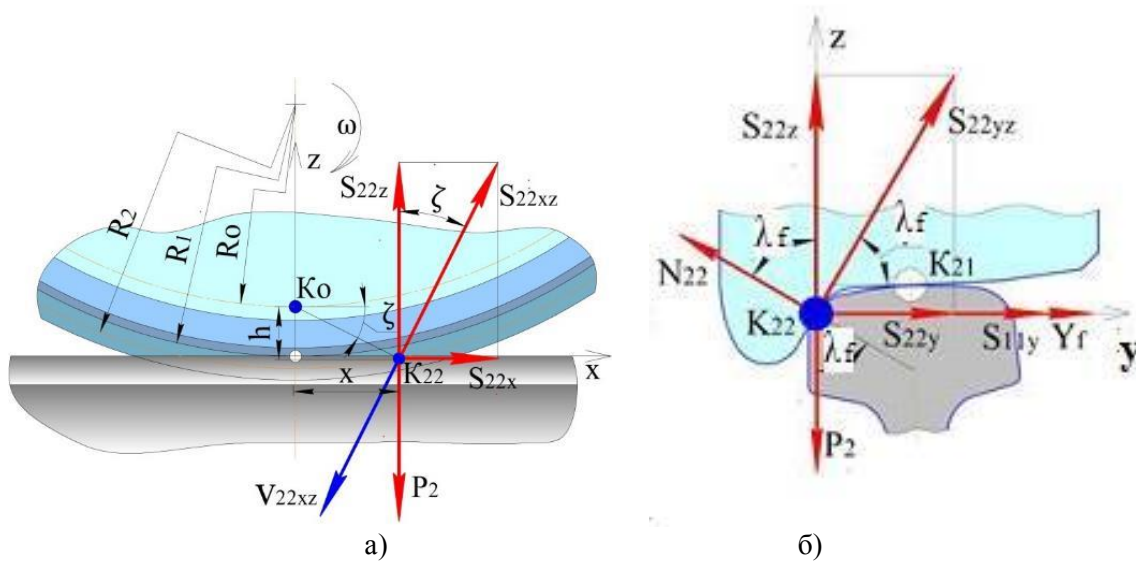


Рис. 4. Схема проєкцій сил в гребеновому контакті:
а) проєкції на поздовжню вертикальну площину Oxz ;
б) проєкції на поперечну вертикальну площину Oyz

На рис. 4 прийнято такі позначення:

ζ – кут, що визначає положення вектору S_{22xz} щодо вертикальної осі;

ω – кутова швидкість обертання колісної пари навколо власної осі;

N_{22} – нормальне навантаження в гребеновому контакті K_{22} ;

K_0 – миттєвий центр обертання колеса;

R_0 – відстань від центру колеса до миттєвого центру обертання колеса K_0 ;

R_1, R_2 – радіуси колеса, відповідно, в основному і гребеновому контактах;

P_2 – вертикальне навантаження в гребеновому контакті K_{22} .

Сумарне горизонтальне бічне навантаження в гребеновому контакті Y дорівнює сумі рамної сили Y_f і сил відведення S_{11y}, S_{22y} в контактах K_{11}, K_{22} :

$$Y = Y_f + S_{11y} + S_{22y} \quad (8)$$

Фрикційні контактні сили S_{11y}, S_{22y} в контактах K_{11}, K_{22} в теорії управління колісних машин називають силами відведення. Сили відведення S_{11y}, S_{22y} є силами тертя і спрямовані протилежно відповідним векторам швидкостей ковзання V_{11y}, V_{22y} . Сили S_{11y}, S_{22y} можуть бути наближено визначені за формулами закону Кулона. При цьому розглядається найнебезпечніший щодо сходу з рейок випадок, коли кут $\zeta = 0$.

$$S_{11y} = P_1 \cdot \mu; \quad S_{22y} = N_{22} \cdot \mu \cdot \cos \lambda_f, \quad (9)$$

де P_1 – вертикальне навантаження в контакте K_{11} ;

μ – коефіцієнт тертя ковзання в контактах коліс з рейками.

Тоді

$$Y = \mu \cdot (P_1 + N_{22} \cdot \cos \lambda_f) + Y_f. \quad (10)$$

Рівняння рівноваги контактних сил подані у вигляді суми проекцій на осі Oy і Oz (рис. 4,б):

$$\begin{cases} \sum F_y = 0: & \begin{cases} Y - N_{22} \cdot \sin \lambda_f = 0; \\ \sum F_z = 0: & \begin{cases} N_{22} \cdot \mu \cdot \sin \lambda_f + N_{22} \cdot \cos \lambda_f - P_2 = 0. \end{cases} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

З другого рівняння (8) отримуємо:

$$N_{22} = \frac{P_2}{\mu \cdot \sin \lambda_f + \cos \lambda_f}. \quad (12)$$

Розглянемо критерій безпеки щодо сходу з колісної пари з рейок. З огляду на те, що перше колесо не має гребеневого контакту, а основний контакт другого колеса повністю розвантажений, можна прийняти: $P_1 = P_2 = P$. Тоді з першого рівняння (8) отримуємо

$$\mu \cdot P \cdot \left(1 + \frac{\cos \lambda_f}{\mu \cdot \sin \lambda_f + \cos \lambda_f} \right) + Y_f - P \frac{\sin \lambda_f}{\mu \cdot \sin \lambda_f + \cos \lambda_f} = 0, \quad (13)$$

звідки, рамна сила буде дорівнювати

$$Y_f = P \cdot \left(\frac{\sin \lambda_f - \mu \cdot \cos \lambda_f}{\mu \cdot \sin \lambda_f + \cos \lambda_f} - \mu \right), \quad (14)$$

Звідки критичне щодо сходу з рейок співвідношення рамної сили до вертикального навантаження на колесо може бути визначено за формулою

$$\left[\frac{Y_f}{P} \right] = \left(\frac{\sin \lambda_f - \mu \cdot \cos \lambda_f}{\mu \cdot \sin \lambda_f + \cos \lambda_f} - \mu \right), \quad (15)$$

або

$$\left[\frac{Y_f}{P} \right] = \frac{(1 - \mu^2) \cdot \operatorname{tg} \lambda_f}{1 + \mu \cdot \sin \lambda_f}. \quad (16)$$

Формула (13) являє собою уточнення відомої формули Надаля

$$\left[\frac{Y}{P} \right] = \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \cdot \sin \beta} \quad (17)$$

де β – кут нахилу гребня;

μ – коефіцієнт тертя в контакті «колесо-рейка».

Формула Надаля враховує тільки сили у контактї колеса, що набігає [10, 14, 15]. Уточнена формула (13), на відміну від формули Надаля, додатково враховує сили відведення у контактї колеса, що збігає. Тобто враховується повна картина контактних сил колісної пари, включаючи обидва колеса.

На рис. 5 показано порівняльні залежності результатів розрахунку співвідношення $[Y_f/P]$ від кута нахилу гребня (λ_f) та коефіцієнту тертя у контактах коліс із рейками (μ) за формулою Надаля і вдосконаленою формулою. З графіків видно, що результати близькі або співпадають для типових значень кута нахилу гребня (70–75 град) і звичайних умов зчеплення коліс із рейками ($\mu = 0,33$). При поганих умовах зчеплення (коефіцієнту зчеплення нижчим за 0,2) різниця у результатах може складати до 10%, причому значення розрахункового співвідношення за формулою Надаля при будь-яких кутах нахилу гребня є більшими ніж за формулою (13).

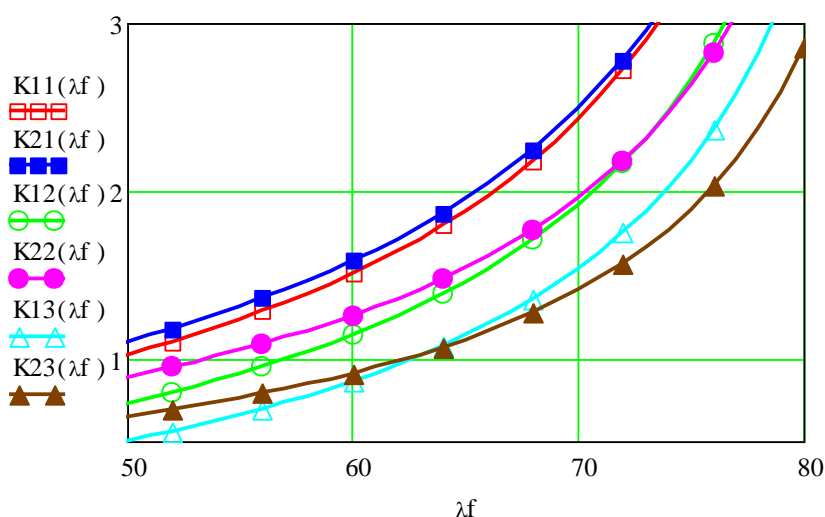


Рис. 5. Порівняльні залежності співвідношення $[Y_f/P]$ від кута нахилу гребня (λ_f) та коефіцієнту тертя у контактах коліс із рейками (μ) за формулою Надаля і формулою (13):

$K11(\lambda_f)$, $K12(\lambda_f)$, $K13(\lambda_f)$ – за формулою Надаля; $K21(\lambda_f)$, $K22(\lambda_f)$, $K23(\lambda_f)$ – формулою (13); $K11(\lambda_f)$, $K21(\lambda_f)$ – $\mu = 0,1$; $K12(\lambda_f)$, $K22(\lambda_f)$ – $\mu = 0,3$; $K13(\lambda_f)$, $K23(\lambda_f)$ – $\mu = 0,5$

При коефіцієнтах зчеплення вищих за 0,45 маємо розрахункові значення співвідношення $[Y_f/P]$ за вдосконаленою формулою на 15–30% менші, ніж за Надалем – для малих кутів нахилу гребня (50–55 град) і, навпроти, – на 5–10 % вищі для великих кутів нахилу гребня (70–80 град).

Розглянемо залежність кутів набігання колісних пар від відхилення установки колісних пар у візку від номінального положення. Вище наведені розрахунки виконано для номінальної установки колісних пар у візку, тобто точно перпендикулярного повздовжній осі рами візка. Однак, характерним для візків вантажних вагонів моделі 18 є відхилення установки колісних пар від номінального положення, пов'язане із забіганням бокових рам. За загальною думкою, цей недолік візків моделі 18 є те, що бокові рами візка не пов'язані жорстко між собою

надресорною балкою та ресорними комплектами. В результаті чого, виникають подовжні забігання рам відносно один одного, які досягають $\varepsilon = 15\text{--}20$ мм [7]. Величина забігання обумовлена зазорами в буксових вузлах та величиною горизонтальної деформації пружин. До цієї величини треба додати технологічні відхилення розмірів бокових рам у виробництві, що додає ще 2–3 мм. Нерівномірний знос клинів фрикційного гасника коливань та надресорної балки додатково впливає на перекіс колісних пар. Всі ці фактори разом можуть створювати перекіс колісних пар у візку β відносно номінального положення до 0,018 рад (1,0 град).

На рис. 6 показані залежності кутів набігання колісних пар α (рад) від кутів відхилення колісних пар у візку від нормального положення – β (рад): для зазорів колісних пар в колії 15 і 65 мм в кривих радіусів 200, 600 і 1200 м.

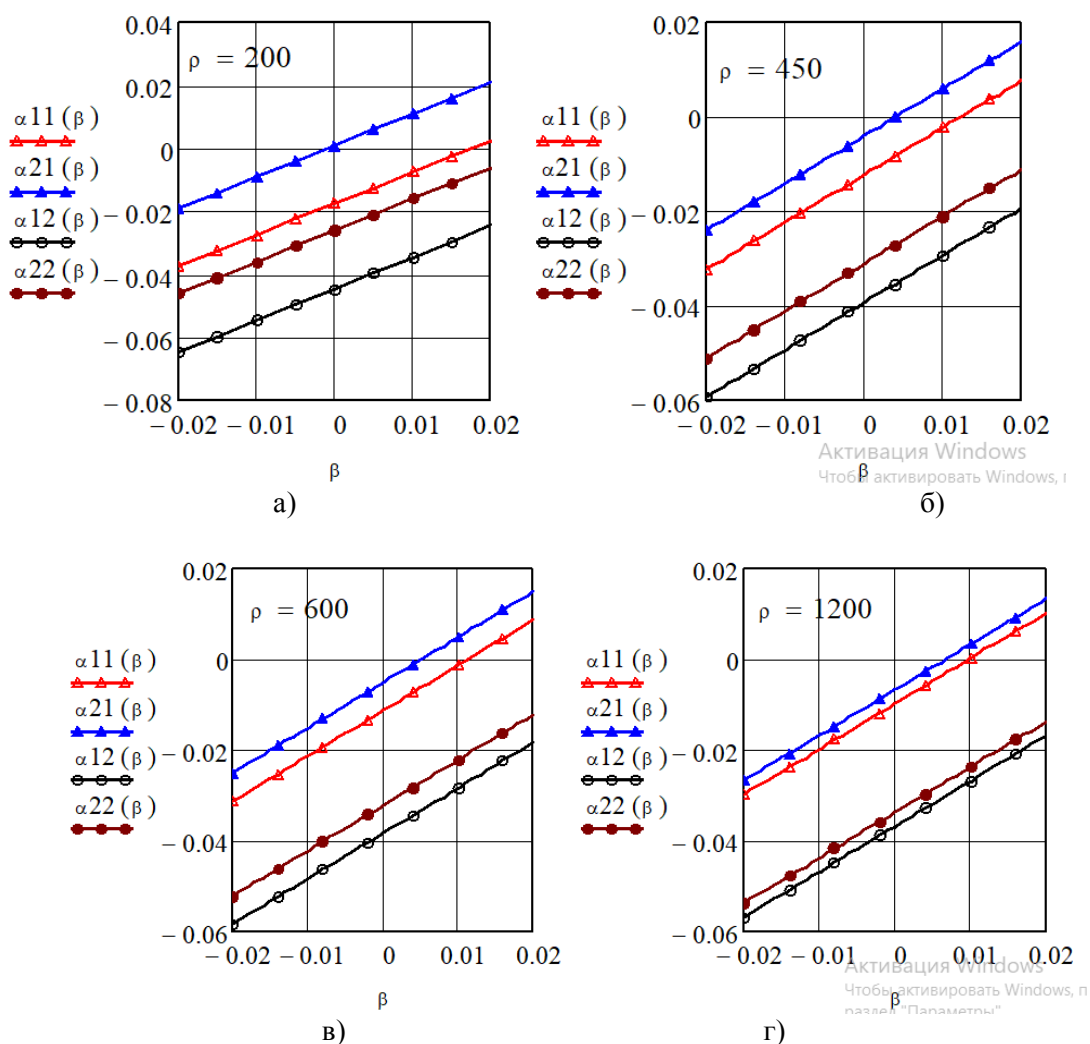


Рис. 6. Залежності кутів набігання колісних пар α (рад) від кутів відхилення колісних пар у візку від їх нормального положення β (рад): а) $\rho = 200$ м; б) $\rho = 450$ м; в) $\rho = 600$ м; г) $\rho = 1200$ м; $\alpha_{11}(\beta)$, $\alpha_{12}(\beta)$ – перша колісна пара; $\alpha_{21}(\beta)$, $\alpha_{22}(\beta)$ – друга колісна пара; $\alpha_{11}(\beta)$, $\alpha_{21}(\beta)$ – зазор $\delta = 15$ мм; $\alpha_{12}(\beta)$, $\alpha_{22}(\beta)$ – зазор $\delta = 65$ мм

Діапазон досліджуваних кутів β – від $-0,02$ до $+0,02$ рад. Негативні значення кутів β можливі при забіганні внутрішньої по відношенню кривої боковини рами – збігаючого колеса колісної пари. Позитивні значення кутів β відповідають випадку керованого проходження

кривої ділянки колії. Результати розрахунків дозволяють стверджувати, що забігання внутрішньої боковини рами візка – є типовим випадком вписування візка в криву. Завжди, при будь-яких варіантах радіусів кривих та зазорів колісних пар в рейковій колії забігати буде саме внутрішня боковина рами візка. При збільшенні забігання внутрішньої боковини від 0 до $-0,02$ рад кути набігання першої колісної пари (що набігає) збільшуються в 2–3 рази для різних радіусів кривих.

На рис. 7 показано розрахункові залежності кутів набігання колісних пар α від зазорів колісної пари в рейковій колії при колії δ різних радіусах кривих для мінімального і максимального кутів перекосу колісних пар у візку: $\beta = 0$ (відсутність перекосу) і $\beta = -0,02$ рад (максимальне значення кута перекосу).

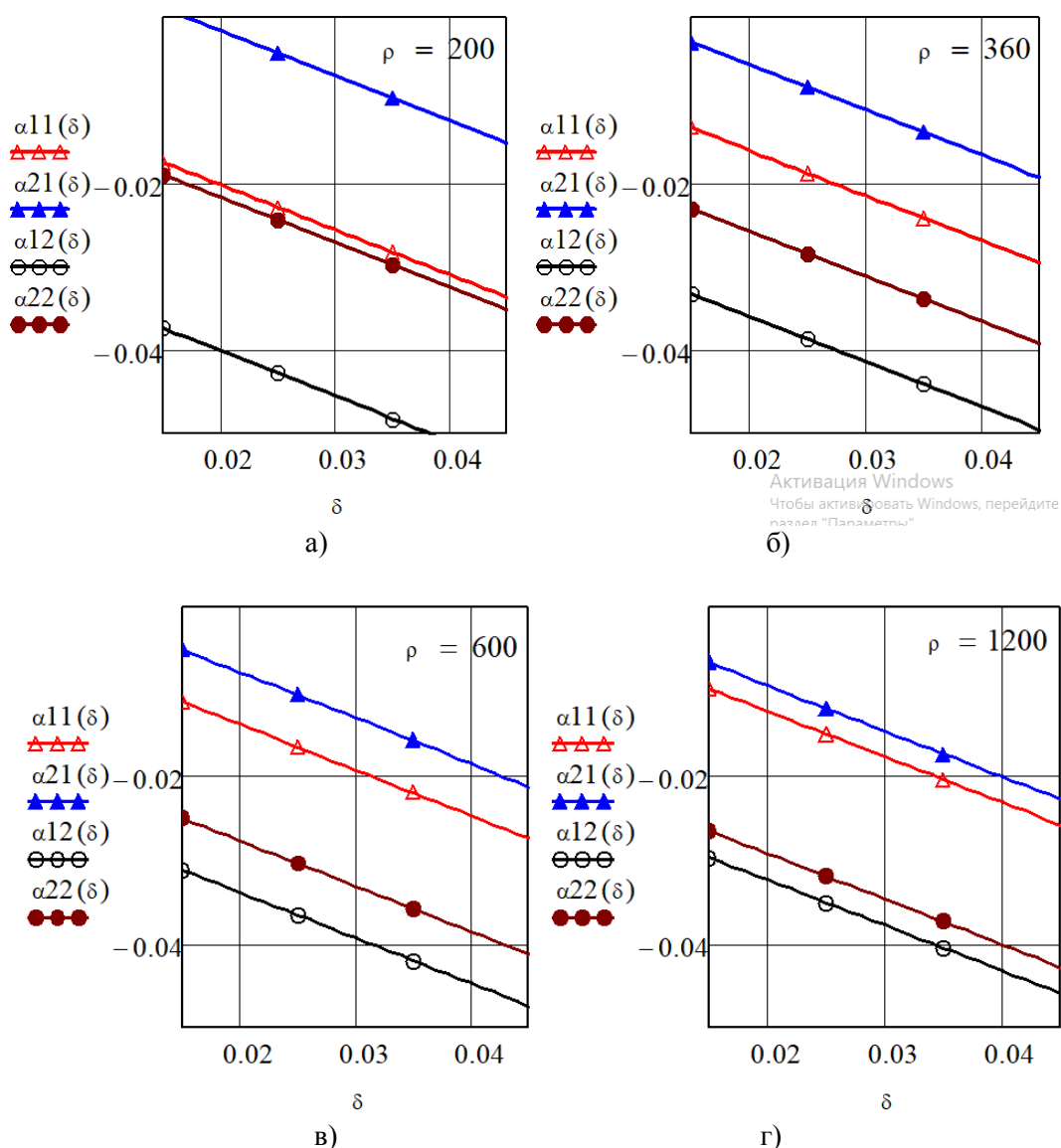


Рис. 7. Розрахункові залежності кутів набігання колісних пар від зазорів колісної пари в рейковій колії при різних радіусах кривих для мінімального і максимального кутів перекосу колісних пар у візку: а) $\rho = 200$ м; б) $\rho = 360$ м; в) $\rho = 600$ м; г) $\rho = 1200$ м; α_{11}, α_{12} – перша колісна пара; α_{21}, α_{22} – друга колісна пара; $\alpha_{11}, \alpha_{21} - \beta = 0$; $\alpha_{12}, \alpha_{22} - \beta = -0,02$ рад

Розрахунки, результати яких показані на рис 7, дозволяють зробити такі висновки. Збільшення зазору колісних пар в колії δ з 0,015 до 0,045 м призводить до збільшення кутів набігання α від 1,7 (для $\rho = 200$ м) до 2,5 рази (для $\rho = 1200$ м). Характер залежності кутів набігання α від зазору δ схожий, незалежно від кутів перекосу колісних пар β . Різниця між кутами набігання першої і другої колісних пар зменшується від 0,010 рад для $\rho = 200$ м до 0,003 рад для $\rho = 1200$ м. Різниця між кутами набігання першої і другої колісних пар визначається лише радіусом кривої, не залежить від кутів перекосу колісних пар у візку і зазору колісних пар в рейковій колії.

Розглянемо залежність навантажень в гребневих контактах коліс із рейками від відхилення установки колісних пар у візку від номінального положення. На рис. 8 показано розрахункові залежності спрямовуючого гребневого зусилля $Y(\beta)$ від відхилення установки колісних пар у візку від номінального положення – кутів перекосу β швидкості руху і радіусу кривої ділянки колії.

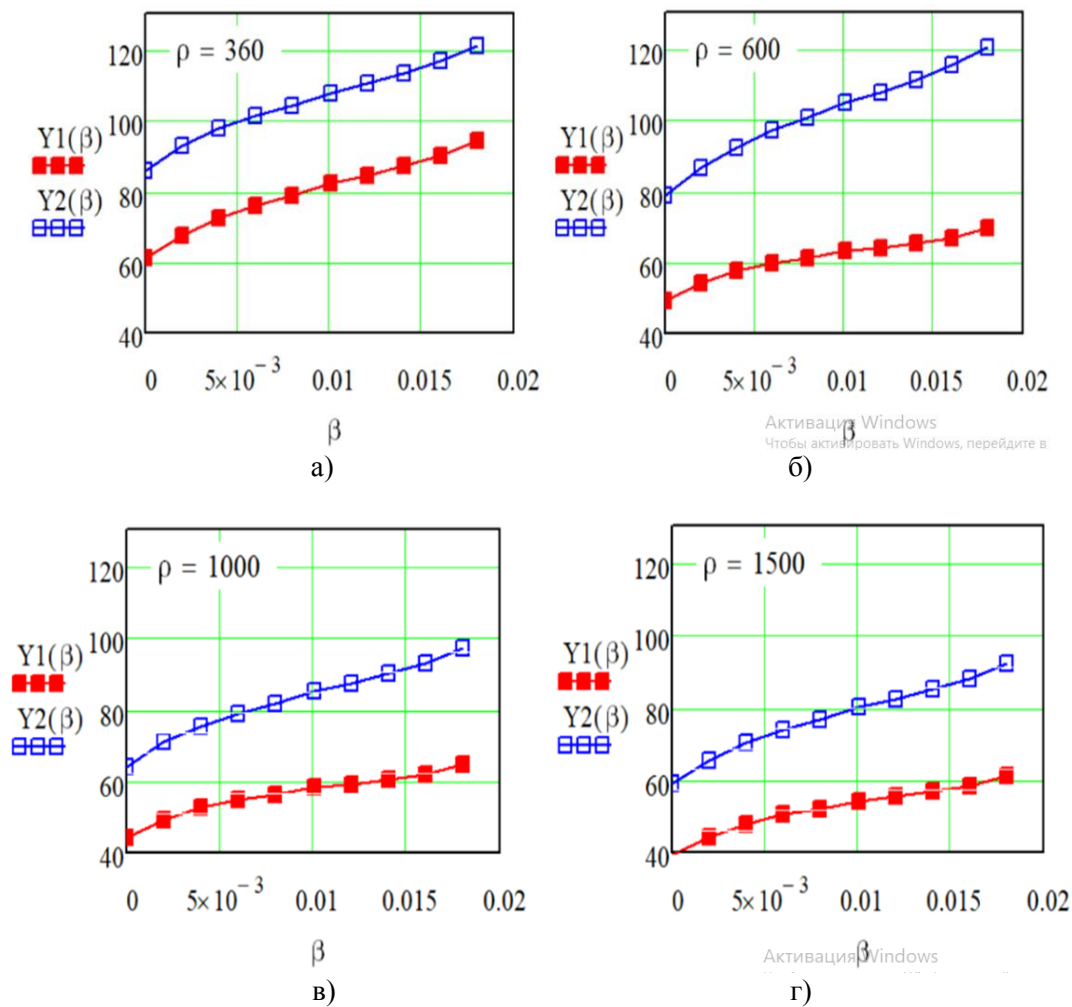


Рис. 8. Розрахункові залежності спрямовуючого гребневого зусилля $Y(\beta)$ (кН) від кутів перекосу колісних пар β (рад), швидкості руху і радіусу кривої: $Y1(\beta)$ – швидкість руху 20 м/с (72 км/год); $Y2(\beta)$ – 27 м/с (100 км/год); а) для радіусу кривої $\rho = 360$ м; б) $\rho = 600$ м; в) $\rho = 1000$ м; г) $\rho = 1500$ м

Аналіз даних розрахунків підтверджує припущення про суттєвий вплив відхилення установки колісних пар у візку від нормального положення. Як показано на рис.6, кут перекосу колісних пар може складати до 0,015 рад (0,85 град). При максимальних значеннях кутів перекосу бокові навантаження на рейки на 35–50% перевищують навантаження при нормальній установці на будь-яких швидкостях і в кривих будь-якого радіусу.

За результатами проведеного дослідження можна зробити такі **висновки**.

1. Аналіз статистичних даних про експлуатаційні перекоси колісних пар у візках в плані показав, що внаслідок забігання бокових рам у 80% вагонів ці кути можуть складати до 0,015 рад (0,85 град).

2. З'ясовано, що відхилення положення колісних пар у візках від номінального суттєво впливають на рівень бокових спрямовуючих зусиль в гребневих контактах коліс із рейками, що є причиною одностороннього зносу гребенів колісних пар.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сокол Э.Н. Силы прижатия гребня колеса к рельсу в прямых участках пути. *Залізничний транспорт України*, 2006. №4. С. 63–66.
2. Коссов В. С. Улучшение условий взаимодействия колес локомотивов с рельсами. *Железные дороги мира*. 2000, №4. С.36–38.
3. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона: учебн. для вузов ж.д. трансп. / Под ред.С.В. Вершинского. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 360 с.
4. Богданов В.М., Козубенко И.Д., Ромен Ю.С. Техническое состояние вагона и износ гребней колес. *Железнодорожный транспорт*, 1998. №8. С. 23–26.
5. Маслієв, В.Г. Розвиток теорії прогнозування зношення гребенів коліс рухомого складу залізниць. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Транспортне машинобудування, 2018. № 29 (1305). С. 69–74. URL.: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/39234>.
6. Анофрієв В.Г. Корнієнко В.В., Коробка Б.А., Кутіщенко О.В., Лашко А.А., Можейко Є.Р., Мокрій Т.Ф., Позняков В.Д., Савчук О.М., Ушкалов В.Ф. Дослідження та розробка комплексу системних технічних рішень вантажних вагонів нового покоління та впровадження їх у виробництво та експлуатацію (витяг). *Вагонний парк*, 2011. №12. С. 49–55.
7. Воронин С.В., Коростелев Е.Н. Анализ существующих способов уменьшения бокового износа рельсов в паре трения колесо-рельс в кривых участках пути. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 2014. №3. С. 22–27. <http://surl.li/cvyja>.
8. Tkachenko V., Sapronova S., Kulbovskiy I., Fomin O. Research into resistance to the motion of railroad undercarriages related to directing the wheelsets by a rail track. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017. Vol. 5(7(89)). P. 65–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109791>.
9. Сапронова С., Ткаченко В., Фомина А., Зуб Є. Моделирование рейковых экипажів і вплив їх конструктивних особливостей на кінематичний опір руху. *Транспортні системи і технології*, 2016. №29. С/ 163-175. <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/79>.
10. Pieringer A., Baeza L., Kropp, W. Modelling of railway curve squeal including effects of wheel rotation. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. P. 417-424. URL.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44832-8_50.
11. Dusza M. (2015). The wheel-rail contact friction influence on high speed vehicle model stability. *Transport Problems*, 2015. T.10(3). P. 74-86. URL.: <https://bibliotekanauki.pl/articles/375369>
12. Zeng J., Wei L., Wu P. Safety evaluation for railway vehicles using an improved indirect measurement method of wheel-rail forces. *Journal of Modern Transportation*, 2016. T.24(2). С. 114-123. URL.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-016-0107-5>
13. Zboiński K. Dusza M. Extended study of rail vehicle lateral stability in a curved track. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 49(5). P. 789-810. URL.: <https://doi.org/10.1080/00423111003770447>
14. Ishida H., Miyamoto T., Maebashi E., Doi H., Iida K., Furukawa A. (2006) Safety Assessment for Flange Climb Derailment of Trains Running at Low Speeds on Sharp Curves. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. (2006). Vol. 47(2). P.65–71. URL.: <https://trid.trb.org/view/782755>
15. Shabana A. A. Nadal's formula and high speed rail derailments. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2012. T. 7(4). P.41-93. URL.: https://www.researchgate.net/publication/275377482_Nadal%27s_Formula_and_High_Speed_Rail_Derailments

REFERENCES

1. Sokol, E.N. (2006). Sily prizhatiya grebnya koleasa k rel'su v pryamykh uchastkakh puti [The forces of pressing the wheel flange to the rail in straight sections of the track]. *Zaliznychnyy transport Ukrainy-Railway transport of Ukraine*, 4, 63–66 [in Russian].
2. Kossov, V.S. (2000). Uluchsheniye usloviy vzaimodeystviya koles lokomotivov s rel'sami [Uluchsheniye usloviy vzaimodeystviya koles lokomotivov s rel'sami]. *Zheleznyye dorogi mira - Railways of the world*, 4, 36–38 [in Russian].
3. Vershinsky, S.V., Danilov, V.N., & Khusidov, V.D. (1991). Dinamika vagona: uchebn. dlya vuzov zh.d. transp. / Pod red.S.V. Vershinskogo. 3-ye izd. pererab. i.dop [The dynamics of the car: textbook. for universities railway transp. / Under the editorship of S.V. Vershinsky. 3rd ed. revised and additional]. *M.: Transport* [in Russian].
4. Bogdanov, V.M., Kozubenko, I.D., & Romen, Yu.S. (1998). Tekhnicheskoye sostoyaniye vagona i iznos grebney koles [Tekhnicheskoye sostoyaniye vagona i iznos grebney koles]. *Zheleznodorozhnyy transport - Railway transport*, 8, 23–26. [in Russian].
5. Masliyev, V.H. (2018). Rozvytok teoriiy prohnozuvannya znoshennya hrebeniv kolis rukhomoho skladu zaliznyts' [Development of the theory of forecasting the wear of the wheel ridges of railway rolling stock.]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Transportne mashynobuduvannya - Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Transport engineering*, 29 (1305), 69–74 [in Ukrainian]. URL.: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/39234>
6. Anofriyev, V.H. Korniyenko, V.V., Korobka, B.A., Kutishenko, O.V., Lashko, A.A., Mozheyko, Ye.R., Mokriy, T.F., Poznyakov, V.D., Savchuk, O.M., & Ushkalov, V.F. (2011). Doslidzhennya ta rozrobka kompleksu systemnykh tekhnichnykh rishen' vantazhnykh vahoniv novoho pokolinnya ta vprovadzhennya yikh u vyrobnyctvo ta ekspluatatsiyu (vytyah) [Research and development of a complex of system technical solutions of new generation freight cars and their introduction into production and operation (extraction)]. *Vahonnyy park - Wagon park*, 12, 49–55 [in Ukrainian].
7. Voronin, S.V., & Korostelev, Ye.N. (2014). Analiz sushchestvuyushchikh sposobov umen'sheniya bokovogo iznosa rel'sov v pare treniya koleso-rel's v krivykh uchastkakh puti [Analysis of existing ways to reduce the lateral wear of rails in a wheel-rail friction pair in curved track sections]. *Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti - Information and key systems on rail transport*, 3, 22–27 [in Russian]. URL.: <http://surl.li/cyyja>.
8. Tkachenko, V., Sapronova, S., Kulbovskiy, I., & Fomin, O. (2017). Research into resistance to the motion of railroad undercarriages related to directing the wheelsets by a rail track. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7(89)), 65–72. URL.: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109791>.
9. Sapronova, S., Tkachenko, V., Fomina, A., & Zub, Ie. (2016). Modelyuvannya reykovykh ekipazhiv i vplyv yikh konstruktivnykh osoblyvostey na kinematychnyy opir rukhu [Modeling of rail carriages and the influence of their structural features on the kinematic resistance of movement.]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 29, 163-175. [in Ukrainian]. URL.: <https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/79>.
10. Pieringer, A., Baeza, L., & Kropp, W. (2015). Modelling of railway curve squeal including effects of wheel rotation. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 417-424. URL.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-44832-8_50.
11. Dusza, M. (2015). The wheel-rail contact friction influence on high speed vehicle model stability. *Transport Problems*, 10(3), 74-86. URL.: <https://bibliotekanauki.pl/articles/375369>
12. Zeng, J., Wei, L., & Wu, P. (2016). Safety evaluation for railway vehicles using an improved indirect measurement method of wheel-rail forces. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 114-123. URL.: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-016-0107-5>.
13. Zboinski, K. & Dusza, M. (2011). Extended study of rail vehicle lateral stability in a curved track. *Vehicle System Dynamics*, 49(5), 789-810. URL.: <https://doi.org/10.1080/00423111003770447>.
14. Ishida, H., Miyamoto, T., Maebashi, E., Doi, H., Iida, K., & Furukawa, A. (2006) Safety Assessment for Flange Climb Derailment of Trains Running at Low Speeds on Sharp Curves. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 47(2), 65–71. URL.: <https://trid.trb.org/view/782755>.
15. Shabana, A. A. (2012). Nadal's formula and high speed rail derailments. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 7(4), 41-93. URL.: https://www.researchgate.net/publication/275377482_nadal%27s_formula_and_high_speed_rail_derailments

Ievgen Zub¹, Svitlana Sapronova²

¹Graduate student, department of cars and carriage facilities, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

² Professor, department of cars and carriage facilities, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

NFLUENCE OF DEVIATIONS IN THE POSITION OF WHEEL PAIRS IN A FREIGHT-CAR ON THE GUIDING FORCES

The article puts forward a hypothesis according to which the violation of the nominal setting of wheel pairs in railway rolling stock carts is the main reason for the increase in guiding forces in the wheel flange contacts of the wheels of freight cars with the rails. Increased loads in wheel flange contacts are the cause of a number of other negative phenomena: increased intensity of wear (undercutting) of wheel flange, increased wear of the side surfaces of rail heads, decrease in the coefficient of stability of wagons from derailment, etc. To test this hypothesis, a study was conducted to obtain dependencies, first of all, these are the characteristics of the influence of geometric deviations of the position of the wheel pairs in the cart on the level of guiding forces in the contacts of the wheels with the rails and the wear of the wheel flanges. The relevance of this study is confirmed by data on the catastrophic wear of rails and solid-rolled wheels of wagons.

An analysis of statistical data oblique setting of wheel pairs in carts in plan due to running-in of side frames was made, which shows that in 80% of wagons these angles can be up to 0,015 rad (0,85 degrees). The formula for the critical derailment ratio of the frame force to the vertical load on the wheel has been clarified, in contrast to Nadal's formula, which additionally takes into account the deflection forces in the contact of the overlapping wheel.

Keywords: *wheel pair, flange contact, guiding forces, deviation of the positions, cart, guiding.*

УДК 625.007.5

Юрій Лаврич^{1*}, Сергій Плаксін², Любов Погоріла³

¹ Старший науковий співробітник, Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3616-2135>

² Завідуючий відділом, Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

³ Молодший науковий співробітник Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3718-0733>

* Автор, відповідальний за листування: lavrich@westa-inter.com

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ВАНТАЖНОЇ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

*Проведений аналіз сучасного стану транспортних систем в Україні показав, що основною проблемою цієї області є недолік транспортних інфраструктурних можливостей, що пов'язано з низькими маршрутними швидкостями руху для більшості видів перевезення та низьким рівням організації руху та управління транспортними потоками. Низьким, порівняно з європейськими країнами, є і рівень залізничного контейнерного транспорту – найпоширенішого та перспективного виду перевезення вантажів. Тому **головна ідея статті** полягає в обґрунтуванні необхідності введення принципово нових транспортних технологій, які допоможуть зменшити або усунути проблеми транспортного вантажного перевезення, і в цьому її **актуальність**. Досліджена можливість використання для вантажних транспортних перевезень магнітолевітаційних технологій, які виключають контакт транспортного засобу з шляховою структурою. Авторами розглянуто основні структурні елементи, призначення та можливий варіант роботи магнітолевітаційної транспортної системи вантажних перевезень. **Практичне значення** роботи в тому, що використання магнітолевітаційних контейнерних платформ значно збільшить інтенсивність та швидкість конвеєрної відправки кожного контейнера зі зменшенням споживання енергії, що суттєво вплине на покращення логістики перевезення вантажів. **Основні результати** роботи: сформульовано концептуальні основи побудови безпілотних магнітолевітаційних транспортних засобів та основних систем їх інфраструктури; показано, що реалізація функції безпілотності такого транспортного засобу можлива лише за умови забезпечення перманентної левітації на всіх ділянках перевезення вантажу.*

Ключові слова: вантажні перевезення, швидкість руху, магнітолевітаційна система, безпілотні технології, контейнерна платформа.

Вступ. Сучасний залізничний транспорт є надзвичайно складною організаційно-технічною системою, управління якою практично неможливо у межах раніше сформованих традиційних підходів. У багатьох країнах світу, зокрема державах Євросоюзу, зростає розуміння важливості вирішення глобальних проблем транспортних комплексів. Це, перш за все, пов'язане з вимогами підвищення безпеки та ефективності перевезень, з необхідністю зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище та ін. В даний час загальнодержавна транспортна

політика багатьох розвинених країн базується на розробці та просуванні інтелектуальних транспортних систем (ІТС) [1].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Аналіз сучасного стану та проблем транспортних систем в Україні показав, що багато причин існуючих проблем пов'язані не лише з нестачею потужностей транспортної інфраструктури та ін., але значною мірою з недостатнім рівнем організації руху та керування транспортними потоками. Одна з проблем пов'язана з технологією контейнерних перевезень, яка забезпечує відносно низьку маршрутну швидкість більшості видів перевезень [2]. Так середня швидкість руху транспорту автомобільними дорогами України становить 40-60 км/год. проти 80-100 км/год. за кордоном, вантажі переміщуються за добу на відстань 250-300 км, проти 700-1300 км за кордоном. Таке зниження швидкості руху, у свою чергу, веде до збільшення на 20-30% собівартості перевезень, зростання транспортної складової в кінцевій ціні продукції та послуг, яка сягає 15-20% (у США та Європі цей показник не перевищує 7-10%).) [1]. Негативні наслідки впливу транспорту, масштаби та значущість яких дають підстави оцінювати їх як стратегічний виклик національного та майже континентального масштабу.

Прогрес транспорту, як галузі економіки, пов'язаний насамперед технічними досягненнями науки, але поряд зі збільшенням швидкості транспортування, поліпшенням безпеки та зменшенням вартості процесу транспортування, скороченням непродуктивних втрат часу, базова транспортна технологія залишається незмінною. Якісні зміни відбулися в середині минулого століття завдяки появі контейнерної технології, яка сприяла розвитку взаємозалежних процесів, що призвели до виникнення «феномену інтермодалізму» [3]. Перевезення вантажів у контейнерах є одним із найважливіших сегментів глобального транспортного ринку. Контейнерні перевезення – найпопулярніший спосіб доставки споживчих товарів. Щорічно лише порти у всьому світі обробляють понад 800 млн. контейнерів, якими перевозяться близько 25% світових товарів. Україна після підписання Угоди про асоціацію з ЄС поступово інтегрує свою транспортну систему до європейської мережі, при цьому важливим та перспективним напрямом такої інтеграції є широке впровадження сучасних, ефективних та екологічних технологій доставки вантажів. Національною транспортною стратегією України до 2030 р. є «розвиток ефективної конкурентоспроможної мультимодальної національної транспортної системи» та зміцнення транзитного потенціалу транспортної області з метою перетворення України на сучасний міжнародний транспортний хаб між Європою та Азією» [4]. Принцип мультимодального перевезення полягає в тому, що лише одна сторона надає послуги з кількох ланок ланцюга доставки «від дверей до дверей», а це може бути дешевшим та ефективнішим, ніж дроблення цих послуг між декількома сторонами-виконавцями, кожен з яких намагатиметься отримати максимально можливий прибуток на окремому компоненті ланцюга. За цією концепцією на отримання економічної користі буде націлений весь ланцюг доставки вантажів, і всі учасники перевізного процесу будуть зацікавлені у реалізації своїх інтересів і вигод [5].

Сьогодні позиція України на ринку перевезень не є найкращою, адже контейнери так і не стали масовим засобом доставки вантажів у країні. Хоча залізничні перевезення контейнерів приблизно втричі швидше і дешевше за автомобільні, незважаючи на це залізничні перевезення контейнерів, поки що, розвинені слабо, переважна кількість контейнерів перевозиться автотранспортом [6]. В даний час загальний рівень контейнеризації вантажних перевезень в Україні за різними оцінками становить лише від 0,5...1,5% [7], тоді як у світі цей показник у середньому становить 16...18% (по «сухим» вантажам – до 65%), а країнах ЄС – 40% (по «сухим» вантажам – до 80%) [8].

Українська економіка орієнтована на експорт у далекі країни і вирішальним чинником є організація перманентного двонаправленого вантажосполучення з портами. Найперспективнішою технологією залізничних перевезень контейнерів є організація контейнерних поїздів. Ця технологія широко поширена у світі, особливо при організації міжнародних перевезень, але якщо в ЄС це

системність та безперервність контейнерних перевезень, то в Україні досі не вдалося цього досягти, а здійснюються разові нерегулярні контейнерні поїзди раз на тиждень. Маршрут Київ-ТІС поїзд проїжджає за 19 годин, у той же час маршрут між Парижем та Марселем (близько 900 км) має регулярність руху п'ять разів на тиждень у кожному напрямку, а основний контейлерний маршрут Європи – Бреннерський (Трансальпійський) шлях – що доби пропускає 14 пар поїздів. В Україні на нерегулярній основі курсує близько 10 контейнерних поїздів, тоді як у країнах ЄС курсує понад 400 таких поїздів, що перевозять понад 30 млн. TEU на рік [9]. Існуюча провізна здатність у системі контейнерних терміналів та основних залізничних ліній залежить від належного технологічного забезпечення, яке включає способи процесу доставки вантажів у контейнерах, процеси організації перевезень з використанням технічних можливостей і перевізних засобів залізничного транспорту.

Постійне зростання експортно-імпортних вантажопотоків потребує інноваційного підходу до вирішення транспортної проблеми. З усіх видів вантажів, що перевозяться, найбільший інтерес представляють контейнерні перевезення по залізниці, які є одними з найбільш затребуваних і перспективних у всьому світі і вважаються основним видом транспортування в розвинених країнах. У країнах Євросоюзу частка перевезень у контейнерах по залізниці сягає 45%. В Україні, на відміну від розвинених країн світу, частка контейнерних перевезень по залізниці у загальному залізничному потоці залишається вкрай низькою, а зростання стримується загальними проблемами в економіці, нестачею терміналів для перевантаження та зберігання вантажів, причому нестача перевантажувальних потужностей є однією з головних причин низького рівня контейнерних перевезень. Адже їхня головна особливість полягає в тому, що перша та «остання миля», тобто доставка безпосередньо замовнику, завжди залишається за автотранспортом, який здійснює перевезення в радіусі 300 км від залізничних терміналів.

Сучасна концепція розвитку європейського транспорту будується на інтермодальному підході. У сучасній Європі річний обсяг контейлерних перевезень становить майже 70 млн. т, тільки в Німеччині здійснюється до 150 тис. відправлень контейлерів на рік, а такі країни, як Швейцарія, Франція, Австрія здійснюють, як мінімум, по 50 тис. відправлень кожна. Вигоди безперевантажного комбінованого транспортування зрозумілі, і, мабуть, колись воно отримає визнання і в Україні, але зробити для цього доведеться чимало. Наприклад, необхідно, щоб рухомий склад залізниці гарантовано долав не менше 1000 км на добу. Аналізуючи структуру українського вантажопотоку в портах в 2020 [10] можна зробити висновок, що досить велика частина контейнеропридатної продукції доставляється за безконтейнерними схемами.

Безумовно, особливо на перших етапах запровадження інноваційних способів перевезення вантажів необхідне прийняття держпрограми, в якій планувалася б фінансово-економічна підтримка держави, у тому числі і встановлення ліберальних тарифів, передбачалося створення вітчизняної нормативної бази, що узгоджується з керівними актами ЄС у частині комбінованих перевезень. Незаперечна перевага європейських компаній – підтримка з держбюджету та фондів розвитку Євросоюзу, за якої контейнерні перевезення залізницею в країнах ЄС дотуються, оскільки вони є більш екологічно чистими, порівняно з автотранспортом.

Мета і завдання дослідження. Для України одним із найважливіших способів перевезення експортних та транзитних вантажів є змішане залізнично-водне сполучення. Воно поєднує можливості перевезень значних обсягів масових вантажів з місць їх видобутку або виробництва залізничним транспортом, і широкий доступ до ринків споживання, який надає морський транспорт. Порт є одним із елементів логістичного ланцюжка, але ефективність такого ланцюжка залежить від великого партнера – залізниці. Укрзалізниця розвиває контейнерні перевезення як внутрішні, так і транзитні, але їх ефективність може бути забезпечена тільки завдяки регулярним маршрутам із чіткою періодичністю курсування у певні дні, тобто не на постійній основі. Будівництво терміналів в Україні – одна з необхідних умов конкуренції нашої країни на міжнародному ринку логістичних послуг. Проектна потужність контейнерного терміналу

«Мостиська» у Львівській області на початковому етапі планувалася в розмірі 100 000 TEU на рік. Водночас в угорському проекті зі створення до 2023 року вантажного хаба в Залаегерсезі заявлено реалізацію великого проекту терміналу East-West Gate, теоретична потужність – 1 млн TEU на рік.

У практиці міжнародних перевезень використовуються різні типи контейнерів, їхня класифікація за габаритами передбачає два основні типорозміри модулів: довжиною 20 футів і довжиною 40 футів [11]. В даний час однією з проблем є неможливість перевезення 40 футових контейнерів українською залізницею через тарифи, які розраховуються, виходячи з обсягу перевезення, тобто плата за 40 футовий контейнер являє собою майже вдвічі більшу суму, ніж за 20-футовий. На відміну від залізниці, для автотранспорту і 20-, і 40-футові контейнери є «вантаж», і тому їхнє транспортування коштує майже однаково. Сучасна транспортно-логістична система внаслідок недосконалості логістичних та транспортних технологій, а також існуючих інфраструктурних обмежень не відповідає повною мірою вимогам учасників транспортного процесу до швидкості та вартості перевезень, спектру та якості послуг, що надаються. Інноваційна транспортно-логістична система може бути сформована на основі будівництва магнітолевітаційної транспортної магістралі та запровадження сучасних логістичних технологій.

Одним із сучасних трендів у транспортних технологіях є застосування безпілотних транспортних засобів [12], розробка яких переживає технологічний бум у багатьох галузях усіх провідних країн світу. Правда, треба зазначити, що значний обсяг робіт зі створення безпілотних транспортних засобів проводиться на закритій тематиці в рамках оборонних замовлень і тому результати досліджень мало публікуються у відкритому друку. Складні наукомісткі технічні рішення, математичний апарат, алгоритми управління рухом, програмне забезпечення, датчики систем управління безпілотними транспортними засобами у багатьох країнах віднесено до продукції подвійного призначення.

У даний час магнітолевітаційні високошвидкісні наземні транспортні системи не застосовуються для здійснення вантажних перевезень. Але великий науково-технічний досвід багаторічних науково-практичних робіт Інституту транспортних систем та технологій в галузі магнітолевітаційних систем для перевезення пасажирів дозволяє використатися існуючими результатами для коректного обґрунтування концептуальних основ створіння магнітолевітаційної системи вантажного транспорту.

Мета статті – дослідити можливість побудови магнітолевітаційної вантажної транспортної системи та обґрунтувати доцільність застосування існуючих наукових та практичних результатів, реалізованих при побудові пасажирських магнітолевітаційних транспортних засобів, для побудови вантажного магнітолевітаційного транспорту.

Матеріали та методи дослідження. Як методи дослідження в роботі застосовані теоретичний системний підхід та порівняльний техніко-економічний аналіз технологій вантажних перевозок чинними та магнітолевітаційними транспортними засобами. Основними джерелами інформації, використаними при проведенні роботи, орієнтованої на високошвидкісне транспортування контейнерних вантажів, були результати наукових досліджень, науково-технічний заділ та практичний досвід створення як діючого макета, так і основних елементів транспортної системи з магнітним підвісом Інституту транспортних систем та технологій. Магнітолевітаційні вантажні системи досі перебувають у стадії розробки, обговорюються більш з теоретичної точки зору, але більшість транспортних фахівців вже стали віддавати перевагу технології на магнітному підвісі щодо традиційних сталевих рейок. І особливо це стосується високошвидкісного транспорту на магнітному підвісі [13].

Сьогодні магнітолевітаційний транспорт позиціонується як пасажирський, але кардинальне переозброєння вантажного транспорту може бути здійснено шляхом використання магнітолевітаційної технології в системі магістральної доставки контейнерів з транспортно-логістичних центрів збору виділеними магістралями на пункти прийому. На сучасному етапі розвитку магнітолевітаційного транспорту чітко позначилася тенденція його поділу на

пасажирський та вантажний, а до 2000 років вже сформувався досить великий науково-технічний заділ та заділ практичних впроваджень, що підтвердили працездатність технічних рішень зі створення вантажних транспортних засобів з магнітним підвісом. Створення вантажного магнітолевітуючого транспорту є складним науковим завданням, вирішення якого можливе у рамках створення магнітолевітаційної транспортної системи (МТС), що об'єднує пасажирські та вантажні перевезення та інтегрована в існуючу залізничну транспортну систему.

У даний час у світі розроблені та знаходяться в різному ступені впровадження пасажирські магнітолевітаційні технології Transrapid (ФРН, КНР), HSST (Японія, Південна Корея), Maglev (Японія) та Inductrack (США), кожна з яких має свої плюси та мінуси, що надають суттєві проблеми як в процесі створення, так і особливо при експлуатації. Тому зазначені країни, як і раніше, продовжують наукові дослідження шляхів підвищення ефективності та спрощення реалізації магнітолевітаційних технологій. В Україні ученими Інституту транспортних систем та технологій для проведення досліджень з удосконалення магнітолевітаційного транспорту розроблено і виготовлено макетний зразок магнітолевітаційного транспортного засобу, стенд чотирипунктного електродинамічного підвісу і транспортна естакада, обладнана системою тяги на базі лінійного синхронного двигуна (ЛСД) (рис. 1).



Рис. 1. Транспортна естакада з лінійним синхронним двигуном та діючий макет магнітолевітаційного транспортного засобу

Вирішено практичні задачі по створенню кріомодулів – головного визначального вузла магнітолевітуючого транспорту. Надпровідна котушка кріомодуля та транспортний кріомодуль КТ-10М приведені на рис. 2.

З урахуванням наявного вітчизняного науково-технічного доробку застосування магнітолевітаційних вантажних перевезень вимагатиме створення МТС, що містить:

транспортно-логістичні магнітолевітаційні контейнерні термінали, що забезпечують збирання, переробку та вивантаження контейнерів на магнітолевітаційну вантажну платформу (МВП) та їх переміщення в автоматичному режимі в тиловий контейнерний термінал. Ця ділянка лінії працює за принципом конвеєра, тобто в режимі безперервного переміщення вантажних платформ за певним маршрутом;

магістральні магнітолевітаційні лінії для переміщення магнітолевітаційних вантажних платформ між контейнерними терміналами;

термінальні магнітолевітаційні лінії для переміщення та проведення вантажно-розвантажувальних операцій як усередині терміналу, так і для міжтермінальних, близько розташованих контейнерних терміналів;

магнітолевітаційну вантажну транспортну платформу.



Рис. 2. Транспортний кріомодуль КТ-10М та надпровідна котушка кріомодуля

Зберігаючи найменування, терміни та умовні позначення, прийняті у магнітолевітаційній тематиці, розглянемо основні функціональні системи. З урахуванням власного науково-технічного доробку цілком допустимо і необхідно при створенні вантажної МТС використовувати існуючі та перевірені структурні одиниці пасажирської магнітолевітаційної системи. МВП, на яку встановлюється контейнер, мало чим відрізняється на вигляд і має багато спільного зі звичайною типовою платформою, тільки без коліс, оснащена власним приводом і вбудованим набором обладнання для створення безпілотного режиму. Оскільки функціональне призначення типової та магнітолевітаційної платформ абсолютно однакові, тому при побудові МВП доцільно використовувати конструктивні рішення, відпрацьовані під час проектування звичайної платформи.

Найбільш доцільно контейнерну МВП проектувати для стандартних найбільш поширеного типу 20-футових контейнерів. Досягнута левітаційна здатність пасажирського магнітолевітаційного транспорту дозволяє підйом та переміщення транспортних засобів вагою 50-60 т. Для забезпечення відповідності вимогам стандарту безпілотного магнітолевітаційного транспортного засобу конструктивно-схемна побудова повинна реалізувати функції саморуку та керується в автоматичному режимі МВП. Основними конструктивними системами такої МВП є бортові магнітні системи левітації, стабілізації та лінійної тяги, що вже відпрацьовані та працюють у пасажирському магнітолевітаційному транспорті.

Шляхова структура (ШС) також є однією з важливих функціональних систем вантажної МТС, і вибір типу конструктивного її виконання безпосередньо впливає на техніко-економічні характеристики системи. Відповідно до [14] вибір ШС з дискретним шляховим полотном дає можливість задати будь-яке просторове розтікання струмів, наведених у ній, підвищувати левітаційні характеристики підвісу, а також надає можливість багатофункціонального використання одних тих самих конструктивних елементів для реалізації функцій тяги, підвісу та бічної стабілізації. Тому при побудові МТС доцільно застосувати ШС у дискретному виконанні.

Але важливо не тільки забезпечити ефективність контейнерного МВТ за рахунок використання багатофункціональності та дискретності ШС, а й забезпечення можливості одночасного використання її як для вантажних, так і для пасажирських перевезень, з урахуванням того, що швидкість контейнерного МВТ значно менша за швидкість магнітолевітаційного пасажирського транспорту, тобто для забезпечення руху знадобляться різні рівні левітації. Тому на час проходження МВП струми в котушках ШС програмно змінюються тільки на ділянці ШС, де вона знаходиться, що забезпечує економічність транспортного засобу. З цієї ж причини можна використовувати прості, а не надпровідні котушки МВП, що дає можливість виключення обладнання, необхідного для забезпечення надпровідності, насамперед складного криогенного обладнання, тобто зменшення загальної

ваги (адже вага тільки кріомодуля і надпровідних котушок більше 1100 Н), що дозволить досягати левітації меншими магнітними полями котушок.

Для забезпечення поступального руху магнітолевітаційного пасажирського транспорту використовується ЛСД, обмотки якоря якого розміщені вздовж колійної структури – статора. При живленні обмоток змінною синусоїдальною напругою хвиля результуючої магніторушійної сили переміщається вздовж статора зі швидкістю $V = 2\tau f$, де f – частота напруги живлення, τ – полюсний поділ. Взаємодія цієї магніторушійної сили з магніторушійною силою котушки (індуктора) на МВП обумовлює електромеханічне перетворення енергії, завдяки чому індуктор переміщається у бік руху хвилі магніторушійної сили якоря із синхронною швидкістю.

Сьогодні розроблено новий тип двигуна для магнітолевітаційного транспорту – лінійний асинхронний двигун із поздовжньо-поперечним магнітним потоком, який крім тягових зусиль забезпечує поперечну стабілізацію щодо ШС [15]. Для практичної реалізації високошвидкісних МТС належить ретельне техніко-економічне дослідження вибору типу двигуна для МВП. Як відомо, у реалізованих пасажирських магнітолевітаційних технологіях забезпечення левітації можливе як із попереднім набором швидкості з використанням коліс (МАГЛЕВ, Японія), так і без цього (Транспраїд, Китай).

Для реалізації функції безпілотності МВП необхідно забезпечення перманентної її левітації як під час стоянки та розвантаження/навантаження, так і при переміщенні на всіх ділянках магнітолевітаційних шляхів прямування. Тому при створенні МВП необхідне застосування комбінованої тягово-магнітолевітаційної системи, що реалізує функції підвісу, тяги та стабілізації бокового напрямку багатфункціональною котушкою, однакової не тільки для МВП, але й для ШС МТС. Крім того, однією з основних переваг застосування комбінованої тягово-магнітолевітаційної системи є можливість використання для забезпечення функцій тяги, підвісу та бокового спрямування одних тих самих магнітів як на рушійному транспортному засобі, так і на ШС [16].

Відповідно до [17] енергоспоживання магнітолевітаційного поїзда з ЛСД становить величину ≤ 123 Втч/Ткм, тобто для переміщення вантажу 1Т на відстань 1 м потрібна енергія 0,123 Втч, а вантажу 40 Т – приблизно 4,92 Втч. З урахуванням ваги самого контейнера (20-40 футів) вага МВП не перевищить 40 Т, і при орієнтації на можливість трафіку 100 контейнерів на добу енергія, необхідна для переміщення МВП, дорівнює 492 Втч.

Вибір раціональної схеми та параметрів магнітолевітаційного вузла МВП є предметом наукових досліджень, але відсутність пасажирів на борту робить вибір схеми розміщення не настільки критичним. Комбіновані котушки розміщуються під днищем МВП рівномірно по довжині, а електромагнітна сумісність та безпека може забезпечуватися, за необхідності, екрануванням магнітного поля котушок.

Для мінімізації часу виконання вантажних операцій у складі МВП необхідно передбачити автоматизовану систему механічного закріплення і розкріплення контейнера на магнітолевітаційній платформі. Конструктивне виконання МВП має бути оснащене аеродинамічними обтічниками, що знижують аеродинамічний опір, для підвищення швидкості переміщення МВП. Аеродинамічний обтічник повинен забезпечувати автоматичну реалізацію функції зниження аеродинамічного гальмування та забезпечення зручності вантажно-розвантажувальних технологічних операцій. МВП має забезпечити режим повного автоматичного безпілотного застосування, що вимагає системи управління безпілотного руху.

Система управління МВП повинна проєктуватися з урахуванням європейської системи управління рухом поїздів ETCS (European Train Control System), в основу якої покладено вимогу безперервного контролю перевізного процесу за допомогою сукупності різних технічних засобів. Диспетчер повинен отримувати дані про місцезнаходження кожної МВП, щоб в будь-який час розрахувати мінімальні можливі відстані між ними, при цьому весь шлях ділиться не на фіксовані ділянки, а на ділянки, що перманентно «рухаються». Для моніторингу розташування МВП та обміну даними з нею можна використовувати балізи, автономні

приймально-передавальні пристрої (транспондери) з енергонезалежною пам'яттю, які встановлюються на ШС і під час проїжджаючої над ними МВП сприймають високочастотний сигнал від неї і передають у відповідь інформаційне повідомлення про її місцезнаходження. Крім того ці дані передаються в інформаційні системи магнітолевітаційних контейнерних терміналів, диспетчеру МТС та одержувачу/відправнику вантажу. Відстань між балізами залежить від встановленої швидкості МВП, і для підвищення ймовірності розпізнавання бортовою системою поточного місцезнаходження МВП, балізи потрібно розмішувати парами. Необхідну енергію балізи одержують від передавальних модулів МВП, які випромінюють високочастотний сигнал, що індукуює в котушці балізи електричний струм. Інформаційний обмін повідомленнями може відбуватися за швидкістю руху до 500 км/год. На всьому шляху проходження здійснюється автоматичний безперервний обмін інформацією між МВП та диспетчером, який забезпечує автоматичне інтервальне регулювання транспортних засобів. Балізи передають на МВП лише свої координати, а бортова система навігації МВП постійно визначає своє місцезнаходження на підставі останніх отриманих координат з балізи та пройденого після цього шляху. МВП можуть уточнювати своє місцезнаходження використовуючи акселерометри, одометри або радари. Ці відомості безперервно передаються диспетчеру, у якого проводиться порівняння даних, що надійшли, з плановим графіком руху поїзда. Результати порівняння по мережі цифрового радіозв'язку передаються до бортової інформаційно-керуючої системи МВП для управління МВП, що дозволяє скоротити інтервал попутного прямування.

МВП має бути оснащена вбудованою системою автоматичного контролю технічного стану як самої платформи, так і транспортного шляху [18]. У режимі онлайн інформаційні повідомлення систем контролю та навігації передаються в інформаційні системи диспетчера і терміналів вибуття та прибуття МВП та перманентно – одержувачу вантажу.

З огляду на застосування обчислювальних засобів у складі МВП цілком зрозуміло, що забезпечення безпеки МВП вимагає наявності системи кібербезпеки як апаратних, так і програмних компонентів всіх складових елементів МТС. МВП є електротехнічною системою, функціонування якої неможливе без наявності бортової системи енергозабезпечення, причому система контактного струмознімання, що застосовується на звичайних електропоїздах, на швидкостях магнітолевітаційного транспорту не може бути реалізована. Тому при побудові бортової системи енергозабезпечення МВП можливо використовувати досвід застосування пасажирських магнітолітвітуючих транспортних засобів [14, 19, 20]. У цьому випадку побудова бортової системи енергозабезпечення базується на використанні лінійного індукторного генератора, в якому напруги живлення індукуються в спеціальних обмотках, розміщених на МВП, за рахунок вищих гармонійних складових магнітного поля струмів, що протікають в ШС. Застосування нових науково-практичних ідей при побудові МВП призводить до зменшення як кількості споживачів, так і необхідної споживаної потужності бортової системи енергозабезпечення, завдяки чому з'являється можливість забезпечення її споживачів меншою необхідною потужністю. Але треба врахувати, що напруга індуктора пропорційна швидкості руху МВП, тому при безперервному тривалому русі МВП для сталого її енергозабезпечення необхідно застосувати гібридні накопичувачі енергії.

Створення МТС передбачає можливість спільного користування магнітолевітаційною пасажирською ШС для вантажних перевезень, що неможливо без забезпечення багатофункціональності МТС. Проведені вченими Інституту дослідження шляхів створення уніфікованої ШС показали можливість створення єдиної ШС завдяки як її новій архітектурі, так і способу розміщення і управління котушок. Цілком зрозуміло, що це можливо лише при використанні багатофункціональних котушок як у самій ШС, так і в рухомому екіпажі для забезпечення одночасно функцій підйому, руху і стабілізації одним схемним елементом.

Існуючі станції, що забезпечують традиційні залізничні пасажирські та вантажні перевезення, та їх інфраструктура не можуть бути використані для функціонування МВТ. На

даному етапі розвитку магнітолевітаційного транспорту питання проєктування спеціалізованих вантажних станцій, необхідних для контейнерних магнітолевітаційних перевезень, практично не здійснюються навіть у країнах, які володіють пасажирськими магнітолевітаційними технологіями. Аналіз принципів і технологій роботи існуючих контейнерних терміналів, що застосовуються на традиційному залізничному транспорті, дозволяє зробити висновок, що як вихідні дані для проєктування контейнерних магнітолевітаційних станцій необхідно використовувати ряд типових видів операцій – вантажних, диспетчерських та по обслуговуванню рухомих транспортних засобів. Для виконання зазначених видів операцій технологічне обладнання магнітолевітаційного терміналу вантажної станції має використовувати магнітолевітаційні принципи функціонування.

Магнітолевітаційну вантажну транспортну магістраль доцільно будувати в естакадному виконанні, оскільки опори естакад займають значно менше земельних площ, ніж автостради, аеропорти та залізничний транспорт. Магнітолевітаційна вантажна транспортна магістраль складається з прогонових побудов модульного виконання з уніфікованих легких несучих конструкцій. Маневреність та висока швидкість переміщення вантажного контейнера по магнітолевітаційній транспортній магістралі може бути забезпечена за рахунок оснащення магістралі пристроями переведення шляхів руху МВП. Перемикання руху з одного шляху на інший може здійснюватися автоматичним поперечним пересуванням прогонових побудов. Для цього при створенні транспортної магістралі необхідно передбачити пристрої переведення прогонових побудов. При необхідності переведення контейнера на менші швидкості руху треба мати багаторівневу систему переведення, здатну забезпечити з'зд/в'їзд вантажної платформи у місцях зчленування контейнерної лінії з головною магістраллю. Цілком логічно, що для переходів з контейнерної на магістральну (високошвидкісну) ділянку доцільно використовувати електромагнітне переведення зі шляху на шлях.

ШС для МВП може бути як однолінійною, так і дволінійною. При використанні дволінійної ШС по кожному з шляхів можуть одночасно переміщатися декілька МВП з урахуванням пропускної здатності. МКТ створюється на кінцях кожного шляху, що забезпечує розміщення контейнерів для розвантаження/навантаження для всіх видів транспорту. Управління потоками МВП найбільш просто забезпечити шляхом реалізації принципу односпрямованості руху, коли МВП рухаються з портового терміналу до наземного логістичного терміналу по одній лінії, а із наземного логістичного терміналу до портового – по другій, при цьому одна лінія забезпечує розвантаження терміналу, інша – навантаження. Це забезпечує одночасно розвантаження з обох терміналів і збільшує їх здатність до прийому чергової партії контейнерів. Кожен шлях повинен мати пристрій переведення у відповідний термінал, а в разі транзиту МВП – й переведення з низькошвидкісної термінальної лінії на високошвидкісну магістральну лінію. Інформація про поточну завантаженість терміналів передається диспетчеру, а також інформативно в режимі онлайн – на МВП.

Як свідчить наявний досвід розвитку техносфери, відмови, аварії та катастрофи завжди були невід'ємною частиною життєвого циклу всіх без винятку технічних систем, незважаючи на існуючу думку, що аварії є малоймовірними подіями, настання яких можна уникнути [1]. Тому важливою складовою частиною радіоелектронного обладнання МВП має бути радарне оснащення для здійснення перманентного сканування ШС як в напрямку руху, так і пройденого шляху. Найбільш доцільним є застосування багатофункціональної системи моніторингу на основі радарів та лідарів. Радари використовують електромагнітні хвилі для визначення дальності, швидкості та перешкод у напрямку руху, а лідари, використовуючи алгоритми та методи одночасної локалізації та побудови карт, складають 3-мірну карту, яка використовується для порівняння з еталонною картою маршруту слідування, що зберігається в пам'яті обчислювальних засобів МВП. Усі події, пов'язані з процесом вантажоперевезення, повинні зберігатися в інформаційних системах МВП, контейнерних терміналів та диспетчера МТС із прив'язкою за часом та місцем.

У даний час одним з найбільш опрацьованих варіантів побудови вантажної магнітолевітаційної контейнерної станції є схема тупикового типу. Основною вимогою до такого виду станції є забезпечення автономності та поточності процесу переробки та просування контейнера всередині терміналу. Для організації повного циклу процесу обробки магнітолевітаційний контейнерний термінал повинен мати різні шляхи для розвантаження та навантаження контейнерів. Схематичне зображення процесу обробки в магнітолевітаційному контейнерному терміналі з урахуванням можливих технологій переміщення МВП подано на рис. 3.

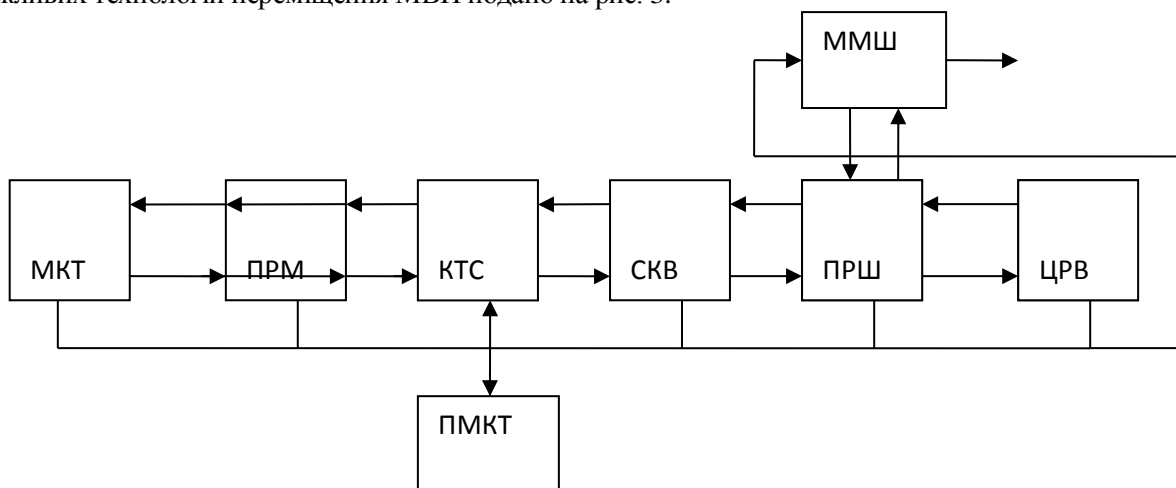


Рис. 3. Технологія обробки в магнітолевітаційному контейнерному терміналі, де МКТ – термінал для МВП, СКВ – система контролю відповідності, КТС – система контролю технічного стану МВП, ПРМ – прийомо-розвантажувальні механізми, ПРШ – пристрій розгалуження шляху, ММШ – магістральний магнітолевітаційний шлях, ЦРВ – центр ремонту та відновлення, ПМКТ – процесор МКТ

Можливий ряд варіантів організації роботи магнітолевітаційної контейнерної станції, основною відмінністю яких є спосіб переміщення платформ. Так для наведеної на рис. 3 схеми вантажного МКТ процес обробки МВП відбувається таким чином. МВП з контейнером, що прибула на магнітолевітаційний контейнерний термінал МКТ, через пристрій розгалуження шляху ПРШ надходить з контейнерного магнітолевітаційного шляху в систему контролю відповідності СКВ для звірки даних фактичного і необхідного напрямку. Визначення відповідності здійснюється з використанням даних, переданих з диспетчерського центру і терміналу відправлення, та тих, що зберігаються в пам'яті процесора ПМКТ. Ступінь маневреності МВП великою мірою визначається пристроєм переведення МВП як із магістральних на термінальні контейнерні шляхи, так і всередині останніх. Сьогодні ведуться інтенсивні пошуки найбільш ефективного способу перемикання руху магнітолевітаційного транспортного засобу з одного шляху на інший. З урахуванням існуючої концепції побудови стрілочних переведень, що застосовується в пасажирському магнітолевітаційному транспорті [21], переведення транспортного засобу з одного шляху на інший шлях забезпечується механічним переміщенням роз'ємних бічних стінок ділянок ШС за допомогою електромеханічного приводу. При цьому кінцеві частини роз'ємних бічних стінок переміщуються у поперечному напрямку, а середня рознімна частина активної шляхової структури опускається вниз.

Функціонування пристрою розгалуження шляху ПРШ може бути реалізовано з використанням прямих (основних) та відгалужених шляхових треків левітації зі статорами тягових лінійних синхронних двигунів, що забезпечує переведення магнітолевітаційного транспортного засобу з основного шляху на відгалужену колію, або навпаки, рис. 4.

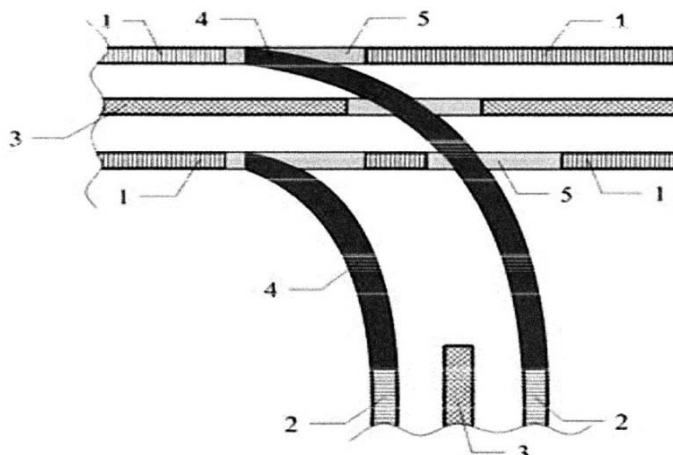


Рис. 4. Функціонування ПРШ

ПРШ включає прямі шляхові треки левітації (1), відгалужені шляхові треки левітації (2) і обмотки статорів тягових лінійних синхронних двигунів (3). На відгалужених шляхових треках левітації в пазах розміщені трифазні обмотки маневрового лінійного синхронного двигуна (4). У прямих шляхових треках левітації (1) та обмотках статорів тягових лінійних синхронних двигунів (3) виконані розриви (5), завдяки чому забезпечується можливість безперервного руху МВП в режимі перманентної левітації на ПРШ. Переведення здійснюється шляхом вимкнення живлення обмоток статора тягового ЛСД при наближенні МВП до місця ПРШ та включення живлення обмоток статорів маневрових ЛСД. В результаті виникає обертальний момент, прямо пропорційний масі МВП, силі тяги маневрових ЛСД і обернено пропорційний радіусу повороту, який забезпечує переведення МВП в стані левітації на іншу ділянку ШС. Це переведення здійснюється автоматично без використання механічних засобів, що полегшує конструкцію стрілочного переведення, підвищує його надійність.

При низьких швидкостях необхідно реалізувати багатовузлові перемикання, здатні забезпечити з'їзд/заїзд МВП на ділянках зчленування з магістральним шляхом. На багатовузлових магнітолевітаційних контейнерних лініях застосування ПРШ з механічним приводом небажане, оскільки він не може забезпечити високу швидкість вантажно-розвантажувальних технологічних операцій. Перемикання шляхів може бути реалізовано шляхом перемикання секцій обмоток статора ЛСД. При використанні двох ЛСД – по лівому та правому борту МВП, регулюванням струмів у статорних обмотках створюється обертальне зусилля, і перехід МВП з одного на інший шлях відбувається в бік ЛСД, струм статорної обмотки якого вище, тобто вище обертальне зусилля. У разі використання одного ЛСД по осі МВП електромагнітне переведення має більш складне технічне рішення.

При збігу даних ПМКТ дозволяє подальший рух по технологічній лінії для проведення контролю технічного стану в КТС і після огляду МВП стає на вивантажувальному шляху і просувається малою швидкістю до ПРМ на розвантаж. Станції, що розташовані на лініях магнітолевітаційного транспорту з підвищеною потоковістю транспортування, повинні мати відповідну переробну здатність. На всьому шляху МВП позиціонується в певній точці шляху, яка змінюється в залежності від поточної ситуації на терміналі по зняттю контейнера з платформи. Після зняття контейнера платформа позиціонується на МКТ для формування повідомлення про готовність до завантаження. На шляху завантаження МКТ платформи стають у чергу для завантаження автоматично закріпленого контейнера. По виході з магнітолевітаційної контейнерної станції кожна МВП знову потрапляє в зону контролю (КТС і СКВ), за результатами якого МВП прямує на ПРШ і далі рухається за маршрутом або прямує для ремонту в центр ремонту та відновлення ЦРВ, не зупиняючи при цьому потоку платформ.

Виходячи з особливостей вантажних контейнерних перевезень та характеристик термінальної структури України, МВП має забезпечити переміщення вантажів з портових та наземних логістичних термінальних центрів різної протяжності. Конвеєрні лінії можуть мати малу протяжність (до 10 км) і не вимагають великої швидкості для переміщення вантажів, але для транспортування на великі відстані використовуються ММШ, на яких є можливість регулювання швидкості МВП залежно від графіка їх руху по ММШ.

Цілком зрозуміло, що забезпечення окупності неможливе без визначення локальних транспортних коридорів, тому важливим є вибір місць розташування МКТ та маршрути трас, які визначаються на основі аналізу обсягів повторюваності та ступеня логістичної ефективності. В Україні великими й найбільш повторюваними відправниками вантажу є група СКМ і Холдинг «Метінвест», що входить до неї, компанія Фергехро, Арселор Міттал, Івано-Франківськ Цемент, Запорізький ЖРК, для яких доцільна побудова МТС, інтегрованих в існуючі контейнерні термінальні структури, з урахуванням сучасного розташування терміналів, відстаней між кінцевими пунктами маршруту, які можуть досягати 500 – 800 км. На великих відстанях наземна ШС повинна бути високошвидкісною, тому і МВП може використовувати швидкісні можливості ШС. Але з урахуванням графіка сполучення пасажирських транспортних засобів оптимальна швидкість руху МВП повинна бути обмежена швидкістю 200-250 км/год. У зв'язку з цим виникають взаємопов'язані завдання дослідження фізичних принципів різних типів левітації, пошуку технічних рішень транспортних засобів, шляхопроводу та інфраструктури, обґрунтування раціональних маршрутів переміщення вантажів та забезпечення технологічної єдності транспортно-складського процесу шляхом створення єдиної конвеєрно-магістральної вантажної транспортної системи. МВП повинні стати елементом ІТС, у якій всі структурні одиниці є багатофункціональними та призначені для реалізації технологій перевезення вантажів та пасажирів. Реалізація інтелектуальних технологій ІТС має поширюватись як на ШС, так і на МВП.

Інтелектуальні технології процесів перевезень повинні містити низку елементів автоматичного збору даних про умови перевезень, розпізнавання нештатних ситуацій або умов та можливостей їх виникнення, прогнозування станів транспортних систем та планування перевезень та ін. Інтелектуальна МВП містить вбудовану систему автоматичного управління рухомими одиницями та самодіагностики, пов'язану з центральними автоматизованими диспетчерськими центрами управління. Впровадження комп'ютерних систем управління на термінальних станціях у зв'язці з цифровим радіоканалом та іншими технічними системами, апаратно-програмними засобами повинні забезпечувати інтероперабельність завдяки сумісності в середовищі команд, що передаються з центру управління, з інших платформ управління через систему радіозв'язку, через інтелектуальний термінал та ін.

Реалізація ІТС може бути поширена на технології «інтелектуального вантажу», який у процесах перевезення «автоматично повідомляє про свої властивості», забезпечуючи логістичні технології «відстеження вантажів» – інформаційні та телематичні технології та системи, які враховують вимоги інтероперабельності або їх елементи. Цілком очевидно, що реалізація інтелектуальності вантажу є складним технологічним завданням, хоча і цілком можливою. Але це пов'язано з додатковими витратами відправника та одержувача і хоча дуже привабливе, але вимагає критичної оцінки. Враховуючи вимоги інтелектуальності МВП, цілком доцільно обмежитися інформацією, яку формує платформа, а не сам контейнер.

Застосування магнітолевітаційної технології для роботи з контейнерами дозволить забезпечити автоматизацію всього циклу доставки вантажів. Вантажна магнітолевітаційна транспортна система з використанням магнітолевітаційних контейнерних платформ дозволить кожен контейнер відправляти з терміналу на конвеєрі індивідуально, без формування контейнерного поїзда до кінцевого пункту призначення. Система дозволить витрачати менше електроенергії перевезення контейнера, проти залізничного транспорту, оскільки силове

живлення подається не на всю лінію, а на ту ділянку, де знаходиться вантажна платформа з контейнером.

Оцінимо можливі характеристики нового виду контейнерних перевезень, використовуючи відомі дані.

За перше півріччя 2020 р. по території України залізничним транспортом перевезено 216635 TEU, що на 14% більше за обсяги перевезень контейнерів за аналогічний період 2019 р. (189 933 TEU). Для розрахунку візьмемо середню швидкість платформи МВП $V = 250$ км/год (69,4 м/с), а середньостатистичну відстань перевезення залізничним транспортом $l = 400$ км. Тоді час шляху однієї платформи для цієї відстані між терміналами $t = l/V = 1,6$ ч або 5760 с. Для оцінки щодобової пропускної спроможності лінії в одному напрямку беремо середньостатистичне значення контейнерів, що були задіяні у 2020 р. – $N_1 = 1369$ контейнерів. З урахуванням режиму цілодобової роботи магістралі час, потрібний на розвантаження/навантаження контейнера становитиме $t = (24 \times 3600)/1369 = 63$ с. При швидкості МВП 250 км/год відстань, що проходить платформа за час розвантаження/навантаження контейнера, складе $S_1 = V \cdot t = 69,4 \times 63 = 4372,2$ м = 4,4 км, а при швидкості МГП 200 км/год (55,55 м/с) $S_2 = 3499,56$ м = 3,5 км, що дає для кількості МВП, що одночасно можуть перебувати на одній лінії, величину $n = l/S = 400/4372 = 90$ одиниць для швидкості МВП 250 км/год і 114 одиниць для швидкості 200 км/год.

В Україні у 2019 р. контейнерне перевезення здійснювали переважно портові термінали «Контейнерний термінал Одеса» (390 тис. TEU), «Бруклін-Київ Порт» (257 тис. TEU), «ТІС-КТ» (218 тис. TEU), «Іллічівський морський рибний порт». (138 тис. TEU), тоді, як видно з проведеного розрахунку, вантажна транспортна система, використовуючи технології магнітної левітації, створює гнучку ефективну систему автоматизованого високошвидкісного переміщення та розподілу вантажів між завантаженими логістичними вузлами. Працюючи в 50-60-секундних циклах, система може переміщувати 90-110 контейнерів в одному напрямку індивідуально.

Висновки. В роботі досліджена можливість створення магнітолевітаційної вантажної транспортної системи та обґрунтована доцільність застосування існуючих наукових та практичних результатів, реалізованих у пасажирських магнітолевітаційних транспортних засобах, сформульовано основні риси інтелектуального магнітолевітаційного вантажного транспорту, розроблені концептуальні основи побудови магнітолевітаційного вантажного транспортного засобу із застосуванням технологій керованої левітації або пристроїв комутації різних технологій. Нові, більш високі характеристики вантажного магнітолевітаційного транспортного засобу дозволять істотно підвищити рівень вантажних перевезень. Вантажна магнітолевітаційна транспортна платформа – це основа для створення інтелектуального екологічно чистого, малолінійного, безпечного, багатофункціонального вантажного транспорту, що не залежить від кліматичних та погодних умов експлуатації. У своїй роботі автори спираються на результати багаторічних науково-практичних робіт та великий науково-технічний досвід Інституту транспортних систем та технологій щодо побудови магнітолевітаційних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скалозуб В. В., Соловьев В. П., Жуковицкий И. В., Гончаров К. В. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий): пособие. Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. 207 с.
2. Мироненко В. К., Алексійчук Н. М. Пріоритети розвитку контейнерних перевезень залізницями України // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології. Сер. «Техніка, технологія», 2013. С. 176–178.
3. Lipsey R., Carlaw K. I., Bekkar C. T. Economic Transformations: General Purpose Technologies and Long Term Economic Growth. Oxford University Press, 2009. 236 p.

4. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року (Проект) URL: <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> (дата звернення: 17.05.2022).
5. Ширяєва С. В., Даниківська К. І. Основні складові мультимодальної транспортної мережі // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки», 2015. № 1 (31). С. 568-573.
6. Загорянський, В. Г., Гайкова, Т. В., Хорольський, В. Л., Кузев, І. О. Оптимізаційна модель вибору технічних засобів контейнерних перевезень та їх раціонального поєднання // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2018. № 3. С. 46-51.
7. Підлісний П. І, Паткевич Н. О., Цветов Ю. В. Роль контейнеризації змішаних вантажних перевезень у розвитку світової торгівлі. Економічний форум. 2016. № 3. С. 67-81.
8. Вернигора Р. В., Огороков А. М., Цупров П. С., Павленко О. І. Мультимодальні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України. Зб. наук. праць ДНУЗТ: Серія Транспортні системи і технології перевезень, 2017. №. 14. С. 20-29.
9. Деменко В. Мультимодальний транспорт. Економічні аспекти URL: https://mtu.gov.ua/files/prezentacija_vladimira_demenko_20.08.18.pdf (дата звернення: 17.05.2022).
10. Сайт «Новости». URL: <http://www.uspa.gov.ua/ru/press-tsentri/novosti/novosti-ampu/17839-zaoperativnimi-danimi-sichni-veresni-2020-roku-morski-porti-ukrajini-obrobili-118-78-mln-t-vantazhiv> (дата звернення: 10.05.2022).
11. Європейська угода про важливі лінії міжнародних комбінованих перевезень та відповідні об'єкти (УЛКП), 1991 02 січня.
12. Лукашевич С.В. Беспилотное транспортное средство: смена парадигмы как следствие цифровизации экономики, Транспортное право, 2019. № 3. С. 3-5.
13. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., Hekler M. Maglev: Science Experiment or the Future of Transport. Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. Germany: The International Maglev Board, 2018. 44 p.
14. Дзензерский В. А., Омеляненко В. И., Васильев С. В., Матин В. И., Сергеев С. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. Монографія. Киев: Наукова думка, 2001. 479 с.
15. Соломин А. В. Комбинированная система тяги и боковой стабилизации для магнитнолевитационного транспорта. Научные и практические разработки, 2017. С.107-117.
16. Yasukochi K. Superconducting magnet development in Japan. IEEE Trans on Magnetics, 1983. Vol. 3. P. 303-314.
17. Бочаров В. И., Салли И. В., Дзензерский В. А. Транспорт на сверхпроводящих магнитах. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1988. 152 с.
18. Лаврич Ю. М., Плаксін С. В., Погоріла Л. М. Мікрохвильові технології контролю надійності колійної структури магнітолевітуючого транспорту. Зб. наукових праць ДУТТ. Сер. Транспортні системи та технології, 2019. №.33. С 55-64.
19. Икэда Х., Сасаки Т., Ёкома Ё. Системы электропитания. Тоцуюдо гидзюцу, 1986. № 8. С. 286- 291.
20. Maki N., Takahashi H., Fujimoto T. A harmonic flux indication type onboard auxiliary power source system for levitated trains. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1981. Vol. 6. P. 2898 – 2906.
21. Schach R., Jehle P., Naimiann R.. Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbayn. Ein gesamptheitlicher Systemvergleich. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 428 p.

REFERENCES

1. Skalozub, V. V., Solovyev, V. P., Zhukovitskiy, I. V. & Goncharov K. V. (2013). *Intellektualnye transportnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta (osnovy innovatsionnykh tekhnologiy)* [Intellectual transport systems of railway transport (basics of innovative technologies)]. Dnepropetrovsk: Dnepropetr. nats. un-t zh.-d. transp. im. akad. V. Lazaryana [in Russian].
2. Mironenko, V., K. & Aleksiychuk, N. M. (2013). Prioriteti rozvitku konteynernikh perevezen zaliznitsyami Ukraїni [Priorities for the development of container transportation by railways of Ukraine] *Problemi ta perspektivi rozvitku transportnikh sistem v umovakh reformuvannya zaliznichnogo transportu: upravlinnya, ekonomika i tekhnologii. Ser. «Tekhnika, tekhnologiya» – Problems and prospects of transport systems development in the conditions of railway transport reforming: management, economy and technology. Series. "Technics, technology"*, 176-178 [in Ukrainian].
3. Lipsey, R., Carlaw, K. I. & Bekhar, T. (2009). *Economic Transformations: General Purpose Technologies and Long Term Economic Growth*. Oxford University Press.
4. Natsionalna transportna strategiya Ukraїni na period do 2030 roku (Proekt) [Ukraine National Transport Strategy for the period up to 2030 (project)]. *mtu.gov.ua* Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/28581.html> [in Ukrainian].
5. Shiryayeva, S. V., & Dankivska, K. I. (2015). Osnovni skladovi multimodalnoi transportnoi merezhi [The main components of a multimodal transport network]. *Visnik Natsionalnogo transportnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauki» – Bulletin of the National Transport University. The Technical Science Series*, 1, 568-573
6. Zagoryanskiy, V. G., Gaykova, T. V., Khorolskiy, V. L. & Kuzev, I. O. (2018). Optimizatsiyana model viboru tekhnichnikh zasobiv konteynernikh perevezen ta ikh ratsionalnogo poednannya [Optimization model of technical means for container transportation and their rational combination]. *Visnik KrNU im. Mikhayla Ostrogradskogo – Bulletin of KrNU of Michael Ostrogradsky*, 3, 46-51 [in Ukrainian].

7. Pidlisniy, P. I., Patkevich, N. O. & Tsvetov, Yu. V. (2016). Rol konteynerizatsii zmishanikh vantazhnikh perevezen u rozvitku svitovoï torgivli [The role of containerization of mixed freight transportation in the development of world trade]. *Yekonomichniy forum – Economic Forum*, 3, 67-81.
8. Vernigora, R. V., Okorokov, A. M., Tsuprov, P. S. & Pavlenko, O. I. (2017). Multimodalni perevezennya yak bazoviy segment tranzitnogo potentsialu Ukraïni [Multimodal transportation as a basic segment of transit potential of Ukraine]. *Zb. nauk. prats DNUZT: Seriya Transportni sistemi i tekhnologii perevezen – Coll. Scientific works of DNUZT: Series Transport systems and transportation technologies*, 14, 20-29 [in Ukrainian].
9. Demenko V. Multimodalniy transport. Yekonomichni aspekti [Multimodal transport. Economic aspects] mtu.gov.ua. Retrieved from https://mtu.gov.ua/files/prezentacija_vladimira_demenko_20.08.18.pdf [in Ukrainian].
10. Cayt «Novosti» [Site of news]. *uspa.gov.ua* Retrieved from <http://www.uspa.gov.ua/ru/press-tsentr/novosti/novosti-ampu/17839-zaoperativnimi-daniami-u-sichni-veresni-2020-roku-morski-porti-ukrajini-obrobili-118-78-mln-t-vantazhiv> [in Ukrainian].
11. Evropeyska ugoda pro vazhlivi liniï mizhnarodnikh kombinovanikh perevezen ta vidpovidni ob'ekti (ULKP). (1991) [European Agreement on Important Lines of International Combined Transportation and Relevant Objects (UKP)]. 1991 January 02 [in Ukrainian].
12. Lukashevich, S. V. (2019). Bepilotnoe transportnoe sredstvo: smena paradigmy kak sledstvie tsifrovizatsii ekonomiki [Unmanned vehicle: the paradigm changing as a result of the digitalization of the economy]. *Transportnoe pravo –Transport Law*, 3, 3-5 [in Russian].
13. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., & Hekler M. (2018) *Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. Germany: The International Maglev Board.
14. Dzenzerskiy, V.A., Omelyanenko, V.I., Vasilev, S.V., Matin, V.I. & Sergeev, S.A. (2001). *Vysokoskorostnoy magnitniy transport s eletrodinamicheskoy levitatsiey [High-speed magnetic transport with electrodynamic levitation]*. Kiïv: Naukova Dumka [in Russian].
15. Solomin, A. V. (2017) Kombinirovannaya sistema tyagi i bokovoy stabilizatsii dlya magnitnolevitatsionnogo transporta [Combined traction and lateral stabilization system for magnetic levitation transport]. *Nauchnye i prakticheskie razrabotki – Scientific and practical developments*, 1, 107-117 [in Russian].
16. Yasukochi K. (1983) Superconducting magnet development in Japan. *IEEE Trans on Magnetics*, 3, 303-314.
17. Bocharov, V. I., Sallii, I. V. & Dzenzerskiy, V. A. (1988). *Transport na sverkhprovodyashchikh magnitakh [Transport on superconducting magnets]*. Rostov-na-Donu: Rostovskiy universitet [in Russian].
18. Lavrich, Yu. M., Plaksin, S. V. & Pogorila, L. M. (2019) Mikrokhvilovi tekhnologii kontrolyu nadiynosti koliynoi strukturi magnitolevituyuchogo transportu [Microwave technologies for monitoring the strength of the magnetic transport track structure]. *Zb. naukovikh prats DUTT. Ser. Transportni sistemi ta tekhnologii – Coll. scientific works of DUTT. Ser. Transport systems and technologies*, 33, 55-64.
19. Ikeda Kh., Sasaki T. & Yekoma Ye. (1986). Sistemy elektropitaniya [Power supply systems]. *Totsyudo gijutsu – Totsyudo gidzyutsu*, 8, 286- 291.
20. Maki, N., Takahashi, H., Fujimoto, T. (1981) A harmonic flux indication type onboard auxiliary power source system for levitated trains. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 6, 2898 – 2906.
21. Schach, R., Jehle, P. & Naimiann, R. (2006). *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbayn. Ein. Gesamtheitlicher Systemvergleich*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Yuriy Lavrich^{1*}, Sergiy Plaksin², Lyubov Pogorila³

¹ Senior Research Fellow, Department of Vehicle Control Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho st., Dnipro, 49005, Ukraine

² Head of the Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho st., Dnipro, 49005, Ukraine

³ Junior Research Fellow, Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho st., Dnipro, 49005, Ukraine

CONCEPTUAL FUNDAMENTALS OF FREIGHT MAGNETOLEVITATION TRANSPORT SYSTEM CONSTRUCTION

An analysis of the transport systems current state in Ukraine has shown that the main problem in this area is the lack of transport infrastructure capacity, due to low route speeds for most transport modes and low levels of traffic organization and management. The level of rail container transport, the most common and perspective type of freight transportation is also low compared to European

countries. Therefore, the **main idea** of the article is to justify the need for the introduction of fundamentally new transport technologies that will help reduce or eliminate the problems of freight transport, and so the article is **relevance**. The possibility of using magnetic technologies that exclude contact of a vehicle with a road structure, for freight transportation is investigated. The authors consider the main structural elements, functions and possible options of the magnetic levitation transport system of freight transport. The **practical value** of the work is that the use of magnetic levitation container platforms will significantly increase the intensity and speed of the conveyor sending of each container with a decrease in energy consumption, which will significantly affect the improvement of cargo logistics. The **main results** of the work: the conceptual bases of construction of unmanned magnetic levitation vehicles and the main systems of their infrastructure are formulated, it is shown that the implementation of the function of drone for the vehicle is possible only if permanent levitation in all sections of the freight transportation will be provided.

Keywords: freight transportation, speed of movement, magnetic levitation system, unmanned technologies, container platform.

Mykola Dmytrychenko¹, Ivan Kulbovskiy², Viktor Tkachenko³, Halyna Holub^{4*}

¹Department of production, repair and materials science, National Transport University, M.Omelianovycha Pavlenka str., 1, Kyiv, 01010, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4223-1838>

²Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5329-3842>

³Department of electromechanics and railway rolling stock, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

⁴Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

***Corresponding author : golub_gm@suite.duit.edu.ua**

METROLOGICAL ASPECTS OF ENSURING MEASUREMENTS IN RAILWAY ROLLING STOCK PROJECTS

The problems of obtaining reliable information in online mode about the technical condition of rolling stock are considered. It was determined that obtaining such information is possible thanks to the use of a system for monitoring the parameters of the condition of the rolling stock using technical means that carry out measurements based on metrological support.

It is known that one of the main tasks of railway transport is the safety of traffic, which can be ensured by using a parameter monitoring system to maintain and restore the efficiency, reliability and reduce operational costs of rolling stock.

The paper presents the metrological aspects of providing measurements of rolling stock parameters by the statistical method of calculating verification intervals, which allows to determine control errors based on the available initial data in the form of specified error intervals of measuring devices.

A detailed description of the method and, accordingly, the results of using the method to determine the dependence of the average risk of verification and the dependence of the ratio of the value of the optimal control tolerance on the estimation of the error of the measuring device being verified to the limit of its permissible error on the ratio of losses due to false and undetected failures are presented, in a graphical form.

Keywords: *metrological support, system, monitoring, rolling stock, method, means of measurement.*

Introduction. One of the main tasks of railway transport is ensuring the safety of train traffic, which is faced by all divisions of railway transport. Improving the safety of train traffic and preventing accidents is possible through the use of measures to diagnose and control parameters of the technical conditions of both individual parts of the rolling stock and individual parts. To ensure the implementation of these measures in order to increase these measures, it is necessary to perform an analysis of technical capabilities and metrological characteristics.

Ensuring the reliability and safety of the means of railway transport, the economic efficiency of their use are important tasks, both at the stage of manufacture and in the conditions of operation. A large place in the production activity of railway transport is occupied by work related to the maintenance and restoration of the working capacity of rolling stock, which are accompanied by

metrological support of parameter measurements. Thanks to the use of monitoring systems with the use of technical means and information-measuring systems, it is possible to ensure the process of measuring the parameters of the components of the rolling stock with their further processing to obtain results regarding taking further actions to ensure the trouble-free operation of the rolling stock [1].

In GOST 16263-70, at one time, an almost similar definition of measurement was regulated, namely as «finding the value of a physical quantity experimentally with the help of special technical means».

Organized multiple measurement, in our study, is used only as the basis of the concept of "monitoring". The measurement is carried out to compare the measured value with a measure that stores and reproduces a certain physical value of the given value.

Analysis of recent research and problem statement. The peculiarity of the monitoring measurement is that it requires not one measurement, but a certain set of measurements organized in a certain way. This makes it possible not only to obtain the value of the value of the monitoring indicator, but to conduct a certain observation of it. Registration of monitoring measurement results is particularly important for their ongoing use in on-line mode and often, in addition, also in real time. But, it is also important for retrospective analysis and forecasting [2-4]. Therefore, another feature of monitoring measurement is the mandatory storage of received and registered monitoring information for a given time. For purposeful and convenient use of the results of monitoring measurement, it is necessary to organize, in accordance with the purpose of the measurement, meaningful storage of the received information in a certain way - in the form of organized files, databases and knowledge bases.

The next, no less important, feature of the monitoring measurement is the presence in the monitoring system, along with the measurement subsystem, which allows direct measurement of the value, as well as the computing or analysis subsystem, which provides a large volume of indirect measurements, which allows not only to organize observations, but also to assess the state of monitoring object, which allows solving a number of monitoring tasks: control, diagnosis and others.

The purpose and tasks of the study. The purpose of the study is to improve the system of measuring the parameters of the rolling stock of railway transport by using the monitoring system in order to obtain reliable information about the technical condition of the rolling stock, ensuring the reliability of operation and the safety of transportation.

Research objectives: 1. To analyze the task of obtaining information on measurement parameters of the technical condition of rolling stock using the monitoring system. 2. Investigate metrological support of means of measuring the parameters of the technical condition of rolling stock. 3. To propose a method of metrological provision of measuring devices, which are a component of the monitoring system, with the help of which it is possible to reduce the interverification interval. 4. To present the results of the application of the method of metrological support for measuring devices..

Research materials and methods. The introduction of maintenance and repair of rolling stock, taking into account its actual technical condition, should be based on comprehensive and reliable information about the parameters of rolling stock equipment. The most effective way to obtain it is the use of a monitoring system using information measuring systems, microprocessor technology, personal computers and automated workplaces, which will necessarily lead to improved reliability indicators and lower operating costs.

According to its structure and functions, the process of monitoring rolling stock units can be conditionally divided into [5]: external, which is associated with telecommunication means of transmitting on-board data; internal (board).

Internal monitoring is provided by systems of collection, processing and application of on-board information to ensure effective management of rolling stock, without further use in logistics systems. External monitoring is the process of remote monitoring of the parameters and condition of the rolling stock, its direction of movement, speed and location, absence of emergency situations, etc. Internal monitoring is developing in several directions in a decentralized manner, gradually combining into a

single on-board computer system. The use of monitoring systems makes it possible to move from preventive periodic diagnostics to constant control and analysis of the state of mechanisms and nodes, which, thanks to the timely elimination of malfunctions, allows you to save a lot of money, reduce the time and cost of repairs.

When developing (designing) a monitoring system, it is necessary to solve the problem of establishing inter-verification intervals for measuring devices [6-8], which are part of the system.

Let's consider the statistical method of calculating inter-verification intervals, which allows to determine control errors of the first and second kind based on the initial data available to the system developer in the form of specified error intervals of measuring devices [9, 18].

We assume that the error of a collection of the same type of measuring devices is a random function of time, and the errors are its realizations. Therefore, the verification of measurement tools from the point of view of statistical decision theory can be considered as testing a complex hypothesis against a complex alternative [10]. According to this approach, the quality of verification is characterized by an average risk, the expression for which, in the absence of losses with correct decisions, has the form:

$$R = C_1 P_{fr} + C_2 P_{uf}, \quad (1)$$

where P_{fr} and P_{uf} according to the probability of false and undetected failure; C_1 and C_2 – respectively, losses from erroneous and undetected failures.

Erroneous decisions made during verification are mainly due to two reasons: firstly, the final accuracy of the sample measuring devices and, secondly, the error of those recognized as suitable for use exceeding the permissible limit in the interverification period of operation. The error caused by the first cause can be called an instrumental error, and the second - a forecast error.

Next, we will determine the probabilities [11] of wrong decisions P_{fr} and P_{uf} . We denote by G the event, which consists in the fact that the error of the measurement means during the inter-verification interval is within the permissible limits, by F - the event, which consists in the fact that at the moment of time the error estimate, as representing some function of the errors, is believed, and of the standard measuring instrument is within the control tolerance .

Then the probabilities of false and undetected failure:

$$P_{ne} = P\{\bar{G}\bar{F}\} = P\{G\} - P\{GF\}, \quad (2)$$

$$P_{ng} = P\{\bar{G}F\} = P\{F\} - P\{GF\}. \quad (3)$$

Expressions for probabilities included in the right-hand side of Fq. (2) and Fq. (3) have the form:

$$P\{G\} = \int_{-\Delta}^{\Delta} W(T/\eta_0)\psi(\eta_0)d\eta_0, \quad (4)$$

$$P\{F\} = \int_{-\Delta}^{\Delta} \psi(\hat{\eta})d\hat{\eta}, \quad (5)$$

$$P\{GF\} = \int_{-\Delta}^{\Delta} W(T/\eta_0)\psi(\eta_0)d\eta_0 \left[\int_{-\Delta_k}^{\Delta_k} \psi(\hat{\eta}/\eta_0)d\hat{\eta} \right] d\eta_0. \quad (6)$$

where $\psi(\eta_0)$ – the density of the probability of error believed at the time of verification; $\psi(\hat{\eta})$ – the probability density of the estimation of the error of the measuring means being verified at the time of verification; $\psi(\hat{\eta}/\eta_0)$ – conditional probability density of the error estimate at a fixed error, which are believed at the time of verification.

It is known [12, 13] that the best verification quality, i.e. the minimum average risk, can be achieved if the following solution rule is used: measuring means are considered suitable for use if the probability that the error of the verified measuring means will not exceed the permissible limits for time t , provided that the value of the error estimate obtained during verification is equal:

$$P\left\{\eta(t) \in [-\Delta, \Delta], t \in [0, T] / \hat{\eta}\right\} \geq \frac{C_2}{C_1 + C_2}. \quad (7)$$

Using the Bayes formula and using Fq. (6), we get:

$$P\left\{\eta(t) \in [-\Delta, \Delta], t \in [0, T] / \hat{\eta}\right\} = \int_{-\Delta}^{\Delta} W(T / \eta_0) \psi_1(\eta_0 / \hat{\eta}) d\eta_0, \quad (8)$$

where $\psi(\eta_0/\hat{\eta})$ posterior probability density of the error probability of the measuring means to be believed at a fixed estimate at the time of verification.

The method of finding the probability P , by Fq. (6) – (8), with arbitrary probabilistic characteristics of a random function leads to very complex and therefore unacceptable calculations in engineering practice. However, the problem is significantly simplified if the apparatus of the theory of Markov processes is applied to it. The problem [14] of determining the probability is solved for a normal stationary random function that has a correlation function and a mathematical expectation. With constant coefficients, the expression obtained in it has the form:

$$W(T / \eta_0) = \left\{ 2^{\Delta} \sum_{j=1}^{\infty} a_j e^{-\lambda_j \alpha T} F_1\left(-\lambda_j / 2; 1/2; \eta_0^2 / 2\sigma^2\right) \right\} \text{ if } |\eta_0| \leq 0 \text{ if } |\eta_0| > 0 \quad (9)$$

where $2^{\Delta} \sum_{j=1}^{\infty} a_j e^{-\lambda_j \alpha T} F_1\left(-\lambda_j / 2; 1/2; \eta_0^2 / 2\sigma^2\right)$ degenerate hypergeometric function. Fq. (9)

converges quickly and for practical calculations it is sufficient to use one or two of its terms.

Fq. (7) boils down to establishing the optimal control [15-17] (warning) tolerance for the estimation of the error that are believed, then the value is defined as the root of the equation:

$$\int_{-\Delta}^{\Delta} W(T / \eta_0) \psi_1(\eta_0 / \Delta_{KO}) d\eta_0 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}. \quad (10)$$

Next, the problem of finding such a maximum confidence interval for a measuring instrument is solved, for which the average risk minimized according to rule by Fq. (7) would not exceed the permissible value, that is, it is necessary to determine T_0 :

$$T_0 = \max T \text{ if } \min_{\Delta_K} R(\Delta_K, T) \leq R_D. \quad (11)$$

The initial data for the calculation are the values themselves, which are the probabilistic characteristics of the means to be believed. Since the analysis of the analysis of the function shows that it is increasing. From this it follows that the task is reduced to solving a system of transcendental equations, one of which is Eq. (10), and the second is the following equation:

$$C_1 P_{fr}(T_0, \Delta_{KO}) + C_2 P_{uf}(T_0, \Delta_{KO}) = R_D. \quad (12)$$

For the convenience of calculations, we introduce dimensionless quantities:

$$\theta = \alpha T_0, \quad r = \frac{\Delta}{\sigma}; \quad z = \frac{\sigma_1}{\sigma}, \quad k = \frac{\Delta_{KO}}{\Delta}, \quad q = \frac{C_1}{C_2}.$$

Then:

$$R_Y = \begin{cases} \frac{R_D}{C_2} = qP_{rf} + P_{uf} & \text{if } q \leq 1, \\ \frac{R_D}{C_1} = P_{rf} + \frac{P_{uf}}{q} & \text{if } q > 1, \end{cases} \quad (13)$$

The value can be called the specific average risk. Then, under the accepted assumptions, the system of transcendental Eq. (10) - (11) takes the form:

$$\begin{cases} r \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(1 + \frac{1}{z^2}\right) \int_{-r}^r W(\theta, x) e^{-\frac{[x(1+z^2)-rk]^2}{2z^2(1+z^2)}} dx - \frac{1}{1+q} = 0, \\ r \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-r}^r W(\theta, x) e^{-\frac{x^2}{2}} dx + 2\Phi_0\left(\frac{rk}{\sqrt{1+z^2}}\right) - \\ - 2r \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-r}^r W(\theta, x) e^{-\frac{x^2}{2}} \left[\Phi_0\left(\frac{rk+x}{z}\right) + \Phi_0\left(\frac{rk-x}{z}\right)\right] dx - R_Y = 0 \end{cases} \quad (14)$$

where $-2\Phi_0\left(\frac{rk}{\sqrt{1+z^2}}\right)$ normalized Laplace function.

Eq. (14) meets the requirements of most metrological standards in the range of specified values. As a result of the calculations, graphs were constructed (fig. 1 and fig. 2), which allow to determine the dependence of the average verification risk on the ratio of losses due to erroneous and undetected failures for different values of the maximum interverification interval and the dependence of the ratio of the value of the optimal control tolerance on the error estimate based on the specified values of the instrument being verified, to the limit of its permissible error from the ratio of losses under erroneous and undetected failure for different values of the maximum interverification interval.

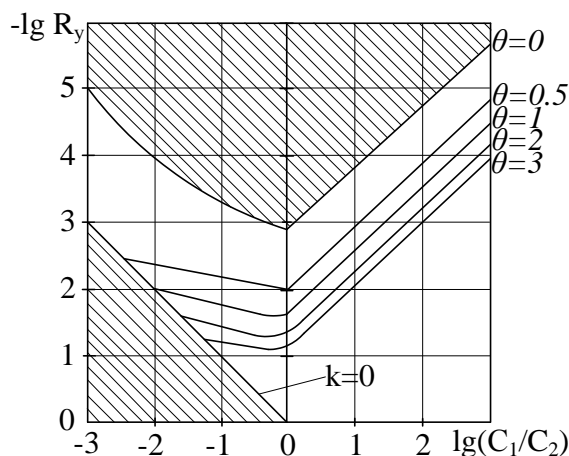


Fig. 1. Dependence of the average verification risk on the ratio of losses due to false and undetected failures for different values of the maximum interverification interval

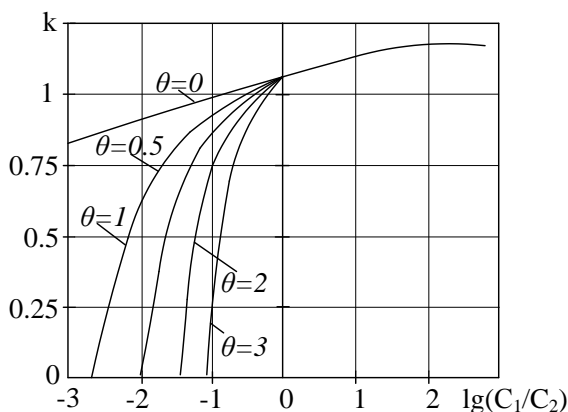


Fig. 2. Dependence of the ratio of the value of the optimal control tolerance for the estimation of the error of the measuring instrument being verified to the limit of its permissible error on the ratio of losses due to erroneous and undetected failures for different values of the maximum interverification interval

In the shaded areas in fig. 1 solution of system Eq. (14) is missing. The lack of a solution in the area located above the curve is due to the finite accuracy of the sample means, and the curve itself corresponds to the minimum possible average risk. The shaded area in the lower left corner is bounded by the curve. This means that when entering this area, the a priori risk corresponding to the recognition of the unsuitability of measuring tools without verification will be minimal:

$$R_{\min} = R_{apr} = C_1 \int_{-\Delta}^{\Delta} \varphi(\eta_0) d\eta_0 \quad (15)$$

The statistical method for estimating the inter-verification intervals of measuring instruments considered in the work is the basis for establishing and optimizing [19] the inter-verification interval for the monitoring system of rolling stock parameters of railway transport.

Conclusion. The problem of obtaining information on measuring the technical condition of rolling stock was analyzed. It has been studied that obtaining information is provided thanks to the means of measurement, which are a component of the rolling stock parameters monitoring system. Since it is necessary to receive information in real time, metrological support of measuring instruments is necessary. To improve the system, we used a static method of calculating inter-verification intervals, which allows, based on the available initial data in the form of specified error intervals of measuring instruments, to determine control errors, which will allow to reduce the inter-verification interval.

REFERENCES

1. Goolak, S., Tkachenko, V., Sapronova, S., Lukoševičius, V., Keršys, R., Makaras, R., Keršys, A., & Liubarskyi, B. (2022). Synthesis of the Current Controller of the Vector Control System for Asynchronous Traction Drive of Electric Locomotives, *Energies*, 15(7), 02374.
2. Stognij, B.S., & Sope, I.M.F. (2013). Osnovy monitorynhu v elektroenerhetytsi. Pro ponyattya monitorynhu [Basics of monitoring in electric power. About the concept of monitoring]. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics*, 1, 62-69 [in Ukrainian].
3. Bobalo, Yu.Ya., Danyk, Yu.H., & Komarova, L.O. (2015). Monitoring of objects in conditions of a priori uncertainty of information sources [*Monitorynh ob'ektiv v umovakh apriornoj nevyznachenosti dzherel informatsii*]. Lviv [in Ukrainian].
4. Haidenko, O.S., & Holub, H.M. (2017). Kharakterni osoblyvosti modelyuvannya systemy ta protsesiv tyahovoho elektropostachannya zaliznytsi yak ob'yekta monitorynhu ta keruvannya [Characteristic features of modeling the system and processes of railway traction power supply as an object of monitoring and control], *Modelyuvannya ta informatsiyini tekhnolohiyi - Modeling and information technologies*, 79, 42-48 [in Ukrainian].
5. Volkov, V.P., Hrytsuk, I.V., Komov, A.P., & Volkov, Yu.V. (2014). Osoblyvosti monitorynhu i vyznachennya statusu nespravnostey transportnoho zasobu u skladi bortovoho informatsiyno-diahnostychnoho kompleksu [Features of monitoring and determining the status of vehicle malfunctions as part of the on-board information and diagnostic complex]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu - Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu*, 30, 51-62.
6. Donchenko, A. V. (2016). Analiz pytan' enerhozberezhennya ta enerhoefektyvnosti pid chas ekspluatatsiyi rukhomoho skladu metropolitenu [Analysis of issues of energy saving and energy efficiency during the operation of the rolling stock of the metro]. *Nauka ta prohres transportu - Nauka ta prohres transportu*, 3(63), 107-118.
7. Blokhin, L.M., & Burichenko, M.Yu. (2003). *Statychna dynamiky system upravlinnya [Static dynamics of control systems]*. Kyiv: National Aviation University [in Ukrainian].
8. Levkovets, P.R., Gedz, Y.M., & Kanarchuk, O.V. (2002). *Systemna efektyvnist' na transporti: Metody, modeli i statehiyi [Static dynamics of control systems: methods, models and strategies]*. Kyiv: National transport University [in Ukrainian].
9. Yuehong, B.I., Chen, L., Sun, F. (2010). Energetic efficiency optimization for irreversible heat pump working on Brayton cycle. *Pramana journal of physics*, 74 (3), 351-363.
10. Kulbovskiy, I., Holub, H., Melenchuk, V., & Chmyr, V. (2021). Development of a system model of technical operation management intranport infrastructure projects. *Transport systems and technologies*, 37, 196-203. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-19>.
11. Kostin, N. A., & Nikitenko, A. V. (2014). Avtonomnost' rekuperativnogo tormozheniya – osnova nadezhnoy energoeffektivnoy rekuperatsii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka [Autonomy of regenerative braking is the basis for reliable energy-efficient recuperation on DC electric rolling stock]. *Zaliznychnyy transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 3, 15-23 [in Russian].
12. Ryabov E.S. (2015). Opreddeniye parametrov nakopitelya energii dlya elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom v rezhime ogranicheniya toka tyagovoy seti [Determining the parameters of the energy storage device for electric rolling stock with an asynchronous traction drive in the traction network current limiting mode]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyi politekhnichnyy instytut» - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, 6 (1115), 132-137 [in Russian].
13. Hrytsuk, I.V., Panchenko, S.V., Kagramanyan, A.O., & Falendysh, A.P. (2015). Osoblyvosti informatsiynoho obminu v protsesi dystantsiynoho monitorynhu tekhnichnoho stanu i upravlinnya pratsezdatsnyu enerhustanovok zaliznychnoho transportu z dvyhunamy vnutrishn'oho z'horannya [Peculiarities of information exchange in the process of remote monitoring of the technical condition and performance management of power plants of railway transport with internal combustion engines]. *Zaliznychnyy transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 5, 41-45 [in Ukrainian].
14. Holub, H., Kulbovskiy, I. Dudnyk, Yu., O. Melnychenko, M. Tkachuk, Val., & Kharuta, Iu. Shcherbyna. Research of the Model of the Life Cycle of Investment Projects of Subway Rolling Stock. *2021. 25th international scientific conference TRANSPORT MEANS 2021*, 3, 984.
15. Melnychenko, O.I., Kulbovskiy, I.I., Holub, H., & Kharuta, V. (2020) Aspekty metrolohichnoho zabezpechennya tekhnolohichnykh protsesiv informatsiyno-vymiryuval'nykh system v proektakh infrastruktury transportu [Aspects of metrological support of technological processes of information and measuring systems in transport infrastructure projects].

Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu: Tekhnichni nauky - Bulletin of the National Transport University: Technical Sciences, 1(46), 226-235 [in Ukrainian].

16. Arefieva E.V., & Mirgorodskaya A.P. (2012). Analiz tendentsiy ispol'zovaniya resursnogo potentsiala predpriyatiy [Analysis of trends in the use of the resource potential of enterprises]. *Ekonomika i upravleniye - Economics and Management*, 2, 8-10 [in Russian]

17. Shcherbak, A. (2013). Informatsiyne zabezpechennya investytsiynoyi diyal'nosti na pidpryyemstvi [Information support of investment activity at the enterprise]. *Aktual'ni problemy ekonomiky - Current economic problems*, 3, 103-107 [in Ukrainian].

18. Gorobchenko, O., Nevedrov, O., Nezlina, O., & Tkachenko, V. (2021). Rozrobka -metodu klasteryzatsiyi poyiznykh sytuatsiy [Development -method of clustering train situations]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 2021, 37, 187-195 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-18>

19. Gorobchenko, O. (2021). Teoretychni osnovy otsinky informatyvnosti oznak poyiznoyi sytuatsiyi dlya roboty intelektual'nykh system keruvannya lokomotyvom [Theoretical bases of estimation of informativeness of signs of a train situation for work of intelligent locomotive control systems]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 38, 223-231 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-220-21>

Микола Дмитриченко¹, Іван Кульбовський², Віктор Ткаченко³, Галина Голуб^{4*}

¹Кафедра виробництва, ремонту та матеріалознавства, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна,

²Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

³Кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

⁴Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ В ПРОЄКТАХ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Розглянуто проблеми отримання достовірної інформації в on-line режимі про технічний стан рухомого складу. Визначено, що отримання такої інформації можливо завдяки використанню системи моніторингу параметрів стану рухомого складу з використання технічних засобів, які проводять вимірювання на основі метрологічного забезпечення.

Відомо, що однією з головних задач залізничного транспорту є безпека руху, що можливо забезпечити, використовуючи систему моніторингу параметрів для підтримання і відновлення працездатності, надійності та зменшення експлуатаційних витрат рухомого складу.

В роботі наведені метрологічні аспекти забезпечення вимірювань параметрів рухомого складу статистичним методом розрахунку міжспівірочних інтервалів, що дозволяє за наявними вихідними даними у вигляді заданих інтервалів помилок вимірювальних засобів визначити помилки контролю.

Представлено детальний опис методу та відповідно результати використання методу для визначення залежності середнього ризику повірки та залежності співвідношення значення оптимального контрольованого допуску на оцінку похибки засобу вимірювання, що повіряється, до межі його допустимої похибки від співвідношення витрат за помилкової та невиявленої відмов, в графічному вигляді.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, система, моніторинг, рухомий склад, метод, засоби вимірювання.

Альона Ловська¹, Василь Равлюк²

¹Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

²Доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

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

ВИЯВЛЕННЯ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ КОЛІС ВАГОНІВ, ОБЛАДНАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИМИ КОЛОДКАМИ

У роботі висвітлено результати аналізу виникнення поверхневих дефектів і несправностей коліс вантажних вагонів, що обумовлені фрикційною взаємодією з композиційними гальмовими колодками. Встановлено, що основний вплив на термомеханічну поведінку коліс вантажних вагонів спричиняють теплові навантаження, що мають місце під час гальмувань. У випадках термічних перевантажень, які виникають в основному в результаті тривалого гальмування, відбувається генерація напружень і деформацій, наслідками яких є поява високотемпературних місцевих дефектів на поверхні кочення коліс вантажних вагонів. Ці дефекти негативно впливають на безпеку руху поїздів і суттєво збільшують експлуатаційні витрати на залізничному транспорті.

Для визначення термонапруженого стану колеса вантажного вагона під час гальмування проведено його розрахунок. В якості розрахункового застосований метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Визначено допустимий з точки зору забезпечення міцності колеса температурний вплив на нього під час гальмування.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо керування температурним впливом на колесо, а також підвищенню безпеки руху поїздів і суттєвому зменшенню експлуатаційних витрат на залізничному транспорті.

Ключові слова: вантажний вагон, гальмова колодка, дефекти колеса, міцність колеса, термонапружений стан.

Вступ. Потреба в зниженні експлуатаційних витрат в умовах конкуренції на ринку транспортних послуг висуває вимоги стосовно до організації системи технічного обслуговування та ремонту вантажного рухомого складу, виходячи з фактичного стану його працюючих вузлів [1, 2]. Тому для оцінки технічного стану вузлів рухомого складу потрібен постійний моніторинг, особливо за тими, які є відповідальними за безпеку руху поїздів. Одним з таких вузлів вантажних вагонів є триботехнічна пара «гальмова колодка – колесо».

Зниження зносу в системі «гальмова колодка – колесо» значно зменшує експлуатаційні витрати і є одним з пріоритетних напрямків підвищення ефективності роботи залізничного транспорту, в тому числі забезпечення екологічності перевезень, а також безпеки руху поїздів. Таким чином, проблема взаємодії в системі «гальмова колодка – колесо» є на даний час актуальною та важливою.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. У проявах функціонування системи «гальмова колодка – колесо» відбулися значні зміни, які пов'язані з інтенсифікацією вантажообігу на території України, що почалося в 90-ті рр. минулого століття і тривають по нині. Зростання швидкості руху вантажних і пасажирських поїздів [3], збільшення осьового навантаження вагона (до 25 кН і вище) призвело до потреби зростання необхідної потужності гальмування і підвищення температури в зоні контакту пари тертя «гальмова колодка – колесо», що в цілому негативно вплинуло на поверхні кочення коліс рухомого складу, збільшивши частоту появи дефектів, що утворюються за рахунок високотемпературних впливів [4].

Поряд з цим зросла інтенсивність зносу вказаної системи. Тому в даний час зміна умов її експлуатації вимагає розроблення і застосування інноваційних фрикційних матеріалів з урахуванням роботи системи – «гальмова колодка – колесо – рейка».

На залізничному рухомому складі використовуються колеса, які поділяються: за типами коліс – суцільнокатані колеса й бандажні; за способом виготовлення – суцільнокатані та литі; залежно від використання гальмового обладнання – колісна пара з гальмовим диском (або декількома дисками); жорстко закріплені на осі; типова колісна пара, призначена для застосування у візках з натисненням гальмових колодок на поверхню кочення колеса; колісні пари з розташованими на бокових поверхнях колеса гальмовими дисками [5].

У роботі [6] автор наводить відомості, які стверджують, що під час перекочування коліс по рейках вони сприймають великі контактні й ударні навантаження, тертя від зіткнення з рейками та гальмовими колодками. Тому, під час контакту колеса з рейкою по плямі контакту малої площі, на колесо передаються значні статичні й динамічні навантаження. В результаті в зонах контакту коліс з рейками виникають контактні напруження (1-1,5 ГПа) [7-9]. У процесі гальмування між колесами і колодками виникають сили тертя, які викликають нагрівання в зоні триботехнічних пар, що сприяє утворенню на поверхнях кочення коліс різного виду дефектів, зокрема, вищербин, термотріщин, раковин тощо [4].

У праці [10] зазначено, що при виникненні на поверхні кочення колеса дефекту, в тому числі термомеханічного походження, величина ударних навантажень збільшується залежно від швидкості руху та розміру дефекту. Розглянуто проблему виникнення дефектів односторонніх повзунів, що виникають в основному при відчепленні та розпуску вагонів з сортувальних гірок за використання башмачного гальмування. Тепло, що виділяється під час руху в зоні контакту «башмак – рейка», дуже сильно нагріває полоз башмака, а це в свою чергу збільшує теплове навантаження на контакт «колесо - полоз» і дуже часто призводить до зміни коефіцієнта тертя.

У роботі [11] розглянуто деякі причини появи дефектів поверхні кочення коліс вагонів, які виникають в результаті незлагодженої роботи гальмової системи вагона. Однак, автором не наводяться відповідні розрахунки, які б могли підтвердити його припущення. У публікації [12] наведено можливі способи для підвищення міцності поверхні кочення колеса і попередження утворень вищербин, наприклад, легування сталі й збільшення за рахунок різних термічних обробок обода – границі витривалості й часового опору матеріалу. Однак визначенню термонапруженого стану колеса з урахуванням запропонованих рішень в роботі не приділялося уваги.

У проаналізованих закордонних працях виконано безліч досліджень тягових характеристик поїздів щодо можливостей прогнозування теплового перевантаження коліс, особливо під час тривалого гальмування на дільницях де колія має значні ухили. На основі таких досліджень [13-16], Європейський залізничний науково-дослідний інститут (Нідерланди) запропонував процедуру оцінки, кінцевою метою якої є прийняття рішення щодо вживання спеціальних заходів для запобігання виникненню теплового перегріву поверхонь кочення коліс. Це передбачає застосування регулювання швидкості руху поїзда за рахунок виконання ступеневого гальмування або інших заходів, пов'язаних зі зміною режимів гальмування. Однак, запропонована процедура, яка передбачає розрахунок коефіцієнта для конкретної оцінки, не забезпечує ефективного та надійного використання його у всіх потенційних випадках, особливо

у тих, що стосуються затяжного гальмування, яке відбувається на крутих спусках, що мають значний ухил колії.

У праці [17] наведено результати термічного аналізу щодо досліджень гальмових систем залізничного рухомого складу з колодковими блоковими гальмами. Виконувалося аналітичне та чисельне моделювання теплових процесів, що відбуваються у колесі під час тривалого ступеневого гальмування, яке дає змогу підтримувати постійну швидкість руху поїзда на залізницях зі значними ухилами. Однак, у роботі виконано дослідження тільки для локомотивів з колодковими блоковими гальмами.

Так само результати багатьох досліджень, що приведені в роботах [13, 15, 18-20], підтвердили домінуючий вплив теплових навантажень над механічними, а також зареєстровані залишкові напруження, які викликані високими тепловими навантаженнями в суцільнометалевому колесі з блоковим гальмом [21, 22]. Тому важливо з високою точністю визначити температурне поле гальмової системи, а також підкреслити, що високі теплові навантаження, інакше кажучи, перевантаження, колеса дуже часто виникають в результаті тривалого гальмування або виникнення небажаного явища «юза».

Із виконаного огляду літературних джерел необхідно зазначити, що проблемам, пов'язаних з утворенням дефектів від високих температур на поверхнях кочення коліс від їх взаємодії з композиційними гальмовими колодками у процесі експлуатації вантажних вагонів, досі належної уваги не приділялося. Це зумовлює необхідність проведення досліджень в зазначеному напрямі.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є висвітлення результатів дослідження причин утворення поверхневих дефектів коліс від їх взаємодії з композиційними гальмовими колодками.

Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- дослідити причини виникнення поверхневих дефектів коліс вантажних вагонів;
- систематизувати найбільш небезпечні дефекти коліс вантажних вагонів при взаємодії з композиційними гальмовими колодками;
- провести визначення термонапруженого стану колеса при взаємодії з композиційною колодкою під час гальмування.

Матеріали та методи дослідження. Слід зазначити, що зараз у вантажних вагонах застосовуються гальмові колодки з полімерних композитів, які на відміну від чавунних мають значну економічну ефективність. Необхідно звернути увагу і на те, що під час застосування чавунних колодок на нагрівання колеса припадає близько 70 % потужності гальмування, а за використання композиційних – 95÷98 % [12, 23]. Проте, незважаючи на меншу вартість виготовлення, чавунні колодки мають ряд суттєвих недоліків. Наприклад, при застосуванні чавунних колодок у вантажному рухомому складі, які на жаль є недовговічними й мають незначний ресурс, який становить 30-50 тис. км. Так само для поїздів, які рухаються до швидкості 120 км/год суттєво знижується коефіцієнт тертя, що негативно впливає на гальмову ефективність поїздів [24 - 26]. Тому нинішнє застосування композиційних гальмових колодок, які є більш довговічні (до 160 тис. км) і мають майже сталий коефіцієнт тертя у великому діапазоні швидкостей є значною перевагою перед чавунними. Також в результаті застосування композиційних гальмових колодок відбувається збільшення швидкостей руху поїздів до 140-160 км/год, що призводить до більш ніж двократного збільшення потужності гальмування поїздів через умови нормальної роботи елементів ГВП [27].

Однак під час застосування композиційних гальмових колодок значно зростає кількість відмов коліс у процесі експлуатації вантажних вагонів. Основною причиною виникнення таких відмов є те, що композиційні гальмові колодки мають низьку теплопровідність, а це спричиняє різні поверхневі пошкодження поверхонь кочення коліс (вищербини різного виду, навари), які мають термомеханічний характер походження (рис. 1). Так само, ще однією негативною

особливістю цих колодок є те, що під дією високих температур вони здатні вкраплювати метал колеса у робочу поверхню (тіло) композиційної колодки.

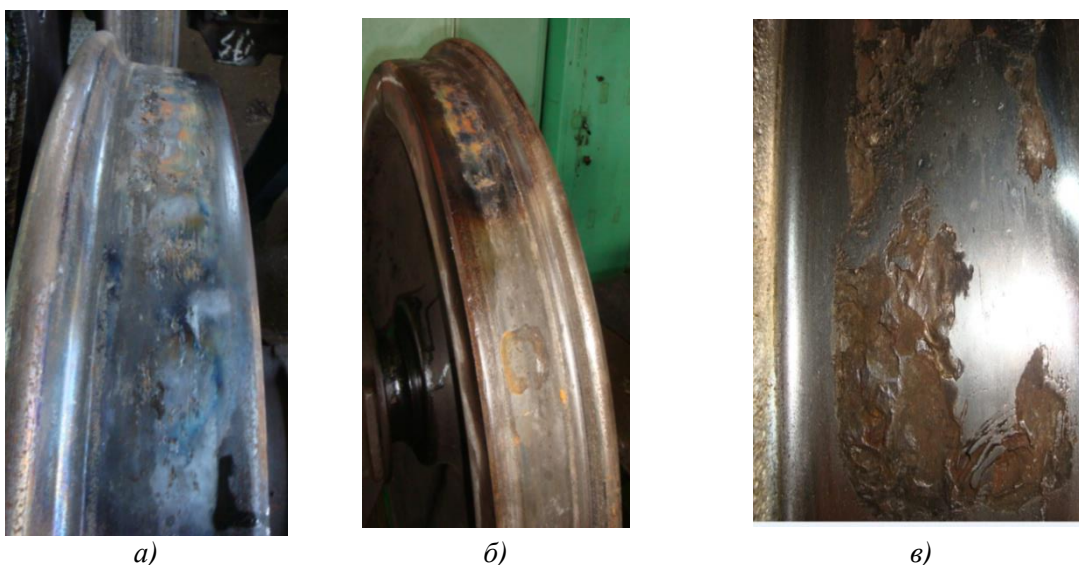


Рис. 1. Дефекти коліс вантажних вагонів, що утворилися від композиційних гальмових колодок у результаті гальмувань

а) сітка термічних тріщин з вищербинами; б) вищербини за термічними тріщинами; в) вищербини від втоми

Зараз зазвичай всі вантажні вагони обладнуються подібними за принципом дії колодковим гальмом. Основна відмінність таких гальмових систем може бути тільки в кількості гальмових циліндрів, які встановлюються на вагонах, а також в симетричності розташування елементів механічної частини гальма.

При існуючих різноманітних конструкціях гальмових систем вагонів їх об'єднує сила тертя, яка виникає під час натиснення гальмової колодки до поверхні кочення колеса. Гальмова сила, яка виникає відповідно на одному колесі вагона і притискає до нього колодки, визначається за формулою [24]:

$$B_{\Gamma} = F_{mp} - F_i, \quad (1)$$

де F_{mp} – сила тертя, яка виникає між гальмовою колодкою і колесом вагона; F_i – сила інерції, що виникає при сповільненні руху колеса.

Сила тертя залежить від зусилля натискання колодки на колесо і трибологічних характеристик контактуючих матеріалів (коефіцієнта тертя):

$$F_{mp} = K\varphi_k, \quad (2)$$

де φ_k – дійсний коефіцієнт тертя гальмової колодки.

Значенням зусилля K , яке передається через вертикальний двоплечий важіль та спонукає притиснення гальмової колодки до колеса, можна визначити за такою залежністю [24]:

$$K = \left(250\pi d_u^2 P_u \eta_u - F_1 \right) \frac{a}{a+b} \eta, \quad (3)$$

де $d_{ц}$ – діаметр гальмового циліндра; $P_{ц}$ – тиск повітря в гальмовому циліндрі; $\eta_{ц}$ – коефіцієнт корисної дії гальмового циліндра; F_1 – зусилля відпускнуї пружини; a, b – довжини плечей двоплечого важеля; η – коефіцієнт силових втрат ГВП вагона.

Аналіз даних залежностей показує, що на створення гальмової сили під час гальмування поїзда безпосередній вплив надає коефіцієнт тертя контактуючих поверхонь.

Питомий тиск, який створюється гальмовою колодкою на колесо під час гальмування, буде таким:

$$q = \frac{K \cdot 10^3}{F_k}, \quad (4)$$


де F_k – площа поверхні тертя гальмової колодки, см².



У результаті збільшення сили натиснення на композиційну гальмову колодку, буде зростати питомий тиск у вузлі триботехнічної пари «гальмова колодка – колесо». Тому в тих колодках, які мають вкраплини частинок металу буде відбуватися пошкодження поверхні кочення коліс, що негативно впливає на безпеку руху поїздів і суттєво збільшує експлуатаційні витрати.



Основними чинниками, що впливають на термін служби суцільнокатаного колеса вантажного вагона, є співвідношення твердостей колеса та рейки, а також значення сумарних внутрішніх напружень, що виникають через вплив у результаті експлуатації, як нормальних статичних, так і знакозмінних динамічних навантажень, які діють у радіальному та осьовому напрямках, також і температурних напружень, що спричинені тертям гальмових колодок об обід колеса в процесі гальмування рухомого складу.



Основні дефекти й несправності суцільнокатаних коліс, що виникають у процесі експлуатаційних вантажних вагонів наведені в таблиці 1 [25, 26].




Таблиця 1. Види поверхневих дефектів і несправностей коліс, які виникають внаслідок фрикційної взаємодії з композиційними гальмовими колодками вагонів

№	Код	Несправність	Причини виникнення	Спосіб усунення	Рисунок
1	2	3	4	5	6
1 Зноси					
1	10	Рівномірний прокат – рівномірний круговий граничний знос колеса по колу кочення	Природний знос металу, що утворюється за рахунок деформації та стирання під час фрикційній взаємодії колеса з рейкою та з гальмовою колодкою	Якщо величина прокату більше допустимих значень, потрібно виконати відновлення профілю поверхні кочення на колісотокарному верстаті	

№	Код	Несправність	Причини виникнення	Спосіб усунення	Рисунок
2	11	Нерівномірний прокат – нерівномірний знос колеса по колу кочення, що має форму, відмінну від круглої	Неоднорідність властивостей металу на поверхні кочення колеса, до якої призвели значні теплові та механічні впливи під час гальмування або розвитку поверхневих дефектів	Якщо величина прокату більше допустимих значень, потрібно виконати відновлення профілю поверхні кочення на колісотокарному верстаті	
3	13	Кільцеві виробки – нерівномірний по поверхні кочення колеса круговий знос і деформація, що спричиняють місцеві поглиблення	Утворюються на краях зони контакту поверхні кочення з гальмовою колодкою, і ця закономірність їх появи пояснюється неоднаковими термічними умовами роботи поверхневих шарів металу колеса й композиційної колодки за шириною зони контакту й впливом абразивних частинок пилу (металічних включень) на поверхню тертя по краях колодки	Виконати відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

2 Термомеханічні пошкодження					
4	20	Повзун – локальний знос поверхні кочення колеса, що характеризується утворенням плоского місця на поверхні кочення глибиною більше допустимої	Ковзання колеса по рейці, що спричиняє деформацію та місцевий знос через заклинювання колісної пари гальмовими колодками (явище «юз»), внаслідок неправильної роботи пневматичного гальмового обладнання рухомого складу. Так само повзун може виникати в результаті заклинювання гальмовим башмаком колеса, що спостерігається під час виконання маневрових робіт	Якщо глибина повзуна більше граничного значення, необхідно виконати відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	
5	21	Навар – зміщення металу на поверхні обода колеса, що характеризується утворенням зсувів металу U- подібної форми та висотою більше допустимих значень	Інтенсивна пластична деформація металу при короткочасному заклинюванні або «юзі» коліс в експлуатації	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

32	Сітка термічних тріщин в ободі – порушення суцільності металу у вигляді паралельних похилих термічних тріщин від утоми за периметром поверхні кочення колеса	Циклічне нагрівання колеса в результаті взаємодії з гальмовою колодкою під час гальмування з послідовним охолодженням	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса	
3 Руйнування у вигляді викришування металу та відколу окремих частин				
22	Вищербини – ділянки поверхні кочення, що викришилися більше допустимих розмірів або в разі наявності в них тріщин чи розшарувань, які йдуть в глиб			
22.1	– вищербини за світлими плямами, повзунах, «наварях» на поверхні кочення обода колеса – місцеве руйнування у вигляді викришування металу поверхні кочення	Викришування ділянок поверхні кочення, що утворюється в результаті загартування металу під час ковзання заклиненних колісних пар рейками	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

	22.2	– вищербини від угоми на поверхні кочення обода колеса	Вищербини за втомними тріщинами внаслідок вичерпання металом запасу пластичності та накопичення втомних пошкоджень	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	 
	22.3	– вищербини за термічними тріщинами на поверхні кочення обода колеса	Утворення термічних мікротріщин на поверхні кочення обода колеса в результаті багаторазово повторюваних нагрівань і охолоджень під час гальмування з подальшим зростанням та об'єднанням мікротріщин під дією контактних навантажень з подальшим викришуванням металу	Необхідно здійснити відновлення профілю поверхні кочення колеса на колісотокарному верстаті	

Якщо ретельно проаналізувати табл. 1, тоді можна побачити, що в результаті теплової й механічної взаємодії фрикційної пари «гальмова колодка – колесо» у процесі експлуатації вантажних вагонів виникають різного виду несправності й дефекти на поверхні кочення колісної пари, які суттєво впливають на безпеку руху поїздів.

Для аналізу несправностей та дефектів коліс вагонів, які виникають тільки в результаті фрикційної взаємодії коліс з гальмовими колодками, виконувалися виробничі дослідження на базі вагоноремонтних підприємств, що спеціалізуються на ремонті вантажних вагонів. У результаті досліджень було обстежено 12072 коліс вантажних вагонів. Під час досліджень вивчали форми ВУ-53 для виявлення відповідних несправностей та дефектів коліс вантажних

вагонів. За результатами статистичного оброблення зібраного матеріалу, побудовано гістограму розподілу несправностей і дефектів коліс у відсотковому відношенні (рис. 2).

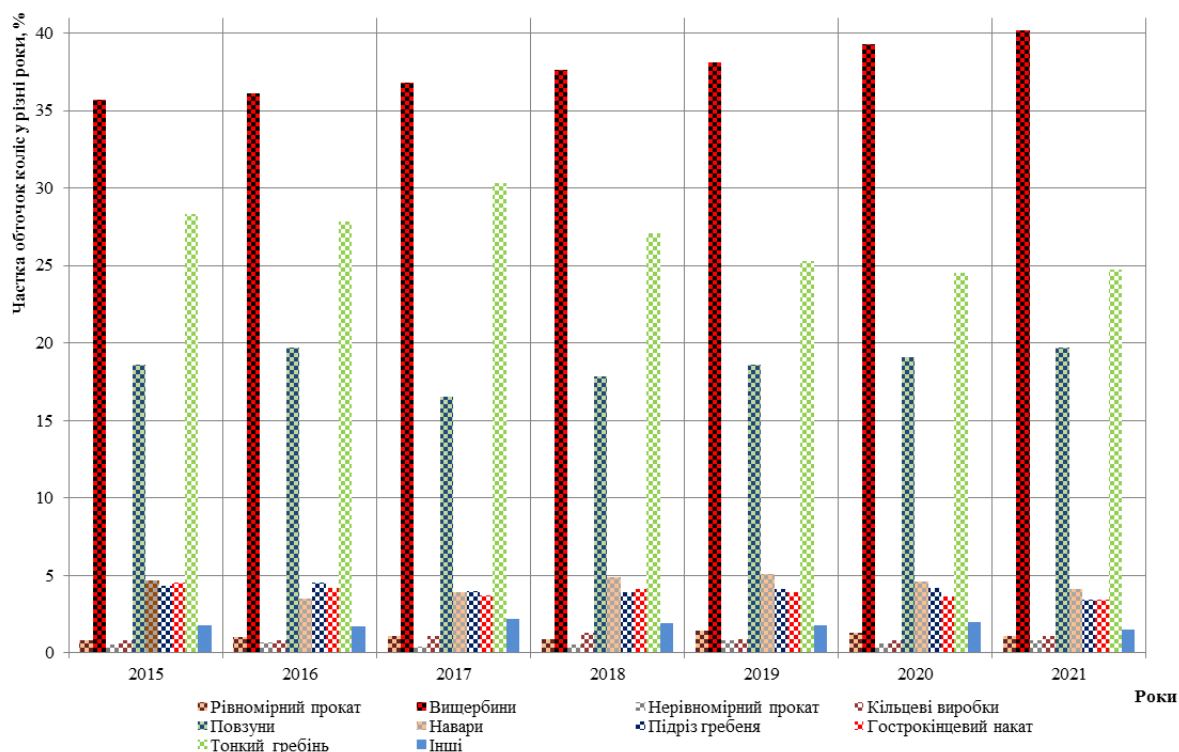


Рис. 2. Несправності та дефекти коліс вантажних вагонів, що призвели до відмов у процесі їх експлуатації

Аналіз даної гістограми про відмови коліс у процесі експлуатації за 2015–2021 рр. (рис. 2), свідчить про те, що найбільший відсоток дефектів поверхонь кочення коліс припадає на вищербини. Причому останніми роками ця величина лише збільшувалася (з 35,7 до 40,2 %). Наступну позицію займає такий вид несправності, як тонкий гребінь, який за період, що досліджувався майже знаходився в однаковому діапазоні (з 28,3 до 24,7 %). Так само на передові місця увійшли дефекти, які виникають від фрикційної взаємодії колодок з колесами – повзуни, навари. Ці дефекти також знаходилися в майже незмінному діапазоні (з 18,6 до 19,7 %) [28].

Процес утворення вищербин на поверхні кочення коліс вагонів має контактно-утомну природу походження, він являє собою появу та розходження тріщин. У зв'язку з цим розглянемо експлуатаційні чинники, які призводять до виникнення вищербин.

За способом вищербин, які виникають в процесі експлуатації вантажних вагонів їх можна класифікувати на такі види, що з'являються:

внаслідок тертя композиційної гальмової колодки об поверхню кочення колеса вантажного вагона під час ступеневого, службового та екстремного гальмування;

внаслідок тертя поверхні кочення колеса вагона об рейку під час гальмувань рухомого складу;

в результаті високих і часто повторюваних механічних навантажень в зоні контакту колеса вагона з рейкою.

До першого виду вищербин, належать процеси, що спричиняють тертя композиційних гальмових колодок об поверхню кочення коліс. Майже все тепло (приблизно 95÷98 %), що

виділяється під час ступеневого, службового та екстреного гальмувань, розсіюється самим колесом і лише 3-5 % відводиться колодкою. Під час такого фрикційного процесу можна спостерігати одночасну дію циклічно змінних навантажень і температури, що призводить до виникнення тріщин у випадку, якщо колесо має недостатню циклічну міцність під дією механічних і теплових навантажень.

До основних причин утворення *вищербин другого виду*, які пов'язані з появою дефектів від дії композиційних гальмових колодок на поверхні кочення через процеси, що відбуваються в зоні контакту системи «колесо – рейка». Коли колесо ковзає по рейці (йде «юзом») навіть з невеликою відносною швидкістю, енергія тертя, що виділяється в місці ковзання, переходить у тепло, за рахунок цього температура контактного шару значно зростає. Завдяки такому явищу поверхня кочення колеса вагона зазнає структурного перетворення, що супроводжується значним підвищенням твердості й крихкості поверхневого шару [29]. Сталь з такими механічними властивостями швидко розтріскується під впливом циклічних навантажень і відколюється від колеса [30].

До третього виду належать вищербини, формування яких залежить від виникнення й зростання втомних тріщин. За рахунок впливу великих навантажень, що багаторазово повторюються, в зоні контакту з рейкою (наприклад, різного роду ударні впливи) відбувається одночасне зародження втомних тріщин на поверхні колеса рухомого складу та в місцях підвищених напружень на глибині від 2 до 6 мм від поверхні кочення. Якщо експлуатація буде продовжуватися розвиток тріщин призводить до їхнього об'єднання, а в подальшому до появи вищербин.

В основному вищербини можуть з'явитися на місці повзунів, і як правило розташовуються симетрично на одній лінії у обох коліс. Однак, у процесі гальмування вантажного вагона або відчепу за допомогою башмака під час розформування вантажного рухомого складу на сортувальній станції можуть утворитися вищербини на одному колесі за рахунок проковзування колеса на гальмовому башмаку.

Привертає до себе увагу той факт, що частка пошкоджень і дефектів поверхонь кочення коліс – вищербинами в загальній кількості відмов з 2015 до 2021 рр. (рис. 2) дещо збільшилася й залишається стабільною протягом останніх років. Відповідно до [25] виділяють три види вищербин: 22.1, 22.2, 22.3 (табл. 1).

Необхідно пам'ятати, що вагомим чинником під час вибору марки сталі для виготовлення колеса, може виникнути небезпека появи термічних пошкоджень внаслідок дії композиційних гальмових колодок на поверхню кочення або ковзання колеса по колії. Під час гальмування вантажного рухомого складу, що в основному багаторазово повторюється й відносно за великих швидкостей руху варто враховувати, що сталі з високим вмістом вуглецю більш схильні до утворення термічних тріщин, ніж сталі з меншим вмістом вуглецю. Однак слід зазначити, що сталі з більш високим вмістом вуглецю мають більш високу міцність і зносостійкість [5].

З метою визначення температурного впливу від композиційної гальмової колодки на колесо проведено дослідження його термонапруженого стану.

Для цього побудовано просторову модель колеса вантажного вагона (рис. 3 а). Графічні роботи здійснено в програмному комплексі SolidWorks.



Рис. 3. Суцільнокатане колесо візка вантажного вагона
а) просторова модель; б) скінчено-елементна модель

Розрахунок реалізовано за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation. В якості розрахункового застосовано критерій Мізеса. Скінчено-елементну модель (СЕМ) колеса утворено просторовими ізопараметричними тетраедрами з чотирма точками Якобіана (рис. 3, б).

Оптимальну кількість елементів СЕМ визначено графоаналітичним методом [31]. СЕМ колеса налічує 6342 вузлів та 25889 елементів. Максимальний розмір елемента дорівнює 75 мм, а мінімальний – 15 мм. Співвідношення збільшення розміру елемента 1,8. Кількість елементів в колі – 1,6.

Матеріал колеса – сталь, яка має лінійні ізотропні властивості. Основні фізико-механічні властивості матеріалу суцільнокатаного колеса зведено до таблиці 2.

Таблиця 2. Основні фізико-механічні властивості матеріалу колеса

Найменування параметру	Значення
Модуль пружності, МПа	$2,1 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуасона	0,3
Масова щільність матеріалу, кг/м ³	7850
Межа міцності, МПа	900–1100
Межа плинності, МПа	800
Коефіцієнт теплового розширення, град ⁻¹	$11,9 \cdot 10^{-6}$
Теплопровідність, Вт/м·град	43

При складанні розрахункової моделі колеса враховано, що воно навантажується зусиллям від композиційної гальмової колодки, яке відповідає середньому режиму роботи повітророзподільника ум. №483-000 і складає 35 кН [32]. Для моделювання зони прикладення зазначеного навантаження до колеса на нього встановлювалися накладки, геометрія яких ідентична до геометрії робочої поверхні колодки (рис. 4).



Рис. 4. Моделювання навантаження колеса під час гальмування
а) робоча поверхня колодки; б) розміщення накладок на колесі

Розрахункова схема колеса враховує такі силові фактори: зусилля від колодки P_k , силу тертя $P_{тр}$, обертовий момент M , а також температурне вплив P_T (рис. 5). При цьому величина температурного впливу прийнята рівною 400°C . Модель не враховує силу зчеплення колеса з рейкою.

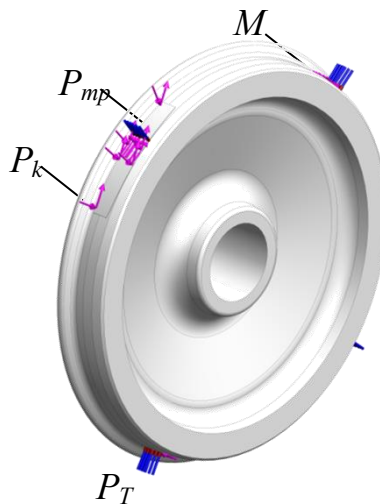


Рис. 5. Розрахункова схема колеса під час гальмування

Закріплення колеса на осі за маточину моделювалося у вигляді жорсткого защемлення.

Результати розрахунку наведено на рис. 6 і 7. Максимальні напруження зафіксовані на поверхні кочення колеса і склали $701,9 \text{ МПа}$, що нижче за допустимі на 12% . Допустимі напруження при цьому прийняті рівними межі плинності матеріалу, тобто 800 МПа . Отже міцність колеса забезпечується. Максимальні переміщення виникають у гребені колеса і складають близько $0,6 \text{ мм}$.

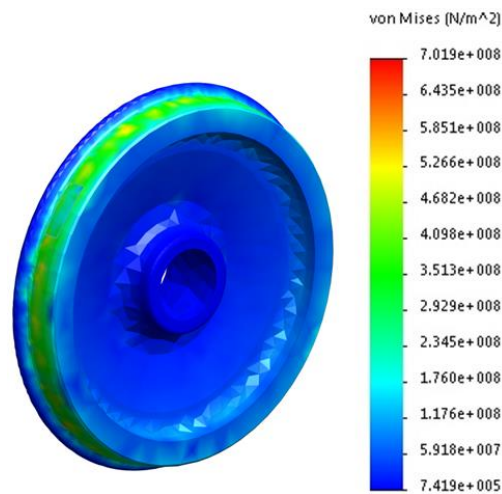


Рис. 6. Термонапружений стан колеса

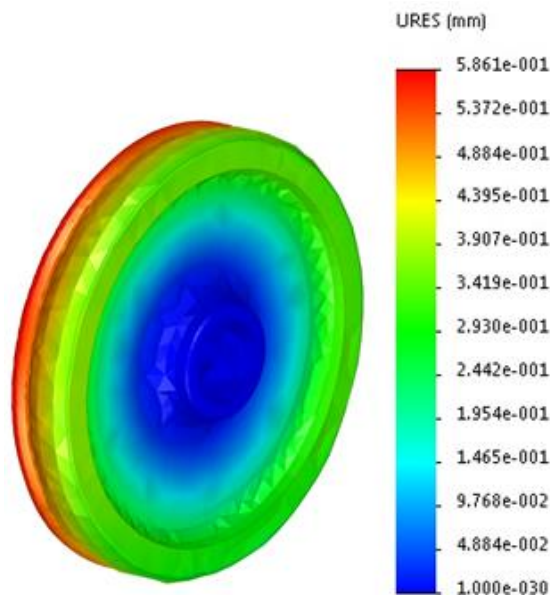


Рис. 7. Переміщення в вузлах колеса

Розрахунок проведений і стосовно інших режимів роботи повітророзподільника. При цьому навантаження від колодки на колесо при вантажному режимі роботи повітророзподільника ум. №483-000 прийнято рівним 41,69 кН, а при порожньому – 17,17 кН.

Результати розрахунку показали, що напруження в колесі при визначенні його термонапруженого стану, залежать перш за все від температурного впливу, який при всіх варіантах розрахунків був прийнятий 400°C.

Важливо сказати, що на практиці величина температурного навантаження може перевищувати 400°C, що обумовлено багатьма факторами, наприклад, технічним станом колодки або колеса, справністю повітророзподільника, завантаженістю вагона тощо. Для визначенні допустимої температури з точки зору забезпечення міцності колеса проведено варіаційні розрахунки. Результати розрахунків наведено на рис. 8.

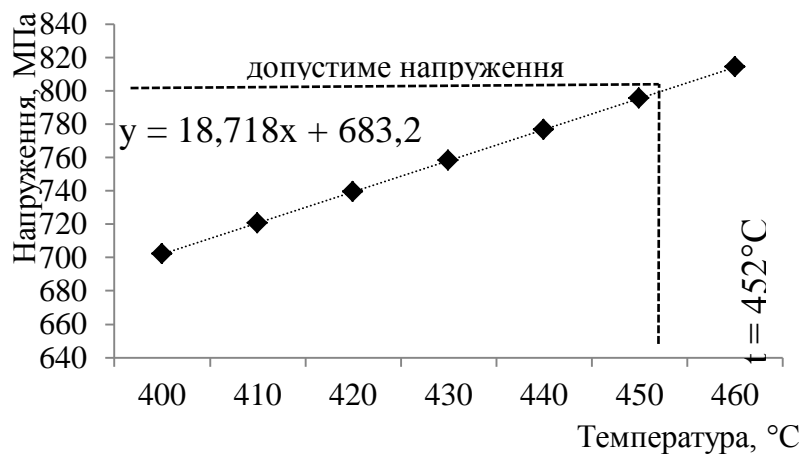


Рис. 8. Залежність напружень в колесі від температурного впливу на нього

Термонапружений стан колеса під час температурного навантаження у 452°C наведено на рис. 9.

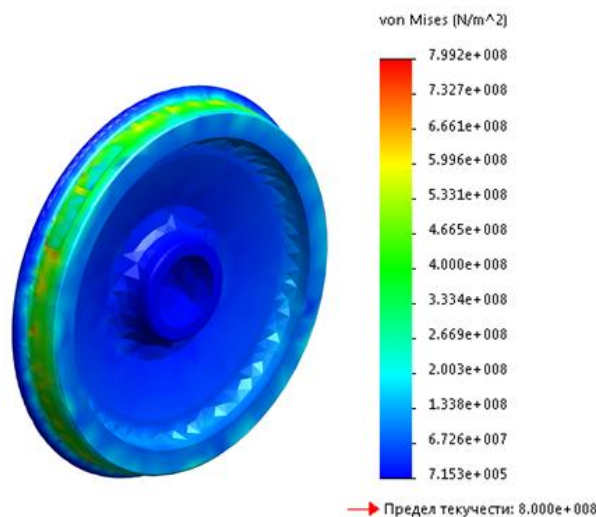


Рис. 9. Термонапружений стан колеса при температурі на поверхні гальмування 452°C

Отже для забезпечення міцності колеса важливим є дотримання температурних режимів його навантаження у експлуатації.

Висновки

1. Проведено комплексні виробничі дослідження на базі вагоноремонтних підприємств, які спеціалізуються на ремонті вантажних вагонів, дозволили встановити види основних причини виникнення поверхневих дефектів коліс. За результатами досліджень було обстежено більше 12 тис. коліс. Отримано статистичну залежність за роками між різними видами несправностей і дефектів коліс.

2. Виконано систематизацію видів небезпечних дефектів і несправностей поверхонь кочення коліс вантажних вагонів від взаємодії композиційних гальмових колодок, що спричиняють високотемпературні місцеві пошкодження, які негативно впливають на безпеку руху поїздів.

3. Проведено визначення термонапруженого стану колеса при взаємодії з композиційною колодкою під час гальмування. Розрахунок здійснено для середнього режиму роботи повітророзподільника ум. №483-000 та величині температурного впливу на колесо у 400°C. Максимальні напруження зафіксовані на поверхні кочення колеса і склали 701,9 МПа, що нижче за допустимі на 12%.

4. Визначено допустимий з точки зору забезпечення міцності колеса температурний вплив на нього під час гальмування. Допустима величина температури на колесо склала 452°C.

5. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо керування температурним впливом на колесо, а також підвищенню безпеки руху поїздів і суттєвому зменшенню експлуатаційних витрат на утримання вантажних вагонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fomin O., Lovska A. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 2(7(110)). P. 6-15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>
2. Fomin O., Lovska A., Skok P., Rogovskii I. Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements. *Technology audit and production reserves*, 2021. Vol. 1(1(57)). P. 6 – 11.
3. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо – рельс. *Железные дороги мира*, 2004. № 1. С. 3 – 5.
4. Захарова С. М. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов: учебник. М.: Интекст, 2004. 160 с.
5. Колісні пари вагонів магістральних залізниць колії 1520 мм (конструкція, технічне обслуговування та ремонт): Підручник для навчальних закладів залізничного транспорту / Панченко С. В. [та ін.]; під заг. ред. С. В. Панченка. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 367 с.
6. Шакина А. В. Разработка эффективной технологии получения вагонной тормозной колодки из металлокерамического фрикционного материала : дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.09. Комсомольск-на-Амуре, 2014. 159 с.
7. Абдурашитов А. Ю. Рельс с улучшенным профилем. *Путь и путевое хозяйство*, 2011. № 2. С. 5 – 10.
8. Воробьев А. А., Сорокин П. Г. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса. *Петербургский государственный университет путей сообщения*. URL: http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin_2004/vorobiev_issled.htm.
9. Марков Д. П. ЗаDIR боковых поверхностей рельсов и гребней колес. *Вестник ВНИИЖТ*, 2004. № 4. С. 10-13.
10. Морозкин И. С., Розман О. А., Родин А. Е., Александров А. А. Термомеханические повреждения колес вагонов и методы их устранения. *Вестник РГУПС*, 2008. № 2. С. 5-14.
11. Грищенко М. А. Причины виникнення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*, 2009. Вип. 27. С. 223–225.
12. Михайлов Е.В., Слещев В.А., Семенов С.А. Пути снижения износа гребней колес рельсовых экипажей. *Вестник Восточноукраинского национального университета имени В. Даля*, 2012. №5. С. 61–67.
13. ERRI B 169/RP 4. Standardization of coach wheelsets. Standardization of a block-braked solid wheel (rim diameter 920 mm) for coaches with a maximum speed of 160 km/h. *Standard wheelsets for block brakes*, 1993.
14. ERRI B 169/RP 5. Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs (mesures immédiates contre les ruptures des roues), 1993.
15. ERRI B 169/RP 6. Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs en service. Méthode aux ultrasons pour la détermination non destructive des contraintes résiduelles dans les jantes de roues monobloc. 1995.
16. ERRI B 169/RP 8. Standardisation des essieux. Détermination de la ténacité des roués monobloc en R7. Définition d'une méthode d'essai et d'un critère d'acceptation, 1995.
17. Milošević M., Stamenković Dušan S., Milojević A. P., Tomić M. M. Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles *THERMAL SCIENCE*, 2012. Vol. 16. (2). P. 581-592.
18. ORE B 106/RP 12. Standardization of coaches, Standardization of a block-braked solid wheel (tread diameter 920 mm) for coaches with a top speed of 160 km/h. *Basic calculations*. Utrecht 1989.
19. Jovanović R., Milutinović D. Modern Ways for Preventing the Damages Caused by the Railway Vehicle Solid Wheel Fractures (in Serbian). *VI International Scientific Conference of Railway Experts – JUŽEL*, 1999.
20. Milutinović D., Tasić M., Jovanović R. Thermal Load as a Primary Cause for the Fracture of the Block-Braked Solid Wheel. *Železnice*, 1999. №11-12.
21. UIC 510-2. Matériel remorqué. Roues et essieux montés. Conditions concernant l'utilisation des roues de différents diamètres. 3e édition 1.1, 1998.
22. UIC 812-3. Technical specification for the supply of solid (monoblock) wheels in rolled non-alloy steel for tractive and trailing stock. 5th edition 1.1, 1984.

23. Павлюков А. Э., Черепов О. В., Шалупина П. И. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы. Вестник Уральского государственного университета путей сообщения., 2017. № 4 (36). С. 4–11.
24. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва: Маршрут, 2006. 392 с.
25. Класифікація несправностей вагонних колісних пар та їх елементів. – Затв. нак. Укрзалізниці № 095-Ц 15.03.2006. Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2006. 79 с.
26. Колісні пари вантажних вагонів. Правила технічного обслуговування, ремонту та формування. : СТІ 04-001:2015 : Затв. нак. Укрзалізниці №359 –Ц 25.04.15. Київ : 2015. 138 с.
27. Равлюк В. Г. Модернізація елементів гальмової важільної передачі візків вантажних вагонів. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2019. Вип. 5 (83). С. 108-121. <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013>.
28. Аналіз стану безпеки руху в структурі АТ «Укрзалізниця» у 2019 році. Акціонерне товариство «Українська залізниця» Департамент безпеки руху. Київ : 2019. 198 с.
29. Vostrikov Ya. A., Zhatchenko V. M. Investigation of cast iron for a brake pad. II Scientific-technical and economic cooperation of the countries of the Asia-Pacific region in the XXI century, 2016. №1. P. 48-51.
30. Shakin A. V., Fadeev V. S., Shtanov O. V. Wagon brake pads of increased wear resistance. II Railway engineering, 2014. №4. P. 68-71.
31. Fomin O., Lovska A., Daki O., Bohomia V., Tymoshchuk O., Tkachenko V. Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. Vol. 3(7(99)). P. 18 – 25.
32. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України : ЦТ – ЦВ – ЦЛ – 0015. – Затв. нак. Укрзалізниці № 264-Ц 28.10.1997. Вид. офіц. Київ, 2004. 146 с.

REFERENCES

1. Fomin, O., Lovska, A. (2021). Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(110)), 6-15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>.
2. Fomin, O., Lovska, A., Skok, P., & Rogovskii, I. (2021). Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements, *Technology audit and production reserves*, 1(1(57)), 6-11.
3. Bogdanov, V. M., Zakharov, S. M. (2004). Sovremennye problemi sistemi koleso – rels [Modern problems of the wheel-rail system] *Zheleznie dorogi mira*, 1. 3-5 [in Russian].
4. Zakharova, S. M. (2004). Kontaktno-ustalostnye povrezhdeniya koles gruzovikh vagonov [Contact fatigue damage to the wheels of freight cars]. Moskva: Intekst [in Russian].
5. Panchenko, S. V. (2018). Kolisni pary vahoniv mahistralnykh zaliznyts kolii 1520 mm (konstruktsiia, tekhnichne obsluhovuvannia ta remont): Pidruchnyk dlia navchalnykh zakladiv zaliznychnoho transportu [Wheel pairs of wagons of main railways gauge 1520 mm (construction, maintenance and repair): Textbook for educational institutions of railway transport]. Kharkiv: UkrDUZT [in Ukrainian].
6. Shakina, A. V. (2014). Razrabotka effektivnoi tekhnologii polucheniya vagonnoi tormoznoi kolodki iz metallokeramicheskogo friktsionnogo materiala [Development of an effective technology for obtaining a wagon brake shoe from a ceramic-metal friction material]. Komsomolsk-na-Amure [in Russian].
7. Abdurashitov, A. Yu. (2011). Rels s uluchshennim profilem [Rail with improved profile]. *Put i putevoe khozyaistvo*, 2. 5-10 [in Russian].
8. Vorobev, A. A., Sorokin, P. G. (2004). Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya pyatna kontakta kolesa i relsa [Investigation of the stress state of the wheel-rail contact patch]. *Peterburgskii gosudarstvennii universitet putei soobshcheniya*, URL: http://science-bsea.narod.ru/2004/mashin_2004/vorobiev_issled.htm [in Russian].
9. Markov, D. P. (2004). Zadir bokovikh poverkhnostei relsov i grebnei koles [Seizure of the side surfaces of the rails and wheel flanges]. *Vestnik VNIIZhT*, 4. 10-13 [in Russian].
10. Morozkin, I. S., Rozman, O. A., Rodin, A. Ye., & Aleksandrov, A. A. (2008). Termomekhanicheskie povrezhdeniya koles vagonov i metodi ikh ustraneniya [Thermomechanical damage to wagon wheels and methods for their elimination]. *Vestnik RGUPS*, 2. 5-14 [in Russian].
11. Hryshchenko, M. A. (2009). Prychyny vynyknennia defektiv na poverkhni kochennia zaliznychnykh kolis [Causes of defects on the rolling surface of railway wheels]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazariana*, 27. 223–225. (in Ukrainian)
12. Mikhaylov, Ye. V., Slashchev, V. A., Semenov, S. A. (2012). Puti snizheniya iznosa grebney koles relsovykh ekipazhey [Ways to reduce wear of the ridges of the wheels of rail vehicles]. *Vestnik VNU im. V. Dalya*, 5. 61–67 [in Russian].
13. ERRI B 169/RP 4. (1993). Standardization of coach wheelsets. Standardization of a block-braked solid wheel (rim diameter 920 mm) for coaches with a maximum speed of 160 km/h. Standard wheelsets for block brakes.
14. ERRI B 169/RP 5. (1993). Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs (mesures immédiates contre les ruptures des roues).

15. ERRI B 169/RP 6. (1995). Standardisation des essieux. Méthodes de surveillance des roues monoblocs en service. Méthode aux ultrasons pour la détermination non destructive des contraintes résiduelles dans les jantes de roues monobloc.
16. ERRI B 169/RP 8. Standardisation des essieux. Détermination de la ténacité des roués monobloc en R7. Définition d'une méthode d'essai et d'un critère d'acceptation.
17. Milošević, M., Stamenković, D. S., Milojević, A. P., & Tomić M. M. (2012). Modeling Thermal Effects in Braking Systems of Railway Vehicles. *THERMAL SCIENCE*, 16. 581-592.
18. ORE B 106/RP 12. (1989). Standardization of coaches, Standardization of a block-braked solid wheel (tread diameter 920 mm) for coaches with a top speed of 160 km/h. Basic calculations. Utrecht.
19. Jovanović, R., Milutinović, D. (1999). Modern Ways for Preventing the Damages Caused by the Railway Vehicle Solid Wheel Fractures (in Serbian). *VI International Scientific Conference of Railway Experts – JUŽEL*.
20. Milutinović, D., Tasić, M., Jovanović, R. (1999). Thermal Load as a Primary Cause for the Fracture of the Block-Braked Solid Wheel. *Železnice*, 11-12.
21. UIC 510-2. (1998). Matériel remorqué. Roues et essieux montés. Conditions concernant l'utilisation des roues de différents diamètres. 3e édition 1.1.
22. UIC 812-3. (1984). Technical specification for the supply of solid (monoblock) wheels in rolled non-alloy steel for tractive and trailing stock. 5th edition 1.1.
23. Pavlyukov A. E., Cherepov O. V., & Shalupina P. I. (2017). Tormoznie kolodki gruzovikh vagonov: analiz povrezhdaemosti i faktorov, vliyayushchikh na sozdanie tormoznoi sili [Brake pads of freight cars: analysis of damage and factors influencing the creation of braking force]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 4 (36). 4–11.
24. Asadchenko V. R. (2006). Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic rolling stock brakes] : tutorial for high schools of railways trans. Moscow : Marshrut [in Russian].
25. *Klasyfikatsiia nespravnostei vahonnykh kolisnykh par ta yikh elementiv [Classification of malfunctions of wagon wheel pairs and their elements]* (2006) Zatverdzhena nakazom Ukrzaliznytsi № 095-Ts 15.03.2006 [Approved by the order of Ukrzaliznytsia No. 095-C on 15.03.2006], Kyiv [in Ukrainian].
26. Kolisni pary vantazhnykh vahoniv. Pravyla tekhnichnoho obsluhovuvannia, remontu ta formuvannia [Wheel pairs of freight cars. Rules of maintenance, repair and formation]. (2015). STP 04-001:2015. Kyiv [in Ukrainian].
27. Ravlyuk, V. G. (2019). Modernizatsiia elementiv halmovoi vazhilnoi peredachi vizkiv vantazhnykh vahoniv [Modernization of elements of brake lever transmission of carts of freight cars]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazariana*, 5(83), 108-121 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15802/stp2019/182013>.
28. Analiz stanu bezpeky rukhu v strukturi AT «Ukrzaliznytsia» u 2019 rotsi. (2019). Aktsionerne tovarystvo «Ukrainska zaliznytsia» Departament bezpeky rukhu. Kyiv [in Ukrainian].
29. Vostrikov, Ya. A., & Zhatchenko, V. M. (2016). Investigation of cast iron for a brake pad. *II Scientific-technical and economic cooperation of the countries of the Asia-Pacific region in the XXI century*, 1. 48-51 [in English].
30. Shakin, A. V., Fadeev, V. S., & Shtanov, O. V. (2014). Wagon brake pads of increased wear resistance. *II Railway engineering*, 4. 68-71 [in English].
31. Fomin O., Lovska A., Daki O., Bohomia V., Tymoshchuk O., & Tkachenko V. (2019). Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(99)), 18 – 25.
32. *Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy : TsT – TsV – TsL – 0015 [Operating Instructions for Rolling Stock Brakes on Railways of Ukraine: CT - CB - CL - 0015]* (2004). Zatverdzhena nakazom Ukrzaliznytsi №264-Ts 28.10.1997 [Approved by the order of Ukrzaliznytsia No. 264-II on October 28, 1997], Kiev [in Ukrainian].

Alyona Lovska¹, Vasyl Ravlyuk²

¹Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

²Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-9482>

IDENTIFICATION OF THE CAUSES OF SURFACE DEFECTS OF WHEELS OF CARS EQUIPPED WITH COMPOSITE PADS

The paper presents the results of the analysis of surface defects and faults of freight car wheels caused by frictional interaction with composite brake pads. It is established that the main influence on

the thermomechanical behavior of freight car wheels is caused by thermal loads that occur during braking. In cases of thermal overloads, which arise mainly as a result of prolonged braking, the generation of stresses and deformations occurs, the consequences of which are the appearance of high-temperature local defects on the rolling surface of freight car wheels. These defects negatively affect the safety of trains and significantly increase the operating costs of railway transport.

To determine the thermal stress state of the freight car wheel during braking, its calculation was carried out. As a calculation method, the finite element method was used, which is implemented in the SolidWorks Simulation software package. The temperature effect on the wheel during braking is determined to be permissible from the point of view of ensuring the strength of the wheel.

The conducted research will contribute to the creation of recommendations for managing the temperature effect on the wheel, as well as improving the safety of trains and significantly reducing operating costs in railway transport.

Keywords: *freight car, brake pad, wheel defects, wheel strength, thermal stress state.*

Володимир Демченко^{1*}, Олексій Демченко²

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

² Аспірант, Кафедра Залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://org/0000-0001-5344-9301>

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

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНІ КОЛЕСА ТА ЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ НА ВЗАЄМОДІЮ З КОЛІЄЮ

Для підготовки та під час виконання роботи були проведені експериментальні та теоретичні дослідження щодо впливу стану профілю поверхні кочення колісної пари на рівень сил взаємодії між елементами рейкової колії та рухомого складу в експлуатації на залізницях України. Отримали подальший розвиток підходи до моделювання впливу профілю поверхні катання колісних пар на стійкість руху колісної пари та силову взаємодію з рейковою колією. Виконані експериментальні дослідження зносу поверхні катання колісних пар рухомого складу, досліджено інтенсивність їхнього зносу залежно від пробігу локомотива. Проаналізовані дослідження впливу технічних характеристик твердості при взаємодії рейки та колеса і їхнього впливу на термін експлуатації на залізницях України. Після початку експлуатації колісних пар з збільшеним значенням твердості порушилося оптимальне співвідношення твердості рейкової і колісної сталі. З різних джерел щодо взаємодії рейки та колеса відомо, що краю зносостійкість в парі тертя виявляють метали з приблизно однаковою твердістю. На основі отриманих даних проведений їхній аналіз з розробкою рекомендацій щодо подальшої експлуатації.

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

Вступ. Залізничний транспорт України розвинута галузь господарства з потужною інфраструктурою це особливо відчувається під час війни яку веде наша держава проти сусідньої росії, держави агресора. Особливо в теперішній час на вітчизняних залізницях досить складні умови експлуатації, які характеризуються низкою проблем, які в мирний час не виникали, але однією з таких проблем є суміщений рух поїздів, при якому одними магістралями рухаються як пасажирські поїзди, так і вантажні поїзди. Все це ускладнює умови експлуатації. Тому проблема взаємодії рейкової колії та колісних пар була і залишається досить актуальною і на даний час.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Виникнення досліджень по даній проблемі спонукав підвищений знос пари «рейка-колесо», які були розпочаті ще в минулому столітті, і на даний час окрім значної економічної складової мають безпосередній вплив на безпеку руху. Дослідження таких питань продовжується і в теперішній час. Перші теоретичні дослідження та розрахунки силових взаємодій базувались на параметрах нових взаємодіючих елементів рейки та колісних пар. У процесі розвитку теоретичних досліджень першим був врахований діаметр колеса, але півний профіль поверхні кочення не було враховано, більш детально дане питання розкрито в роботі [1]. Наведено аналіз впливу змінних умов експлуатації та технічних характеристик взаємодії пари рейка – колесо на знос поверхні кочення колісних пар та поверхні рейок.

Проблема вибору оптимального співвідношення твердості колісних пар та рейок залишається не вирішеною на даний час.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є експериментальне дослідження впливу параметрів колісних пар на величину горизонтальних поперечних сил із врахуванням повного профілю поверхні кочення колісної пари рухомого складу та аналіз існуючої інформації щодо впливу співвідношення твердості взаємодіючої пари «рейка-колесо». Відповідно до мети в роботі були поставлені такі завдання дослідження:

1. Провести аналіз існуючих методів контролю параметрів профілю колісних пар в експлуатації;
2. Можливостей програмного забезпечення для моделювання силової взаємодії між рейками та колесами рухомого складу при різних ступенях їхнього зносу.
3. Виконати експериментальні дослідження зі змін профілю поверхні катання колісних бандажів у процесі експлуатації.
4. На основі даних контролю про стан профілю колісних пар розробити метод перетворення цих даних у цифровий вигляд для проведення теоретичних досліджень та моделювання динамічної взаємодії коліс рухомого складу та рейок.

Основні експериментальні дослідження профілів колісних пар проводились в основному локомотивному депо. Крім того частина експериментальних даних щодо твердості колісних пар та поверхні рейок була отримана з технічної документації.

У мережі залізниць України експлуатується рухомий склад із значним навантаженням на вісь колісної пари локомотиви пасажирські від 205 кН до 220 кН, локомотиви вантажні від 230 кН до 250 кН, відповідно встановленим інструкціям на залізничних магістралях України прийняті максимальні швидкості руху для різних категорій поїздів, для пасажирських поїздів 140 км/год., рефрижераторних поїздів 120 км/год., вантажних поїздів 90 км/год. Додаткові вимоги до руху пасажирських поїздів із швидкостями більше 140 км/год. встановлюється відповідною інструкцією Державної адміністрації залізничного транспорту України. Залізницями України які мають експлуатаційну довжину колії 22,5 тисячі км виконується значний об'єм перевезень. В Європі залізниці України посідають четверте місце, а в світі одинадцяте за експлуатаційною довжиною колії.

Протяжність безстикової колії за той же період зросла на 24,5% і нині складає 71% від загальної протяжності головних колій; кількість стрілочних переводів на залізобетонних брусах зросла на 44,5% і на даний час складає біля 47% від загальної кількості стрілочних переводів, вкладених на усіх коліях Укрзалізниці, при цьому на головних коліях переводів на залізобетоні більше 71%.

Від стану верхньої будови колії залежить швидкість руху поїздів, безперебійність руху потягів, допустимі навантаження на вісь вагонів і локомотивів, об'ємів перевезень на дільницях колії, безпека руху поїздів. Від безпечної та якісної роботи насамперед колійного господарства залежить забезпечення безперервного та безпечного руху поїздів і з встановленими швидкостями.

З аналізу змін характеристик конструкції верхньої будови колії (ВБК) на вітчизняних залізницях можна бачити, що найбільш характерними рисами модернізації колій на залізницях України стало підвищення потужності ВБК, перехід на більш потужні рейки Р65, впровадження більш жорстких конструкцій підрейкової основи, а також впровадження більш твердих і більш зносостійких термозміцнених рейок на головних коліях мережі залізниць України.

З позицій взаємодії пари «колесо-рейка» особливе значення в питаннях інтенсивності зносу обох взаємодіючих елементів займає співвідношення мас, що беруть участь в взаємодії, а також співвідношення жорсткостей механічних систем, що представляють собою конструкції колії та рухомого складу, і крім того питання співвідношення твердості безпосередньо в контакті колеса і рейки.

Питання співвідношення твердості поверхні кочення колеса і рейки набуло останнім часом гостроту через те, що спеціалісти рухомого складу звернули увагу на те що в колію почали вкладатись термічно зміцнені рейки з твердістю 341-388 од. НВ. В такому випадку логічно було б збільшувати і твердість колісних пар, але при цьому потрібно витримувати встановлене раніше

раціональне співвідношення між твердістю рейки та колеса 1,1-1,2 / 1,0 на користь рейки. Результати виміру зносу гребенів і поверхні кочення бандажа (прокат) показали, що із зменшенням товщини гребеня в результаті його фізичного зносу до товщини 30-29 мм, подальша інтенсивність його зносу значно знижується. Це свідчить про те, що передача сили тяги через гребінь зменшується. Таким чином в результаті виконаного аналізу можна зробити такі висновки щодо причин збільшення зносу:

1. По рухомому складу:
 - 1.1. Суттєво збільшилась потужність локомотивів;
 - 1.2. Зросли навантаження від коліс на рейки у локомотивів і вагонів;
 - 1.3. З переходом на інший тип рейки залишилась незмінною відстань між внутрішніми гранями бандажів колісних пар, Змінився коефіцієнт тертя в контактній рейки та колеса;
 - 1.4. Відхилення від нормативних вимог в бік збільшення, геометричних параметрів установки колісних пар при виготовлення та в експлуатації;
 - 1.5. Перевищення встановлених норм по різниці діаметрів поверхні катання коліс, однієї колісної пари;
 - 1.6. Змінилось співвідношення якості і твердості металу колісних пар та рейок;
 - 1.7. Використання різних методів зміцнення коліс і рейок, їх хімічний склад, мікроструктура;
2. По конструкції верхньої будови колії:
 - 2.1. Збільшилась потужність і маса конструкцій колії, що приймає участь при взаємодії пари колесо-рейка;
 - 2.2. Збільшилась жорсткість підрейкової основи, за рахунок впровадження залізобетонних шпал;
 - 2.3. Збільшилась твердість поверхні кочення рейок, що взаємодіють з колесами, за рахунок широкого впровадження термозміцнених рейок;
 - 2.4. Відповідно зі збільшенням вертикальних навантажень від коліс рухомого складу на рейки та з урахуванням збільшення потужності тягових двигунів від кожного колісно-моторного блоку локомотивів – збільшились величини контактних дотичних напружень в верхніх шарах головки рейки і внаслідок цього зросла інтенсивність накопичення контактної-втомлювальних дефектів і знос верхніх шарів поверхні кочення залізничних рейок;
 - 2.5. Зменшились нормативи ширини колії в прямих та кривих ділянках. Результати аналізу багатьох наукових досліджень свідчать, що необхідно на протипагу збільшенню навантаження на вісь, а також потужності яка передається колісною парою на рейки, передбачити низку заходів, які могли б зменшувати знос бічної грані головки рейки та поверхні кочення колісної пари.

До таких заходів можна віднести:

зменшення сили тяги, що передається однією колісною парою. На електротяговому рухомому складі який експлуатується це можливо зробити тільки зменшенням ваги вантажного поїзда. При проектуванні процесу перевезень на залізницях потрібно це враховувати;

зменшення відстані між внутрішніми поверхнями гребенів колісної пари в межах допусків;

збільшення твердості поверхні рейки, але в зв'язку з можливими боковими підрізами гребенів в межах раціонального підняття співвідношення твердості колеса і рейки;

нанесення на поверхню гребенів коліс змашувального матеріалу, що підвищує стійкість до зносу;

можливе зменшення відсотку сили тяги, що передається через поверхню гребеня, шляхом зменшення сили тертя в контактній «рейка-гребінь», але це в свою чергу може знизити використання потужності локомотива.

Використання кожного із заходів щодо зниження зносу пари «рейка-колесо» в експлуатаційних умовах, що існують на залізницях, залежить від:

1. Підбору раціональної твердості матеріалів із яких виготовляються рейки та бандажі колісних пар, також їх раціональних співвідношень;

2. В сучасних умовах універсальними заходами для всіх залізниць є: зміцнення робочої поверхні гребеня та зменшення його товщини;

3. Нанесення мастила в контакт «рейка-колесо» доповнюють вищезгадані заходи і його використовують залежно від профілю ділянки залізниці. Ефективність нанесення мастила залежить від інтенсивності зносу гребеня, від зміцнення поверхні гребеня та зменшення його товщини. Це не має сенсу на тих залізницях, де ресурс бандажа складає менше 700 тис. км пробігу. Але зміцнення поверхні бандажа, як уже згадувалось, вирішення проблеми не дасть.

Однією з проблем є відсутність досліджень впливу зміни профілю бандажа коліс тягового рухомого складу на взаємодію з колією та знос гребенів колісних пар. З моменту переходу на електротягу минуло багато часу, а таких досліджень не проводилось. Наприклад, на локомотивах які експлуатуються на Львівській залізниці вже через 3500 тис. км, параметри профілю бандажа вже мають значні відхилення від початкового (значний підріз гребенів). Дані отримані із звіту про заміри параметрів бандажів колісних пар в експлуатації який подається до служби локомотивного господарства кожної залізниці України.

Виходячи з цього потрібно зробити висновок, що до зносу гребеня з 33 мм до 25 мм 90 % пробігу до наступної обточки бандаж колісної пари працює на профілі, що не відповідає початковому. Такий стан речей має дійсно велике значення у вирішенні питань динаміки, сил, що діють на різні системи робочих частин рухомого складу та колії.

В теперішній час широко проводяться дослідження проблеми зниження силової та фрикційної взаємодії в системі «рейка-колесо», що окрім економічної складової, має значний вплив на безпеку руху. Актуальність цього питання пов'язана з витратами на заміну рейок і коліс локомотивів внаслідок підвищеного зносу цієї пари.

Через збільшення навантаження на вісь змінилась конструкція верхньої будови колії. В локомотивному господарстві в 90-х роках середній знос гребня колісної пари локомотива на 10 тисяч км становив понад 1 мм, причому в літній період знос становив майже 3 мм, для порівняння на початку 80-х років знос складав лише 0,15 мм. Проаналізувавши динаміку сучасного розвитку вимірювальних систем профілю коліс, можна зробити висновок, що на теперішній час засоби, що застосовуються для контролю поверхні кочення колісних пар, мають потужні джерела випромінювання, сприйняття фотозображень, швидкодіючі пристрої оброблення інформації, що дало змогу збільшити точність вимірювань [2, 3, 4].

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

Для безпосереднього проведення експериментальних досліджень розроблена методика виконання робіт на діючих локомотивах що експлуатуються на магістральних ділянках залізничної колії на території України. Для вимірювання параметрів колісних пар використовувався лазерний профілометр рис. 1 [5, 6].

Технічні характеристики лазерного профілометра наведені в табл. 2. До програмного забезпечення роботи профілометра належить програма перегляду профілів. Програма перегляду дозволяє працювати з даними завантаженими з УЦІ, а також із раніше завантаженими даними. Програмне забезпечення дозволяє розрахувати знос поверхні кочення відносно нового профілю який називається еталонним і знаходиться в пам'яті профілометра.

Зі збільшенням швидкостей на залізничному транспорті підвищуються вимоги до безпеки руху поїздів і надійності взаємодіючих елементів в системі колесо-рейка, в тому числі геометричні параметри профілю колісної пари в експлуатації. Інтенсивність зносу профілю колісної пари як правило вища ніж інтенсивність зносу рейки.

Таблиця 1. Технічні характеристики систем контролю параметрів колісних пар

Система	Параметри які вимірюються	Похибка вимірювання, мм	Швидкість руху рухомого складу, км/год
Tread View	Профіль колеса, висота и товщина гребеня	$\pm 0,5$	8
WPMS	Висота и товщина гребеня, товщина обода, прокат на поверхні кочення		60
WheelSpec	Профіль колеса, висота и товщина гребеня, діаметр колеса, товщина обода, прокат на поверхні кочення, повзуни	Нема даних	100
WIS	Профіль и діаметр колеса, висота и товщина гребеня, товщина обода	$>\pm 0,2$; для діаметра колеса $\pm 0,4$	80
Argus	Профіль и діаметр колеса, повзуни, форма коліс	$\pm 0,2$	12
WheelScan	Висота и товщина гребеня, товщина обода, ширина поверхні кочення яка зношується	$\pm 0,05$	30

Оцінку зносу робочого профілю бандажів коліс визначають вимірюванням профілю бандажа в фіксованих точках поверхні кочення. На даний час на залізницях України вимірювання виконується в основному фахівцями по обміру колісних пар ручними шаблонами. Актуальність автоматизованих методів вимірювання параметрів колісних пар локомотивів в наш час значно збільшилась в зв'язку з необхідністю своєчасного контролю стану колісних пар при підвищених швидкостях руху. Проаналізувавши динаміку сучасного розвитку вимірювальних систем можна зробити висновок що на теперішній час засоби що застосовуються для контролю поверхні катання колісних пар мають потужні джерела випромінювання, сприйняття фото зображень, швидкодіючі пристрої оброблення інформації, що дало можливість збільшити точність вимірювань.



Рис. 1. Лазерний профілометр ІКП-5

Таблиця 2. Технічні характеристики профілометра ІКП-5

Найменування		Значення
Діапазон вимірювання:	висота гребеня, мм	20...40
	товщина гребеня, мм	20...40
	крутизна гребеня, мм	1...15
Похибка вимірювання:	висоти гребеня, мм	$\pm 0,1$
	товщини гребеня, мм	$\pm 0,1$
	крутизни гребеня, мм	$\pm 0,2$
Дискретність індикації:	висоти гребеня, мм	0,01
	товщини гребеня, мм	0,01
	крутизни гребеня, мм	0,01

Діапазон зчитування профілю	від вершини гребеня до 140 мм від грані ободу бандажа
Дискретність побудови профілю, не гірше, мм	0,2
Джерело живлення	вмонтована акумуляторна батарея 4,8 В
Час безперебійної роботи, не менше, годин	8
Об'єм пам'яті УЦІ	125 замірів

До збуджуючих факторів, що викликають коливання системи рейка-колісна пара, а відповідно і динамічну взаємодію колії та рухомого складу, відносять:

- геометричні нерівності рейкових ниток;
- геометричні нерівності на поверхні кочення коліс;
- пружні нерівності рейко-шпальної решітки;
- інерційні сили від обертання неврівноважених мас на колесах;
- неврівноважені інерційні сили, що виникають при переміщеннях мас рухомого складу;
- автоколивальні та резонансні явища в системі;
- люфти та зазори в елементах колії та рухомого складу.

За думкою вчених перші три фактори практично повністю визначають формування сил інерції необресорених мас, за рахунок яких фактично повністю відбувається формування силової взаємодії. Саме дія цих факторів призводить до переміщення колеса у вертикальній площині, а одночасний вплив на траєкторію руху нерівностей від зношеного профілю колеса, сумісно з існуючим зазором між рейковою колією і колісними парами, призводять не тільки до вертикальних, а і до горизонтальних переміщень колісних пар під час руху по залізничній колії. Саме таким чином утворюється вертикальна і горизонтальна силова взаємодія між колесами рухомого складу та рейковою колією.

Приклади нерівностей на поверхні кочення рейкових ниток та поверхні кочення коліс рухомого складу приведені на рис. 2.

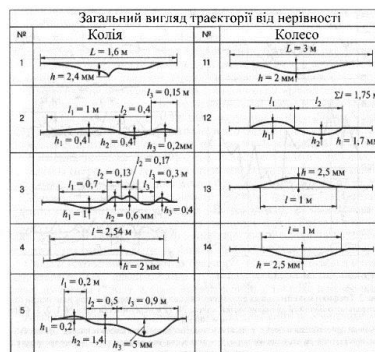


Рис. 2. Форми розрахункових нерівностей на рейкових нитках і колесах рухомого складу

Від значення бокових сил безпосередньо залежить можливість наповзання колеса на рейку. Враховуючи вищезгадане вибрано методикку, яка найбільшою мірою враховує геометричний профіль поверхні колісної пари.

За вибраною методикою буде теоретично визначатись максимальна швидкість руху магістрального локомотива із врахуванням стану поверхні взаємодії рейки та колеса, розрахунки виконуватимуться для нових та зношених рейок і колісних пар. Швидкість розраховується із врахуванням критерію комфортабельності та безпеки руху, значення величини непогашеного прискорення розраховується, але із досліджень відомо що його значення повинно бути в межах $0,7 - 1,2 \text{ м/с}^2$, щоб людина, яка знаходиться в середині рухомого

складу, який входить в криву ділянку, почувала себе комфортно. Безпека руху визначається значенням бокових сил які діють на рейки. Надмірне значення бокових сил може призвести до вповзання колеса на рейку.

За даними досліджень проф. Е.І. Даніленка допустимі значення бокових сил, що діють на рейки від коліс поїзда (за умовами забезпечення поперечної стійкості рейкової колії) обмежується величиною $Y_{\text{бок}} \leq 100-130$ кН, причому перша цифра відповідає нестабілізованому баластовому шару верхньої будови колії, в якому він як правило перебуває після колійних ремонтів.

Для визначенні впливу горизонтальних сил на стійкість руху будуть використані методики [5, 6], згідно яких значення поперечних горизонтальних сил визначаються залежно від відцентрового прискорення, яке змінюється залежно від швидкості руху, радіуса кривої, профілю коліс та підвищення зовнішньої рейки.

Визначення непогашеного прискорення проводиться по узагальненій формулі:

$$a_{\text{м}} = \frac{v^2}{3.6^2 \cdot R} - g \frac{h}{S}, \quad (1)$$

де v – швидкість руху екіпажу, км/год;

$3,6$ – коефіцієнт переводу розмірності швидкості руху км/год в м/с;

S – середня відстань між точками контакту лівого та правого колеса на рейки, 1600 мм;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

R – радіус кривої, м;

h – підвищення зовнішньої рейки, мм.

Одним із завдань даної роботи було крім загального визначення горизонтальних бокових сил, також визначення рівня бокових сил при яких колісна пара не буде вкочуватись на рейку, значенні бокових сил визначались за методикою що отримала подальший розвиток в частині яка враховує профілю колеса викладеною в роботі [1, 7].

Отримано результати розрахунків взаємодії нижче наведено приклад для зношеної поверхні кочення колісної пари що були використані для моделювання силової взаємодії. На рис. 3 наведено результат розрахунку сумарної поперечної сили взаємодії рейки та колеса при швидкості 60 км/год в прямій ділянці колії стан поверхні кочення колісної пари зношений.

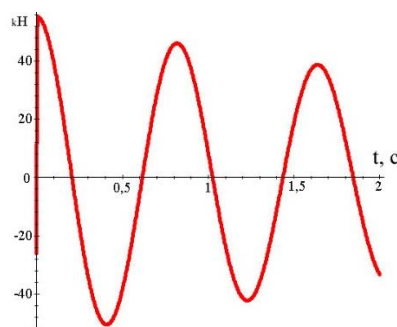


Рис. 3. Графік бокової горизонтальної сили в парі «колесо – рейка»

Із графіка наведеного на рис. 3 можна зробити висновок, що при проходженні нерівностей колії колісною парою з зношеною поверхнею кочення та швидкістю 60 км/год виникають максимальні значення поперечних бокових сил (що становлять 42 кН), амплітуда коливального руху з часом зменшується – коливання затухають, що відповідає стійкому руху, та забезпечується безпека руху.

Щодо визначення оптимального відношення твердості рейок та коліс є складною задачею. В певний період на залізниця України значно зросли показники скорочення терміну експлуатації колісних пар через інтенсивний підріз гребня. Висунута думка що одною із причин значного зносу

поверхні катання колісних пар є порушення співвідношення твердості між колесами та рейками, яке і призвело до зниження термінів роботи колісних пар [8, 9, 10, 11]. Величина такого співвідношення після тривалих досліджень була встановлена на рівні 1,2. Після проведеного аналізу досліджень можна дійти наближених висновків що співвідношення твердості колеса та рейки постійно змінюється від 0,75 до 1,2. По 2002 рік співвідношення становило 0,85, з 2003 року на залізницях України це співвідношення становить 0,75. Саме через такі розбіжності і спостерігаються на залізницях України такі процеси як інтенсивне зношування рейок, фахівці колійники підвищили твердість поверхні рейок, вносять пропозиції щодо обмеження застосування скріплення типу КПП-5 – в результаті збільшилось інтенсивне зношування поверхні колісних пар [12, 13, 14, 15]. На даний час поверхня кочення колісних пар перевищує значення твердості рейок що призводить до інтенсивного їхнього зношування.

Проведення експерименту із рейками, які мають підвищену твердість до 370-390 НВ, та як це вплине на знос поверхні катання колісних пар дуже складна задача. Такі дослідження були виконані в лабораторних умовах, результатом цих досліджень стало визначення оптимальної твердості рейок та коліс на рівні 370-390 НВ. Важливим значенням для збільшення терміну роботи також є показник пластичності, зміцнюючи поверхню колеса понад 400 НВ, структура металу набуває схильності до розтріскування, враховуючи такі показники дослідження показали, що збільшення твердості призводить до зменшення зносу як рейки, так і колеса. Експериментальні дослідження впливу інтенсивності зносу рейки та колеса підтверджують, що збільшення твердості металу із 280 НВ до 360 НВ призводить до зменшення зносу.

Для визначення достовірності результатів розрахунки були порівняні із вже отриманими результатами під час динамічних випробувань локомотивів та з іншими працями, які вже були виконані раніше. Отримані значення звісно відрізняються, але похибка становить менше 15 %.

Висновки. За результатами проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз існуючих методів контролю параметрів профілю колісних пар в експлуатації;
2. Проаналізовані можливості використання програмного забезпечення на основі даних контролю про стан профілю колісних пар отримали подальший розвиток у методі перетворення цих даних у цифровий вигляд для проведення теоретичних досліджень моделювання силової взаємодії між рейками та колесами рухомого складу.
3. За результатами експериментальних досліджень та після теоретичних розрахунків отримано значення силової взаємодії колісних пар з рейками у процесі експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Демченко В.О. Теоретичні дослідження та розрахунки сил взаємодії колії та коліс рухомого складу різного ступеню зносу. Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр. ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2015. №2(30). С. 51-64. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.30.2015.52387>.
2. Демченко В.О. Вплив профілю колісного бандажа на силову взаємодію з рейковою колією: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06. ДЕДУТ. Київ, 2014. 184 с.
3. Венедиктов А.З., Демкин В.Н., Доков Д.С. Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении. Железные дороги мира, 2003. №9. С. 41-44.
4. Демченко В.О., Демченко О.В. Вплив стану поверхні колісної пари на стійкість руху. Сборник научных трудов часть 1. Переяслав-Хмельницкий Октябрь 2018 «Актуальные научные исследования в современном мире», 2018.10(42). С. 71-76.
5. Демченко В.О., Гулак С.О., Демченко О.В., Заїка Д.О. Вплив профілю колеса та твердості на стійкість колії з різними конструкціями скріплення. Збірник наукових праць державного університету інфраструктури та технологій серія «транспортні системи і технології». Київ ДУІТ, 2022. № 39. С. 5-12. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39>.
6. Лазерный профилометр поверхности катания колесных пар. URL:<https://riftek.com/ru/roducts/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> (дата звернення: 21.05.2014).
7. Вербицкий В., Новак А., Даниленко Э. Введение в теорию устойчивости колесных экипажей и рельсового пути: Монография. М. Ситаж. – Катовице – Киев (Польша – Украина) 2006–2007. – Донецк : «Вебер» (Донецкое отделение), 2007. 255 с.

8. Slobodyanyuk M., Gorobchenko O.(2020) Structural analysis of territorial transport systems based on classification methods – *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1(4(103)). P. 23–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194158>.

9. Мойсеєнко К.В., Суслов В.М., Татуревич А.А. Обґрунтування необхідності скасування обмеження застосування скріплення типу КПП-5 за критерієм вантажонапруженості. *Залізничний транспорт України: науково-практичний журнал*, 2017. № 2. С. 55–64.

10. Демченко В.О., Демченко О.В. Вплив співвідношення твердості на технічні характеристики взаємодії пари «колесо-рейка». *Актуальные научные исследования в современном научном мире*, 2021. № 7. С. 150-153.

11. Демченко В.О., Демченко О.В., Експериментальні дослідження поздовжньої стійкості рейкових плітей з різними конструкціями рейкових скріплень *Актуальные научные исследования в современном научном мире*, 2018. № 5. С. 70-79.

12. Бойко В.Д., Потапов Д.М., Молчанов В.М., Демченко В.О., Демченко О.В., Діагностика та експериментальні дослідження стійкості колії з використанням різних типів скріплення *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2021. №198 С. 100-110.

13. Демченко В.О., Демченко О.В., Письменний І.М. Аналіз методів діагностики та контролю поверхні кочення коліс рухомого складу. *Матеріали в всеукраїнської інтернет-конференції здобувачів Вищої освіти, молодих вчених та викладачів «технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку» 17-18 листопада 2022 року м. Київ*. С. 201-203.

14. Демченко В.О., Демченко О.В. Дослідження впливу твердості на технічні характеристики взаємодії пари «колесо-рейка» *Fundamental and applied research in the modern world Proceedings of X International Scientific and Practical Conference Boston, USA 12-14 May 2021*. 283-287 с. <https://sci-conf.com.ua/>

15. Horobchenko O., Demchenko V., Demchenko O. Simulation of the influence of the rolling surface profile on the stability of wheel pair movement on the railway track. *Transport means 2022 Sustainability: Research and Solutions Proceedings of the 26th international scientific conference 854-861 p. part II October 05-07, 2022 Online Conference - Kaunas, Lithuania*. <https://drive.google.com/file/d/1kKuIIReu3vr1wV0qYpQXK0V8Ez8Dxfhm/view>

REFERENCES

1. Demchenko, V.O. (2015). Theoretical studies and calculations of the forces of interaction between the track and the wheels of the rolling stock with different degrees of wear *Bulletin of the Pryazovsky State Technical University: coll. of science Ave*, 30(12), 51-64 [in Ukrainian].

2. Demchenko V.O. (2014). Vplyv profilu kolisnogo bandagy na sulovy vzaemodiu z reukovou kolieu [Influence of a profile of a wheel bandage on force interaction with a rail track]: dis. ... *Candidate's thesis* : Kyiv: DUIT [in Ukrainian].

3. Venediktov, A. Z, Dyomkin, V. N., & Dokov, V. S. (2003). Yzmerenye parametrov kolesnykh par podvyzhnogo sostava vo vremia dvyzheniya [Measuring the parameters of wheelsets of rolling stock during movement]. *Zheleznyye dorohy myra - Railways of the world*, 9, 33-36 [in Russian].

4. Demchenko, V.O., & Demchenko, O.V (2018). Vplyv stany poverhnikolisnoy paru na stiukist ruhu. *Collection of scientific works part 1 Peryaslav-Khmelnytsky October 2018 "Current scientific research in the modern world*, 10(42), 71-76 [in Ukrainian].

5. Demchenko V.O., Hulak S.O., Demchenko O.V., & Zayka D.O. (2022). Vplyv profilu kola ta tverdosti na stiukist kolii z riznymy konstruksiiamy skriplen [Effect of wheel profile and hardness on track stability with different binding designs]. *Zbirnyk naukovykh prats derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnologii serii «transportni systemy i tekhnologii»*. Kyiv DUIT - *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies, series "transportation systems and technologies"*, Kyiv DUIT, 39, 5-12. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39>.

6. Lazernyu profilometr poverhnosti kataniya kolesnykh par [Laser profilometer of the rolling surface of wheelsets] *riftek.com/ru*. Retrieved <https://riftek.com/ru/roducts/~show/equipment/railway-devices/railway-wheel-profile-gauge-ikp> [in Russian].

7. Verbitskii, V., Novak, A., & Danilenko, E. (2007). Vvedenie v teoriyu ustoichivosti kolesnykh ekipazhey i relsovogo puti: *Monografiya / V. Verbitskii, A. E. M. Sitazh. – Katovitse – Kiev (Polsha - Ukraine) 2006 – 2007. – Donetsk: «Veber» (Donetskoe otdelenie)*, 255. [in Russian].

8. Slobodyanyuk M., & Gorobchenko O.(2020) Structural analysis of territorial transport systems based on classification methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(4(103)), 23–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194158>.

9. Moiseyenko K.V., Suslov V.M., & Taturevych A.A. (2017). Obgryntyvanny neobhidnosti skasyvanny obmegenny zastosyvanny skriplenny tupy KPP-5 za kryteriem vantagonaprugenosti. *Railway transport of Ukraine: a scientific and practical journal*, 2, 55–64. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe? I21DBN=LINK &P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FI LA=&2_S21STR=ZTU_2017_2_11

10. Demchenko V.O., & Demchenko O.V.(2021) Vplyv spivvidnoshenny tverdosti na tehnicni charakterystuku paru «koleso-reyka» [Influence of hardness ratio on technical characteristics of wheel-rail interaction]. *Aktualnie yauchnie issledovaniya v sovremennom nauchnom mire – Actual scientific research in the modern scientific world*, 7, 150-150 [in Ukrainian].

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

12. Boyko, V.D., Potapov, D.M., Molchanov, V.M., Demchenko, V.O., & Demchenko, O.V., Diagnostika ta eksperimentalni doslidzenny stiukosti z vukorustannym riznuh tupiv skriplenny. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. Kharkiv, 198, 100-110. <https://scholar.google.com.ua>.

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

14. Demchenko, V.O., & Demchenko, O.V. (2021, May) Doslidzenny vplyvy tverdosti na tehnschns charakterustuku vzaemodii paru «koleso-reuka» Fundamental and applied research in the modern world Proceedings of X International Scientific and Practical Conference Boston, USA 12-14 May 2021. (pp. 283-287). <https://sci-conf.com.ua/>

15. Horobchenko, O., Demchenko, V., & Demchenko, O. (2022, October). Simulation of the influence of the rolling surface profile on the stability of wheel pair movement on the railway track. Transport means 2022 Sustainability: Research and Solutions Proceedings of the 26th international scientific conference part II October 05-07 , 2022 Online Conference – Kaunas, Lithuania. (pp. 854-861). https://drive.google.com/file/d/1kKuIIReu3vr1wV0q_YpQXK0V_8Ez8Dxfhm/view

Volodymyr Demchenko ^{1*}, Oleksii Demchenko ²

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

² Postgraduate, Department of Railway Track and Track Management, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street , 9, Kyiv, 04071, Ukraine. <https://org/0000-0001-5344-9301>

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

INFLUENCE OF WHEEL PROFILE AND HARDNESS ON TRACK STABILITY WITH DIFFERENT STRUCTURE STRUCTURES

For the preparation and during the execution of the work, experimental and theoretical studies were carried out on the influence of the state of the rolling surface profile of the wheelset on the level of interaction forces between the elements of the rail track and rolling stock in operation on the railways of Ukraine. Approaches to modeling the influence of the rolling surface profile of wheelsets on the stability of the wheelset movement and force interaction with the rail track were further developed. Experimental studies of the wear of the rolling surface of wheelsets of rolling stock were carried out, the intensity of their wear depending on the mileage of the locomotive was investigated. Studies of the influence of technical characteristics of hardness in the interaction of rail and wheel and their impact on the service life on the railways of Ukraine are analyzed. After the beginning of operation of wheelsets with increased hardness value, the optimal ratio of hardness of rail and wheel steel was violated. From various sources on the interaction of rails and wheels it is known that the best wear resistance in a friction pair is shown by metals with approximately the same hardness. Based on the data obtained, their analysis was carried out with the development of recommendations for further operation.

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

Микола Радкевич

Аспірант, 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>

*Автор, відповідальний за листування: radkevichm1520mm@gmail.com

ВПЛИВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА НЕСУЧІ КОНСТРУКЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

В статті проведено аналіз впливу навколишнього середовища на несучі металеві конструкції пасажирських вагонів на прикладі вагонів спеціального призначення на основі результатів технічного діагностування з метою подовження терміну експлуатації.

За результатами проведеного аналізу, було визначено, що, незважаючи на початкові високі характеристики несучих елементів і оболонки кузова, сама конструкція кузова пасажирського вагона створює сприятливі умови для розвитку процесу корозії внутрішніх поверхонь несучих елементів. Аналіз отриманих результатів свідчить, що основні експлуатаційні пошкодження елементів кузовів можна розділити на механічні та корозійні. Незважаючи на початкові високі характеристики несучих елементів конструкції і оболонки кузова, сама конструкція кузова пасажирського вагона створює сприятливі умови для розвитку процесу корозії внутрішніх поверхонь несучих елементів. Було обстежено кузови вагонів, споруджених у 1982-1990 рр., що надійшли в ремонт з більшості залізниць. Автором протягом тривалого часу проводився аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів, технічне діагностування з метою подовження терміну служби. Виявлено корозійні пошкодження кузова пасажирського вагона: підлога кузова, пояс нижньої обв'язки, наскрізна корозія обшивки бічних стін. Встановлено, що швидкість корозійного руйнування зростає від нуля в початковий період експлуатації, коли діють захисні властивості протикорозійного покриття, до 0,8 мм на рік. Настільки висока інтенсивність пояснюється специфікою конструкції кузова і умовами його експлуатації.

Ключові слова: вагони спеціального призначення, несучі конструкції, корозія, навколишнє середовище, пошкодження.

Вступ. Відсутність достатнього фінансування на придбання нового рухомого складу змушує залізниці використовувати різні шляхи подовження терміну експлуатації пасажирського рухомого складу, що відпрацював строк експлуатації [1]. Основна кількість металевих несучих конструкцій вагонів залізниць України на сьогоднішній день знаходяться в критичному стані, оскільки вони працюють під дією різних умов, які пов'язані із навколишнім середовищем. Основними причинами аварій та відмов на залізничному транспорті є вплив навколишнього середовища на несучі конструкції через корозійні пошкодження металу, заводський брак матеріалів і обладнання, механічні пошкодження антикорозійного покриття, порушення правил технології експлуатації конструкцій. В результаті чого відбувається виникнення непередбачуваних відмов та аварійних ситуацій на залізниці, завдаються значні збитки підприємствам і Укрзалізниці, погіршується екологічний стан та трапляються нещасні випадки. В зв'язку зі скороченням інвентарного парку вагонів спеціального призначення (для перевезення спецконтингенту) після досягнення нормативного терміну служби, закупівлею в

недостатній кількості нових вагонів, був викликаний їх дефіцит. Комплекс робіт з подовження терміну служби передбачений методикою технічного діагностування пасажирських вагонів, що вичерпали призначений строк експлуатації, та нормативними документами [2, 3]. Але існуюча методика не враховує деяких особливостей пошкоджень елементів конструкції у період експлуатації, а саме – вплив на них навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Обґрунтування необхідності уточнення терміну подовження строку експлуатації пасажирських вагонів розглядалися як в Україні, так і в закордонних публікаціях [4, 5, 14, 15]. У науковому дослідженні [6] обґрунтовано подовження терміну експлуатації пасажирських вагонів з осередками корозії хребтової балки. Розробка рекомендацій щодо подовження терміну експлуатації пасажирських вагонів розглянуто в роботі [7]. В роботах [8, 9, 10] досліджувались проблеми та особливості технічного діагностування пасажирських вагонів.

У більшості перерахованих наукових публікацій досліджується збільшення строку експлуатації різних типів пасажирських вагонів шляхом удосконалення їх конструктивних властивостей без врахування впливу навколишнього середовища.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є проведення аналізу впливу навколишнього середовища на несучі металеві конструкції (НМК) вагонів спеціального призначення (для перевезення спецконтингенту) із строком експлуатації, що перетнув 41 рік від дати виготовлення, для встановлення можливості подальшого подовження строку експлуатації.

Завданням дослідження є: проведення огляду вагонів спеціального призначення і виявлення пошкоджень, які виникають під час експлуатації: механічні та корозійні; на основі методу товщинометрії, дати характеристику корозійним пошкодженням і виявити вплив на них навколишнього середовища.

Матеріали та методи аналізу. Одними з розповсюджених вагонів спеціального призначення є вагони для перевезення спецконтингенту. Найбільш поширеними з яких є вагони моделі 61-4500 (рис. 1).



*Рис. 1. Вагон спеціального призначення моделі 61-4500
(для перевезення спецконтингенту)*

Автором протягом тривалого часу проводився аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів та їх технічне діагностування з метою подовження терміну служби. Збір інформації здійснювався на Одеському, Львівському, Ковельському, Харківському, Хмельницькому, Жмеринському, Маріупольському, Київському вагоноремонтних підприємствах. Було обстежено кузова вагонів споруди 1982-1990 рр., що надійшли в ремонт з більшості залізниць.

Аналіз отриманих результатів показав, що основні експлуатаційні пошкодження елементів кузовів можна розділити на механічні та корозійні. Механічні пошкодження з'являються в результаті нештатної експлуатації вагона і його вузлів. Це тріщини автозчепних пристроїв і елементів поглинаючих апаратів, пошкодження перехідних майданчиків, а також несучих елементів – хребтової балки (в зонах підсилюючих косинців, в зонах зварювання швелерів, в перехідних зонах «швелери – шворнева балка», зонах з'єднання зі шворневою балкою і обв'язками та ін.) (табл. 1).

Таблиця 1. Механічні пошкодження несних металевих конструкцій вагона спеціального призначення (для перевезення спецконтингенту)

Найменування пошкоджень	Кількість вагонів з пошкодженнями
Ум'ятини на нижній обв'язці (в зоні спирання домкратів) глибиною до 150 мм	9
Деформація проміжної балки кріплення гальмівного циліндра	4
Деформація, тріщини кутових стійок	10
Тріщини шворневих балок	3
Тріщини підсилюючого накладного листа хребтової балки по зварному з'єднанню з котлового боку вагона	2
Тріщини підсилюючого накладного листа хребтової балки по зварному з'єднанню з не котлового боку вагона	1

Вагони спеціального призначення (для перевезення спецконтингенту) відрізняються корозійними пошкодженнями різного характеру (табл. 2), у тому числі пов'язаних з порушенням лакофарбового покриття (ЛКП), втратою захисних властивостей мастики в агресивному середовищі. Найбільш схильні до корозії зони металоконструкцій, що знаходяться в місцях впливу конденсату і вологи, є закриті порожнини і екрановані внутрішніми огорожами поверхні кузова. Особливо інтенсивно розвивається корозія (гальванічна, щілинна) в зонах, де відбулося руйнування антикорозійних захисних покриттів [11].

Таблиця 2. Корозійні пошкодження несних металевих конструкцій вагона спеціального призначення (для перевезення спецконтингенту)

Найменування пошкоджень	Кількість вагонів з пошкодженнями
Наскрізна корозія настилу підлоги тамбурів розмірами до (100 x 500) мм	4
Наскрізна корозія настилу підлоги туалетів розмірами до (1200 x 300) мм	8
Наскрізна корозія настилу підлоги котлового відділення розмірами до (150 x 50) мм	5
Наскрізна корозія підвіконного поясу бокової стіни розмірами до (60 x 700) мм	6
Наскрізна корозія нижньої частини обшивки бокової стіни розмірами до (70 x 600) мм	7
Наскрізна корозія нижньої частини кутових стійок розмірами до (90 x 150) мм	5
Наскрізна корозія в нижній частині обшивки торцевої стіни розмірами до (30 x 100) мм	2

Стан металоконструкції кузова оцінювався за допомогою товщинометрії приладами типу «УТ-98 Скат», з точністю вимірювання до 0,1 мм (рис. 2).



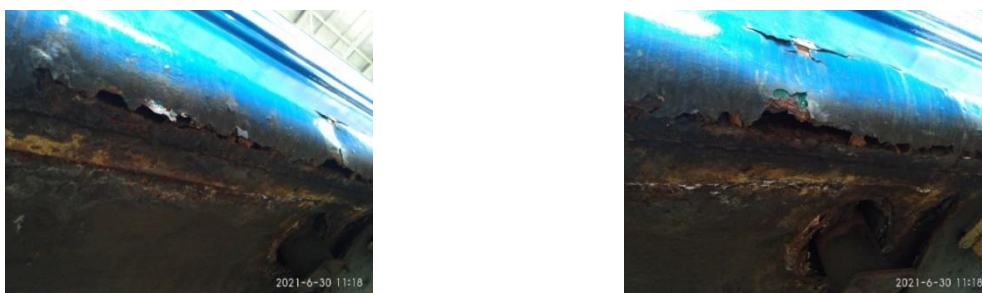
Рис. 2. Товщиномір «УТ-98Т СКАТ»

Після 28 років експлуатації спостерігаються такі пошкодження, які подані на рис. 3, 4, 5, 6:

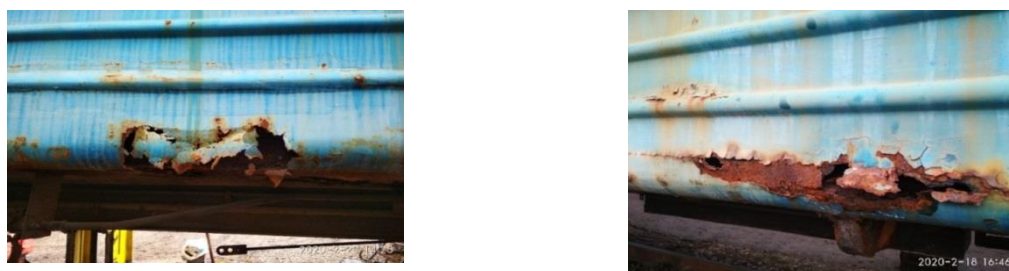
- практично повне руйнування листів підлоги на консольній частині рами від шворневої балки до буферного бруса; окремі осередки корозії на підлозі в середній частині вагона площею до 100-300 см²;
- повний корозійний знос обшивки бічних стін і стійок бічних стін на висоті 200-300 мм від нижньої поздовжньої обв'язки; часткові пошкодження обшивки нижнього пояса бічних стін (зменшені товщини на 0,5 мм);
- значний корозійний знос (до 60%-80% від товщини обшивки) нижніх крайок віконних прорізів;
- істотний корозійний знос обшивки торцевих стін (до 40%-60% від товщини обшивки) на висоті до 300 мм від нижньої кромки;
- корозійні пошкодження обшивки даху (10%-15% від товщини обшивки);
- корозія від 1,5 до 3,2 мм товстостінних елементів кузова (шворневі, поперечні балки, буферні (кінцеві) бруси, хребтова балка і особливо нижні поздовжні обв'язки зетового профілю) [12]. Площа корозійних пошкоджень кузова може становити від 2 до 60 м².



Рис. 3. Корозійні пошкодження кузова
(зона 1 – підлога кузова)



*Рис. 4. Корозійні пошкодження кузова
(зона 2 – пояс нижньої обв'язки)*



Зона 3

*Рис. 5. Корозійні пошкодження кузова
(зона 3 – наскрізна корозія обшивки бічних стін)*



Рис. 6. Корозійні пошкодження підлоги кузова

Таким чином, незважаючи на початкові високі характеристики несучих елементів і оболонки кузова, сама конструкція кузова пасажирського вагона створює сприятливі умови для розвитку процесу корозії внутрішніх поверхонь несучих елементів.

Встановлено, що швидкість корозійного руйнування зростає від нуля в початковий період експлуатації, коли діють захисні властивості протикорозійного покриття, до 0,8 мм на рік, що в 12-66 разів перевищує швидкість корозії незахищеної вуглецевої сталі в атмосфері [13]. Настільки висока інтенсивність пояснюється специфікою конструкції кузова і умовами його експлуатації.

Поряд із загальною (нерівномірною) корозією елементи піддаються також місцевій (виразковій, щілинній) корозії, що є наслідком одночасної дії декількох факторів: плівка вологи, напруженість елементів, структурна неоднорідність, вібрація сполучених елементів тощо. При цьому, як практично в будь-якому корозійному процесі, один з факторів, в даному випадку конденсат (плівка вологи), є основним. Ця обставина, а також нерівномірність процесу, мають вирішальне значення при оцінці корозії (рис. 5).



Рис. 7. Приклад ремонту елементів кузова пасажирського вагону

Площі корозійних пошкоджень кузовів вагонів одного року випуску різні, отже, вагони з одним і тим самим терміном експлуатації істотно розрізняються своїм технічним станом, що викликає труднощі в організації їх ремонту і свідчить про резерви ефективності існуючої системи відновлення технічного ресурсу вагонів

Висновки. За результатами проведеного аналізу, було визначено, що незважаючи на початкові високі характеристики несучих елементів і оболонки кузова, сама конструкція кузова пасажирського вагона створює сприятливі умови для розвитку процесу корозії внутрішніх поверхонь несучих елементів.

Встановлено, що швидкість корозійного руйнування зростає від нуля в початковий період експлуатації, коли діють захисні властивості протикорозійного покриття, до 0,8 мм на рік. Настільки висока інтенсивність пояснюється специфікою конструкції кузова і умовами його експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лобойко Л.М., Бараш Ю.С. Стан вагонного парку та вагоноремонтної бази в Україні. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2007. Вип.18. С. 126-132. URL.: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2007_18_28.
2. Методика технічного діагностування пасажирських вагонів, що виступили призначений термін, з метою його продовження: ЦІ-0070. Київ: Нескінчене джерело, 2008. 60 с.
3. Правила виключення пасажирських вагонів із інвентарного парку: ЦІ-0069. Київ: Нескінчене джерело, 2008. 40 с.
4. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., Bozdog E. Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *Intern. Iron & Steel Symposium (02.04–04.04.2012)*. Istanbul: Karabük University, 2012. №19. С.579-586. URL.: <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/yayinlar/cengizbaykasoglu@hititedutr110920130Y7K9T0V.pdf>.
5. Baykasoglu C., Sunbuloglu E., Bozdog E. Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *Intern. J. of Crashworthiness*. London, 2011. Vol.16. Iss.3. P.319–329. URL.: <https://doi.org/10.1080/13588265.2011.566475>.
6. Мямлін С.В., Рейдемейстер О.Г., Пуларія А.Л., Калашник В.О. Обґрунтування продовження терміну служби пасажирських вагонів з осередками корозії хребтової балки. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2015. № 5. С. 132-140. URL.: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55337>.
7. Мямлін С.В., Рейдемейстер О.Г., Пуларія А.Л., Калашник В.О. Розробка рекомендацій із продовження терміну корисної експлуатації пасажирських вагонів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2015. № 6(60). С. 118–126. URL.: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57096>.
8. Мямлин С.В., Анофриев В.Г., Пулария А.Л. Диагностирование подвижного состава с целью продления срока службы. *Матеріали LXVI Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта» (11.05–12.05 2006)*. Днепропетровск: Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2006. С. 108-109.
9. Мямлин С.В., Пулария А.Л. Проблемы технического диагностирования пассажирских вагонов. *Матеріали Міжнар. наук.- техн. конф. «Розвиток наукової школи трансп. Механіки»*. Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. С. 65-67.
10. Мямлин С.В., Анофриев В.Г., Пулари А.Л. Особенности технического диагностирования подвижного состава. *Матеріали I Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми та ефективні шляхи ремонту і відновлення залізничного рухомого складу»*. Київ: ДП «ПВІТБ «Київдптротранс», 2006. С. 16-17.

11. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1981. 80 с.
12. Martynov I., Trufanova A., Pavlenko Y., Serhiienko, M. Аналіз технічного стану кузовів пасажирських вагонів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*, 2018. Вип. 45(1321). 41–46. URL.: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.06>.
13. Радкевич М.М., Сапронова С.Ю. Аналіз типових випробувань на співудар спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту з метою продовження терміну служби. *Збірник наукових праць науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», 01-02 грудня 2020 р.* Сєвєродонецьк: Вид-во СНУ ім.В.Даля, 2020. С.130-132.
14. 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>.
15. 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>.

REFERENCES

1. Loboiko L.M., & Barash Yu.S. (2007). Stan vahonnoho parku ta vahonoremontnoi bazy v Ukraini [The condition of rolling stock and repair base in Ukraine]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana - Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 18, 126-132 [in Ukrainian]. URL.: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2007_18_28
2. Methods of technical diagnostics of passenger cars that have served the appointed period, in order to extend it: CL-0070.(2008) Kyiv: *Infinite Source* [in Ukrainian].
3. Pravyla vyklyuchennya pasazhyr'skykh vahoniv iz inventarnoho parku: TSL-0069. (2008). [Rules for exclusion of passenger cars from the inventory: CL-0069]. Kyiv: *Neskinchene dzhereło*. [in Ukrainian].
4. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., & Bozdog, E. (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. URL.: <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/yayinlar/cengizbaykasoglu@hititedutr110920130Y7K9T0V.pdf>
5. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., & Bozdog, E. (2011). Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *Intern. J. of Crashworthiness. London*, 16(3), 319–329. URL.: <https://doi:10.1080/13-588265.2011.566475>.
6. Myamlin, S.V., Reidemeister, O.H., Pulariya, A.L., & Kalashnik V.O. (2015). Obhruntuvannya prodovzhennya terminu sluzhby pasazhyr'skykh vahoniv z oseredkamy koroziyi khrebtovoyi balky. [Rationale for extending the service life of passenger cars with spinal corrosion beams]. *Nauka ta prohres transportu. [Science and progress of transport]. Visnyk Dnipropetrovskoho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana. - Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnipropetrovsk*, 5, 132-140. [in Ukrainian]. URL.: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55337>
7. Myamlin, S.V., Reydemeyster, O.H., Pulariya, A.L., & Kalashnyk, V.O. (2015). Rozrobka rekomendatsiy iz prodovzhennya terminu korysnoyi ekspluatatsiyi pasazhyr'skykh vahoniv. [Development of recommendations for extending the useful life of passenger cars]. *Nauka ta prohres transportu. - Science and progress of transport. Visnyk Dnipropetrovskoho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana - Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 6(60), 118–126. (in Ukrainian). URL.: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57096>
8. Myamlin, S.V., Anofriyev, V.G., & Pulariya A.L. (2006). Diagnostirovaniye podvizhnogo sostava s tsel'yu prodleniya sroka sluzhby. [Diagnosis of rolling stock for the purpose of prolonging the service life]. *Materiali LXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta» (11.05-12.05 2006). Dnepropetrovskiy natsional'nyy universitet zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazaryana. Dnepropetrovsk. - Materials LXVI Int. scientific-practical conf. "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport" (11.05-12.05 2006). Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnepropetrovsk. Dnepropetrovsk*, 108–109. (in Russian).
9. Myamlin, S.V., & Pulariya, A.L. (2013). Problemy tekhnicheskoho dyagnostyrovannya passazhyr'skykh vahonov. [Problems of the technology diagnostics of passenger wagons]. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Rozvytok naukovoyi shkoly transportnoyi mekhaniky». - Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Development of the Scientific School of Transport Mechanics". Dnipropetrovsk*, 65–67.
10. Myamlyn, S.V., Anofriyev, V.H., & Pulariya, A.L. (2006). Osobennosti tekhnicheskoho dyagnostyrovannya podvizhnogo sostava. [Features of technical diagnostics of rolling stock]. *Materialy I Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi «Suchasni problemy ta efektyvni shlyakhy remontu i vidnovlennya zaliznychnoho rukhomoho skladu». - Proceedings of the 1st International Scientific Conference "Modern Problems and Effective Ways of Repair and Restoration of Railway Rolling Stock". Kyiv: State Enterprise PVITB Kyivdiprotrans*, 16-17. [in Russian].

11. Botaki, A. A., Ulyanov, V. L., & Sharko, A. V. (1981). Ultrazvukovoi kontrol prochnostnykh svoystv konstruktivnykh materialov. [Ultrasonic control of strength properties of construction materials]. *M.: Mashinostroenie – M.: Mechanical engineering* [in Russian].

12. Martynov, I., Trufanova, A., Pavlenko, Y. & Serhiienko, M. (2018, December). Analysis of the technical condition of passenger car bodies. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies (December 2018), 45(1321), 41–46. URL.: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.06>

13. Radkevich, M.M., & Saponova, S.Yu. (2020). Analiz tipovih viprobuvan' na spivudar special'nih vagoniv dlya perevezennya speckontingentu z metoyu prodovzhennya terminu sluzhbi [Analysis of typical tests for the co-production of special wagons for the transportation of special equipment in order to extend the service life]. *Zbirnik naukovih prac' naukovo-praktichnoi konferencii zdobuvachiv vishchoi osviti ta molodih vchenih «Logistichne upravlinnya ta bezpeka ruhu na transporti» - Collection of scientific works of scientific and practical conference of higher education applicants and young scientists "Logistic management and safety of traffic on transport"*. Severodonetsk, 130-132. [in Ukrainian].

14. Radkevich, M.M., Saponova, S.Yu., & Tkachenko, V.P. (2020). Doslidzhennya zalishkovogo resursu ta vstanovlennya granichnogo terminu ekspluatatsii nekupejnih pasazhirs'kih vagoniv pobudovi KVZ. [Study of residual resource and setting a lifetime limit for non-purchased passenger cars built by KVN]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi Transport Systems and Technologies*, 36, 54-62 [in Ukrainian]. URL.: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-6>

15. Radkevich, M.M., Saponova, S.Yu. & Tkachenko V.P. (2021). Doslidzhennya zalishkovoho 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>.

Nikolay Radkevich

Postgraduate student, Department of Wagons and Wagon Management, State University of Infrastructure and Technologies, str. 9 Kyrylivska St., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9598-5022>

THE INFLUENCE OF THE ENVIRONMENT ON THE BEARING STRUCTURES OF PASSENGER CARS

The article analyzes the impact of the environment on the load-bearing metal structures of passenger cars using the example of special-purpose cars based on the results of technical diagnostics in order to extend the service life. According to the results of the analysis, it was determined that despite the initial high characteristics of the load-bearing elements and the body shell, the very design of the passenger car body creates favorable conditions for the development of corrosion of the internal surfaces of the load-bearing elements. The analysis of the obtained results showed that the main operational damage to body elements can be divided into mechanical and corrosion. Despite the initial high characteristics of the load-bearing elements of the structure and the shell of the body, the very design of the body of the passenger car creates favorable conditions for the development of the process of corrosion of the internal surfaces of the load-bearing elements. The bodies of wagons built in 1982-1990, which came for repair from most railways, were examined. For a long time, the author analyzed the technical condition of the bodies of passenger cars, technical diagnostics in order to extend the service life. Corrosion damage to the body of the passenger car was detected: the floor of the body, the belt of the lower lining, through-corrosion of the lining of the side walls). It was established that the rate of corrosion destruction increases from zero in the initial period of operation, when the protective properties of the anti-corrosion coating are effective, to 0,8 mm per year. Such a high intensity is explained by the specifics of the body design and the conditions of its operation.

Keywords: special purpose wagon, load-bearing structures, corrosion, environment, damage.

УДК 629.463.66

Андрій Сулим^{1*}; Олег Орлов²

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

² Науковий співробітник науково-дослідної лабораторії, Науково-дослідна лабораторія експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1555-0297>

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

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ДОВГОБАЗНОГО ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ШЛЯХОМ ПРОВЕДЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ

За результатами аналізу існуючих досліджень останнього періоду в напрямку досліджень міцності довгобазних вагонів-платформ встановлено необхідність експериментального обґрунтування конструктивних рішень рами довгобазних вагонів-платформ та оцінки точності теоретичних розрахунків шляхом проведення вібраційних випробувань на втому. Представлено методологію проведення вібраційних випробувань на втому довгобазного вагона-платформи. Наведено результати теоретичних досліджень з визначення міцності довгобазного вагона-платформи. Наведено результати експериментальних досліджень вібраційних випробувань на втому рами довгобазного вагона-платформи до та після конструктивного удосконалення. Приведено конструктивні зміни та удосконалення рами довгобазного вагона-платформи на етапі проведення експериментальних вібраційних випробувань на втому. Показано місце зародження та розвитку тріщини в конструкції рами довгобазного вагона-платформи. За результатами досліджень визначено фактичну міцність елементів конструкції вагона та обрано конструкцію довгобазного вагона-платформи з метою недопущення втомного руйнування та забезпечення необхідної експлуатаційної безпеки руху. Доведено необхідність удосконалення методів оцінки опору втомі зварних з'єднань рам довгобазних вагонів-платформ на стадії проектування.

Матеріали статті сприятимуть створенню нових моделей довгобазних вагонів-платформ для магістрального залізничного транспорту та модернізації існуючих моделей, а також підвищенню міцності та ресурсу під час їх експлуатації.

Ключові слова: випробування на втому, довгобазний вагон-платформа, коефіцієнт запасу, міцність, ресурс.

Вступ. Контейнерні перевезення є одним із основних секторів економіки залізничного транспорту, що забезпечують ефективність його роботи та задовольняють потреби експортно-імпортних та транзитних вантажопотоків. Зростаючі об'єми використання 40-футових великотоннажних контейнерів в таких перевезеннях потребують створення нових удосконалених вагонів-платформ збільшеної довжини. Таким чином, дослідження, направлені на створення довгобазного вагона-платформи, є актуальними.

Постановка проблеми. До цього часу накопичено значний досвід побудови та експлуатації контейнерних довгобазних вагонів-платформ. Однак під час створення довгобазних вагонів-

платформ для перевезення двох 40-футових контейнерів виробники стикнулися з рядом труднощів, а саме: в процесі експлуатації довгобазних вагонів-платформ з довжиною 25 м різних заводів-виробників були виявлені поперечні тріщини втомного характеру в несучих вузлах рам, що утворюються, як правило, в зонах зварних швів.

Даний факт ставить під сумнів можливість використання прийнятих методів оцінки опору втоми в розрахунках довгобазних вагонів-платформ та потребує експериментального підтвердження конструктивно-закладених параметрів міцності в умовах, максимально наближених до експлуатаційних.

Аналіз останніх досліджень. На цей час питанню підвищення втомної міцності довгобазних вагонів-платформ багато вчених і науковців залізничного транспорту приділяють особливу увагу. Даний факт в черговий раз підтверджує актуальність і необхідність вирішення питання удосконалення конструкції довгобазних вагонів-платформ з метою підвищення їх ресурсу. До основних досліджень щодо підвищення міцносних якостей довгобазних вагонів-платформ належать роботи Гуржи Н.Л., Донченка А.В., Кельріха М.Б., Ловської А.О., Федосова-Ніконова Д.В., Фоміна О.В., Чепурного А.Д., Шатунова О.В. [1–10]. В цих роботах детально розглянуто існуючі конструктивні рішення довгобазних вагонів-платформ та шляхи їх удосконалення, результати експериментальних досліджень міцносних характеристик цих вагонів, теоретичні та експериментальні методи досліджень міцності основних несучих елементів конструкції довгобазних вагонів-платформ, а також ряд інших питань. Разом з тим, питання експериментального дослідження міцності довгобазного вагона-платформи шляхом проведення вібраційних випробувань на втому в зазначених роботах детально не розглядалось. Тому, в цій роботі пропонується зосередитись на цьому актуальному питанні.

Мета – визначення втомної міцності довгобазного вагона-платформи за допомогою експериментальних досліджень шляхом проведення вібраційних випробувань на втому.

Матеріал та результати досліджень. Об'єктом досліджень є довгобазний вагон-платформа, призначений для перевезення великотоннажних контейнерів типорозмірів 1А, 1АА, 1АХ, 1С, 1СС, 1СХ. Унікальною особливістю цього довгобазного вагона-платформи є можливість одночасного перевезення двох 40-футових контейнерів або чотирьох 20-футових контейнерів. Рама довгобазного вагона-платформи являє собою зварну металоконструкцію, основними несучими елементами якої є хребтова та бічні балки. Хребтова балка – це зварна конструкція коробчастого перерізу змінної висоти та товщини по довжині. Бічні балки мають двотавровий переріз, виконаний однієї по всій довжині з підсилюючими вертикальними ребрами. Бічні балки з'єднані між собою двома шворневими балками, проміжними поперечними балками та розкосами. Довжина вагона по осях зчеплення автозчепів складає 25,62 м, база – 18,5 м.

У зв'язку з тим, що конструкція рами довгобазного вагона-платформи є складною просторовою системою, яка повинна забезпечувати максимальну вагову ефективність за заданої міцності, розрахунок виконувався з використанням програмних пакетів скінченно-елементного аналізу.

Для перевірки втомної міцності виконано розрахунок опору втоми рами довгобазного вагона-платформи під час багатоциклічного навантаження. Результати розрахунку показали, що конструкція витримує діючі навантаження з достатніми запасами міцності на весь призначений строк служби.

Під час проведення експериментальних досліджень довгобазний вагон-платформа був навантажений чотирма імітаторами 20-футових контейнерів до повної вантажопідйомності (рис. 1).

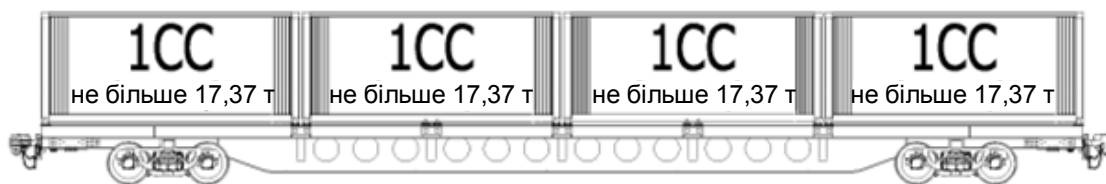


Рис. 1. Схема завантаження довгобазного вагона-платформи під час випробувань

Як основне обладнання під час проведення вібраційних випробувань на втому використовувалось спеціальне пристосування (стенд) з пневмомеханічним збудником коливань, що забезпечує створення зовнішнього збуджуючого впливу на довгобазний вагон-платформу та стабільне підтримання режиму коливань. Пневмопульсаторні елементи були встановлені з обох кінців вагона та розміщені вздовж осі вагона біля шворневих балок. Стенд для проведення вібраційних випробувань на втому залізничного рухомого складу розроблено та захищено охоронним документом [11] за колективної участі таких авторів як Кохан А.Е., Пузирьков В.І., Латишенок В.І., Кельріх М.Б. та інших. Детально складові стенду для проведення вібраційних випробувань на втому рухомого складу та принцип його дії описано в роботах [11, 12]. Слід зазначити, що на даний час розробники довгобазних вагонів-платформ широко використовують такі стенди під час здійснення вібраційних випробувань на втому, незважаючи на давність винаходу такого технічного рішення та наявності інших високотехнологічних стендів з можливістю одночасного формування поздовжніх, поперечних та поздовжньо-поперечних навантажень. Головними перевагами наведеного стенду є простота конструкції та реалізації, відносно низька вартість порівняно з іншими високотехнологічними стендами.

Для вибору режиму випробувань використовувались експериментальні дані за експлуатаційною навантаженістю деталі $\sigma_{a,e}$, отримані за результатами ходових міцносних випробувань. Еквівалентна приведена амплітуда динамічного напруження на нижньому поясі хребтової балки в центральному перерізі рами при цьому склала $\sigma_{a,e} = 32$ МПа. Величина випробувальної амплітуди в даному перерізі під час проведення випробувань склала $\sigma_{a,вин} = 45$ МПа.

Напруження на нижньому поясі хребтової балки в центральному перерізі рами під час проведення випробувань склали:

- $\sigma_{cp} = 159$ МПа – середнє напруження циклу;
- $\sigma_{min} = 114$ МПа – мінімальне напруження циклу;
- $\sigma_{max} = 204$ МПа – максимальне напруження циклу.
- $\sigma_{a,вин} = 45$ МПа – випробувальна амплітуда.

1,89 Гц – частота коливань під час амплітуди, що встановилася.

Розрахункова кількість циклів під час випробувань для центрального перерізу рами визначалась (з урахуванням рівняння кривої втоми) за формулою [13-17]:

$$N_{вин}^p = \left(\left(\frac{\sigma_{a,N}^p}{\sigma_{a,вин}^{max}} \right) \right)^m N_0, \quad (1)$$

де $\sigma_{a,N}^p \geq [n] \cdot \sigma_{a,3} \geq 1,15 \cdot 32 \geq 36,8$ МПа – розрахункова границя витривалості за амплітудою за базового числа циклів;

$[n] = 1,15$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втоми;

$N_0 = 10^7$ – базове число циклів;

$\sigma_{a, \text{вип}}^{\text{max}}$ – максимальна амплітуда динамічних напружень в досліджуваній зоні конструкції вагона під час випробувань, $\sigma_{a, \text{вип}}^{\text{max}} = 45$ МПа.

$m = 4$ – показник ступеня в рівнянні кривої втоми.

Розрахункова кількість циклів під час випробувань для центрального перерізу рами вагона склало 4 472 406 циклів.

Під час досягнення $N_{\text{вип}} = 1\,980\,000$ циклів в конструкції було виявлено тріщини в круглих вікнах вертикального листа хребтової балки в центральній зоні рами. Місця та характер руйнування рами довгобазного вагона-платформи під час проведення вібраційних випробувань на втому наведено на рис. 2.

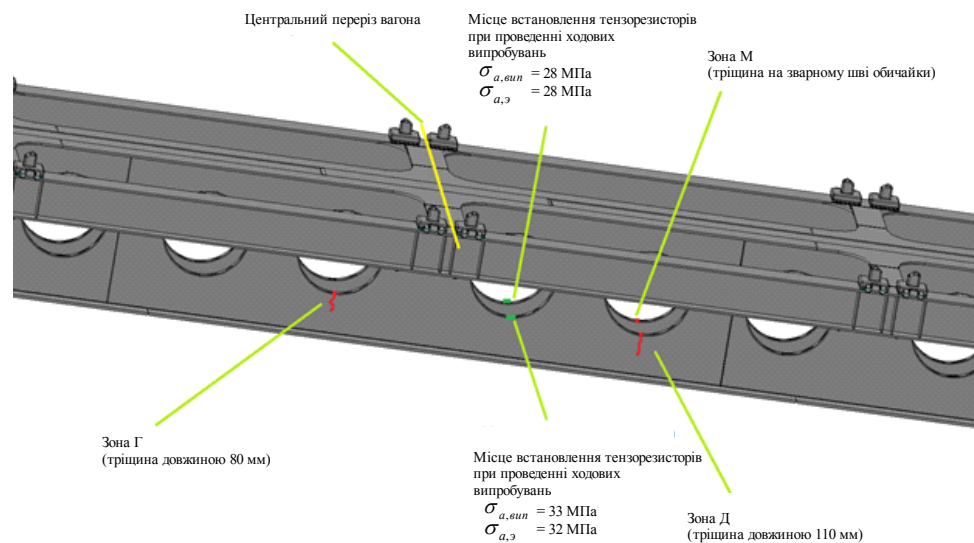


Рис. 2. Місця та характер руйнувань рами довгобазного вагона-платформи

При цьому коефіцієнт запасу опору втоми в місці зародження тріщини склав $n=0,57$, за необхідного $[n] = 1,15$ згідно таблиці 13 ГОСТ 33211 [13].

Даний факт потребував проведення досліджень з уточнення силових впливів з урахуванням взаємодії контейнерів та конструкції рами, розроблення уточнених розрахункових схем та модернізації алгоритму проектування з урахуванням конструктивних особливостей довгобазних вагонів-платформ.

Після цього було виготовлено другий дослідний зразок довгобазного вагона-платформи, в конструкцію якого були внесені істотні зміни з метою підвищення запасу втомної міцності. Зміни в конструкції рами довгобазного вагона-платформи наведено на рис. 3.

Другий дослідний зразок довгобазного вагона-платформи був також підданий експериментальним дослідженням на міцність шляхом проведення вібраційних випробувань на втому з використанням стенду.

Під час проведення експериментальних досліджень напруження на нижньому поясі хребтової балки в центральному перерізі рами під час проведення випробувань склали:

- $\sigma_{\text{cp}} = 104$ МПа – середнє напруження циклу;
- $\sigma_{\text{min}} = 54$ МПа – мінімальне напруження циклу;
- $\sigma_{\text{max}} = 154$ МПа – максимальне напруження циклу;
- $\sigma_{a, \text{вип}} = 50$ МПа – випробувальна амплітуда.
- 1,97 Гц – частота коливань під час амплітуди, що встановилася.

Розрахункова кількість циклів під час випробувань $N_{\text{вип}}^P$ визначалась за формулою (1) і склала 2 266 712 циклів.

Центральна частина нової хребтової балки

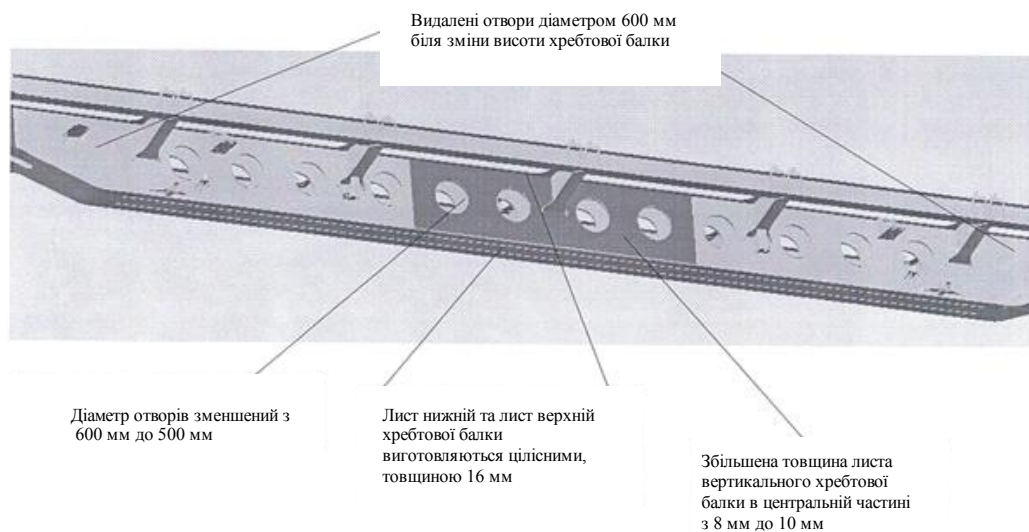


Рис. 3. Конструктивні зміни в рамі довгобазного вагона-платформи

Під час досягнення $N_{вин} = 2\ 128\ 000$ циклів в конструкції рами довгобазного вагона-платформи було виявлено тріщину в зоні з'єднання вертикального та нижнього листів хребтової балки в центральній зоні рами. Місцем зародження тріщини виявився зварний шов в зоні переходу вертикального листа хребтової балки з товщини 10 мм на товщину 8 мм. Місце та характер руйнування рами довгобазного вагона-платформи зображено на рис. 4. При цьому коефіцієнт запасу опору втомі в місці зародження тріщини склав 1,196, за допустимого нормативного не менше 1,15 згідно таблиці 13 ГОСТ 33211 [13].

Після виявлення тріщини випробування були продовжені з незмінною величиною випробувальної амплітуди $\sigma_{a,вин} = 50$ МПа на нижньому поясі хребтової балки в центральному перерізі рами з постійним місцем контролю місця зародження та розвитку тріщини. При даному режимі було досягнуто $N_{вин} = 2\ 267\ 000$ циклів при базовому розрахунковому числі циклів для центрального перерізу рами $N_{вин}^p = 2\ 266\ 712$ циклів.

Характер розвитку втомної тріщини після досягнення $N_{вин} = 2\ 267\ 000$ циклів зображено на рис. 6.

При цьому коефіцієнт запасу опору втомі на нижньому поясі хребтової балки в центральному перерізі рами під час досягнення $N_{вин} = 2\ 267\ 000$ циклів склав $n = 1,15$. Під час проведення досліджень в центральному перерізі рами та в зоні появи тріщини наведено осцилограми випробувальних амплітуд на рис. 6.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень з визначення міцності конструкції в центральному перерізі рами та в зоні виявлення тріщини довгобазного вагона-платформи наведено в таблиці 1.

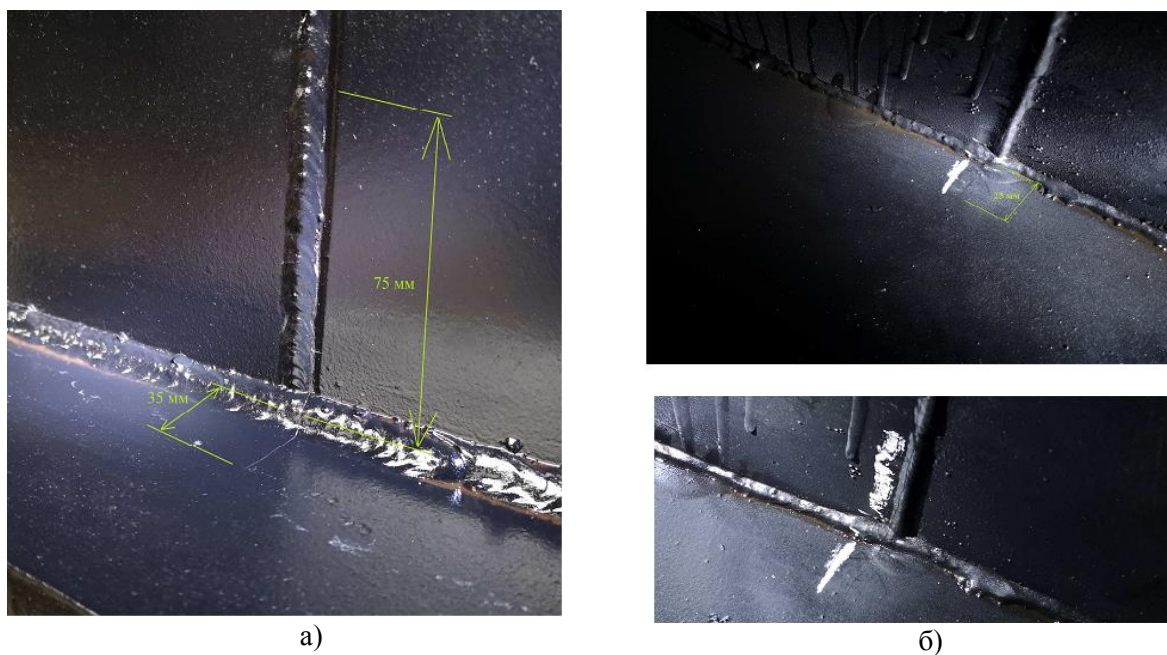


Рис. 4. Початок зародження тріщини: вид зовні (а) та зсередини (б) хребтової балки рами вагона-платформи

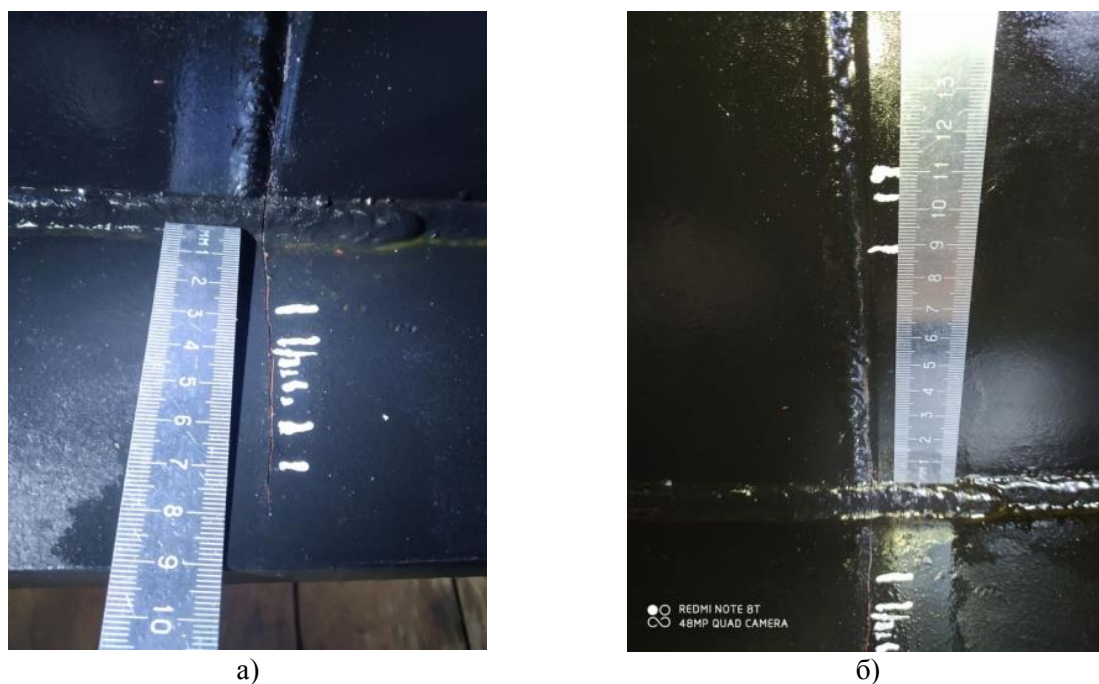


Рис. 5. Вид тріщини втомі після досягнення базового числа циклів: нижній (а) та верхній (б) лист хребтової балки вагона-платформи

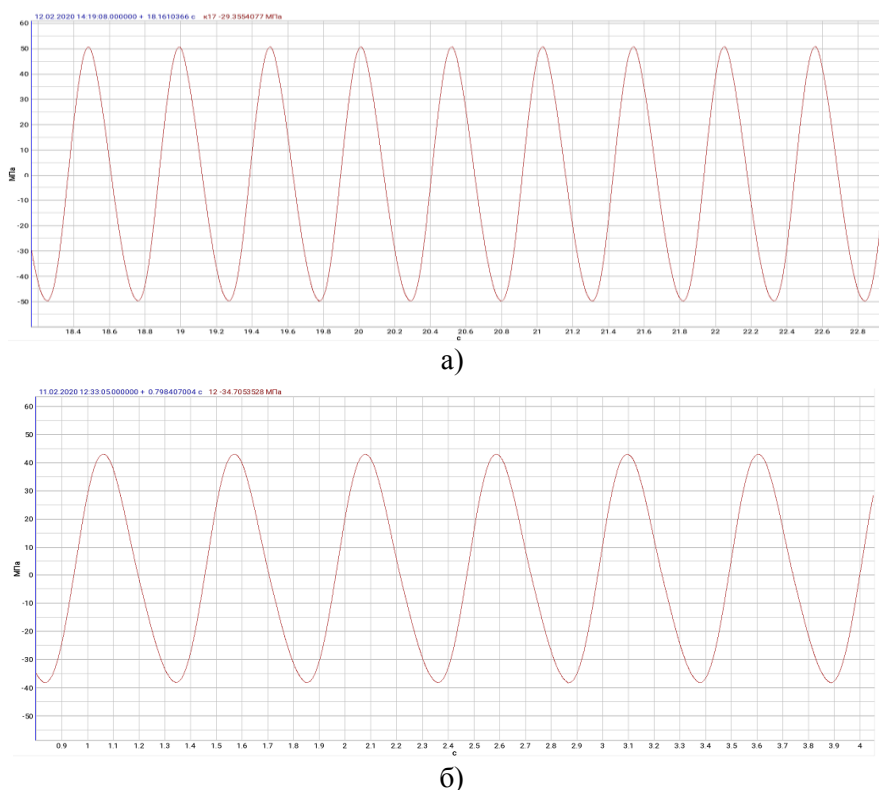


Рис. 6. Осцилограми випробувальних амплітуд під час проведення досліджень:
а – в центральному перерізі рами; **б** – в зоні виявлення тріщини

Таблиця 1. Результати досліджень з визначення коефіцієнта запасу опору втомі

Місце дослідження конструкції	Розрахунковий	Експериментальний	Нормативний допустимий
Хребтова балка, центральний переріз, нижній лист	1,3	1,150	$\geq 1,15$
Хребтова балка (зона виявлення тріщини)	1,35	1,196	$\geq 1,15$

Таким чином, складність конструкції довгобазного вагона-платформи, різноманіття експлуатаційних навантажень та значна кількість факторів, що впливають на втомну міцність, зумовлюють необхідність експериментального обґрунтування конструктивних рішень рами довгобазного вагона-платформи та оцінки точності теоретичних розрахунків шляхом проведення досліджень в умовах максимально наближених до експлуатаційних.

Висновки

1. Початкова конструкція довгобазного вагона -платформи мала недостатні міцносні якості, що підтвердилось за результатами експериментальних досліджень шляхом проведення вібраційних випробувань на втому. Найбільш слабкою виявилась центральна зона рами в круглих вікнах вертикального листа хребтової балки. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що коефіцієнт втомної міцності в цих зонах склав 50 % від допустимого значення.

2. Удосконалено початкову конструкцію рами довгобазного вагона-платформи в частині видалення отворів діаметром 600 мм біля змінної висоти перерізу хребтової балки, зміни діаметру отворів з 600 мм до 500 мм, технології виготовлення листа нижнього та верхнього хребтової балки цілісним товщиною 16 мм, збільшення товщини листа вертикального хребтової балки в центральній зоні з 8 мм до 10 мм.

3. Після удосконалення конструкції довгобазного вагона-платформи та проведення експериментальних досліджень встановлено, що мінімальне значення коефіцієнта втомленої міцності в центральній зоні складає 1,196, що задовольняє величині допустимого нормативного значення не менше 1,15.

4. Визначено фактичну міцність елементів конструкції рами довгобазного вагона-платформи, обрано раціональну конструкцію вагона-платформи, виявлено місця з недостатньої міцності та запропоновано варіанти перерозподілу навантажень в конструктивно-силовій схемі довгобазного вагона-платформи з метою запобігання втомному руйнуванню та забезпеченню необхідних умов експлуатаційної безпеки руху. До заходів щодо запобігання втомного руйнування відносяться раціональне конструювання з метою виключення концентраторів напружень, зварних швів у зоні значних напружень, вибір оптимальної форми сполучення несучих елементів, підвищення енергоємності демпфуючих вузлів, обґрунтований вибір міцності конструкційних матеріалів.

5. Доведено необхідність оцінки точності теоретичних розрахунків та експериментального обґрунтування конструктивних рішень рами довгобазного вагона-платформи шляхом проведення вібраційних випробувань на втому.

6. Складність конструкції довгобазних вагонів-платформ, різноманіття експлуатаційних навантажень і значна кількість факторів, що впливають на втомну міцність, актуалізують завдання щодо вдосконалення методів оцінки опору втомі рам довгобазних вагонів-платформ на стадії проектування.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на удосконалення методів оцінки опору втомі зварних з'єднань рам довгобазних вагонів-платформ на стадії проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуржи Н.Л. Поліпшення технічних характеристик секційного вагону-платформи шляхом вдосконалення конструкції : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.07 / Гуржи Наталія Леонідівна : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. Д., 2010. 20 с.

2. Третяк Е.В., Сулим А.О., Хозя П.О. Основні типи конструкцій довгобазних вагонів-платформ та дослідження їх міцносних характеристик. Збірник наукових праць "Рейковий рухомий склад", 2020. Вип. 20. С. 27–33.

3. Кельріх М. Б., Федосов-Ніконов Д. В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля, 2016. № 1 (225). С. 90 – 94.

4. Донченко А. В., Федосов-Ніконов Д. В. Методика розрахунково-експериментальних досліджень конструкції довгобазної платформи. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології, 2016. Вип. 28. С. 53 – 60.

5. Чепурной А. Д., Литвиненко А. В., Шейченко Р. И., Граборов Р. В., Чубань М. А. Ходовые прочностные и динамические испытания вагона-платформы. Вісник НТУ "ХПІ", 2015. Вип. 31 (1140). С. 111 – 128.

6. Panchenko S., Fomin O., Vatulia G., Ustenko O., Lovska A. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. №1(7(109)). P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>.

7. Fedosov-Nikonov D. V., Sulym A. O., Ilchyshyn V. V., Safronov O. M., Kelrikh M. B. Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 985. 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>

8. Shatunov O. V., Shvets A. O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2019. № 2 (80). С. 127 – 143. <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>

9. Фомін О. В., Ловська А. О., Рибін А. В. Дослідження повздовжньої навантаженості вагона-платформи з наповнювачем в несучій конструкції. Наукові вісті Давіського університету, 2021. №21. С. 1-7. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17>

10. Анисимов П. С., Петров Г. И. Пространственные колебания вагона-платформы. Мир транспорта, 2014. №2. С. 20 – 26.
11. А.С. № 264739. 42 К 21/01. Стенд для вибрационных испытаний вагонов / А.Е. Кохан, В.И. Пузырьков, В.И. Латышенко, М.Б. Кельрих и др. № 1275872/27-11. Заявлено 14.10.68; Опубл. 03.03.70. 1970. Открытия. Изобретения. Бюл. 9. 2 с.
12. Бороненко Ю.П., Кельрих М.Б., Дубинский В.А. Исследование работы вибрационной установки для испытаний несущих конструкций на долговечность. Научные труды ДИИТ, 1980. Вып. 210(2). С. 3.
13. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М., 2016. 54 с.
14. ГОСТ 33788-2016 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва, Стандартинформ, 2016. 46 с.
15. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
16. Степнов М.Н., Чернышев С.Л., Ковалев И.Е., Зинин А.В. Характеристики сопротивления усталости. Расчетные методы оценки. М.: Технология машиностроения, 2010. 256 с.
17. Елизаров С. В., Каптелин Ю. П., Кульгавий Я. К., Савкин Н. М. Сопротивление материалов. Основы теории. Примеры. Задачи: учеб. пособие. СПб.: ПГУПС, 2006. 400 с.

REFERENCES

1. Hurzhy, N.L. (2010). Polipshennia tekhnichnykh kharakterystyk sektsiinoho vahonu-platformy shliakhom vdoskonalennia konstrukttsii [Improving the technical characteristics of the sectional flat wagon by improving the design]. *Extended abstract of candidate's thesis. Dnipro: DNUZT* [in Ukrainian]
2. Tretiak, E.V., Sulym, A.O., & Khozia, P.O. (2020). Osnovni typy konstrukttsii dovhobaznykh vahoniv-platform ta doslidzhennia ikh mitsnosnykh kharakterystyk [The main types of structures of long-base flat wagons and the study of their strength characteristics]. *Zbirnyk naukovykh prats "Reikovy rukhomyi sklad" - Collection of scientific works "Railbound rolling stock"*, 20, 27–33 [in Ukrainian]
3. Kelrich, M. B., & Fedosov-Nikonov, D. V. (2016). Doslidzhennia na mitsnist konstrukttsii dovhobaznoi platformy [Research on the strength of the structure of a long-base platform]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 1(225), 90 – 94 [in Ukrainian]
3. Donchenko, A. V., & Fedosov-Nikonov, D. V. (2016). Metodyka rozrakhunkovo-eksperymentalnykh doslidzen konstrukttsii dovhobaznoi platformy [Methodology of calculation and experimental studies of the construction of a long-base platform]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tehnolohichnoho universytetu transportu. Seriya: Transportni systemy i tekhnolohii - Collection of scientific works of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Transport systems and technologies*, 28, 53 – 60 [in Ukrainian]
4. Shatunov, O. V., & Shvets, A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport - Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2(80), 127-143. <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>.
5. Chepurnoi, A. D., Lytvynenko, A. V., Sheichenko, R. Y., Hraborov, R. V., & Chuban, M. A. (2015). Khodovye prochnostnye y dynamicheskiye yspytanyia vahona-platformy [Running strength and dynamic tests of the platform car.]. *Visnyk NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI"*, 31(1140), 111 – 128. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17> [in Russian].
6. Panchenko, S., Fomin, O., Vatulia, G., Ustenko, O., & Lovska, A. (2021). Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(109)), 6-13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>.
7. Fedosov-Nikonov, D. V., Sulym, A. O., Ilchysyn, V. V., Safronov, O. M., Kelrich, M. B. (2020). Study of strength characteristics of the long wheelbase flat cars. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 985, 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012029>.
8. Shatunov O. V., & Shvets A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport - Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2(80), 127-143. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>.
9. Fomin, O. V., Lovska, A. O., Rybin, A. V. (2021). Doslidzhennia povzdovzhnoi navantazhenosti vahona-platformy z napovniuvachem v nesuchii konstrukttsii [Research of the longitudinal loading of a flat wagon with filler in the load-bearing structure]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu - Scientific news of Dahl University*, 21, 1-7. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-17> [in Ukrainian].
10. Anisimov, P. S., & Petrov, G. I. (2014). Prostranstvennye kolebaniya vagona-platformy [Spatial oscillations of the flat wagon]. *Mir transporta - World of Transport*, 2, 20 – 26 [in Russian].
11. Kokhan A.Ye., Puzyrkov V.I., Latsyhenok, Kelrich M.B. et al. (1970). Vibration test stand. No. 1275872/27-11. Certificate of authorship No. 264739. 42 K 21/01. Appl. October 14, 1968. Publ. March 3, 1970. *Discoveries. Inventions*, 9 [in Russian].

12. Boronenko, Yu.P., Kelrich, M.B., & Dubinskiy V.A. (1980). Study of the operation of vibration installation for testing of the load-bearing structures for durability. *Scientific works of DIIT*, 210(2), 3 [in Russian].
13. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities] (2016). *GOST 33211-2014*. Moscow [in Russian].
14. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities]. (2016). *GOST 33788-2016*. Moscow: Standartinform [in Russian]
15. Terent'ev, V.F. (2003). Ustalost' metallicheskih materialov [Fatigue of metallic materials]. *Moscow: Nauka* [in Russian].
16. Stepnov, M.N., Chernyshev, S.L., Kovalev, I.E., & Zinin, A.V. (2010). Charakteristiki soprotivleniya ustalosti. Raschetnye metody ocenki [Fatigue resistance characteristics. Estimation technique]. *M.: Tekhnologiya mashinostroeniya – M: Machine-building technology* [in Russian].
17. Elizarov, S.V., Kaptelin, Yu.P., Kul'gavij, Ya. K., Savkin, N. M. (2006). Soprotivlenie materialov. Osnovy teorii. Primery. Zadachi [Strength of materials. Fundamentals of the theory. Examples. Tasks]. *Saint-Petersburg.: PGUPS* [in Russian].

Andrii Sulym^{1*}, Oleh Orlov²

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

² Researcher of the research laboratory, Research laboratory of experimental studies of railway technics, State Enterprise " Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute", 33 I. Prykhodka St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRENGTH OF A LONG BASE FLAT WAGONS BY CARRYING OUT ENDURANCE CYCLIC FATIGUE TESTS

The need for experimental validation of structural solutions concerning the frame of long-base flat wagon and assessment of the accuracy of theoretical calculations by carrying out resource cyclic fatigue tests based on the results of the recent studies analysis in the research of the strength of long-base flat wagons, was established. The methodology for carrying out resource cyclic fatigue tests of a long-base flat wagon is presented. The results of theoretical studies on determining the strength of a long-base flat wagon are described. The results of experimental studies of endurance cyclic fatigue tests of the frame of a long-wheelbase flat wagon before and after structural improvement are shown. Structural changes and improvements of the frame of the long-base flat wagon at the stage of experimental endurance cyclic fatigue tests are presented. The place of initiation and development of a crack in the structure of the frame of a long-base flat wagon is shown. Based on the results of the research, the actual strength of the elements of the wagon structure was determined and the design of the long-base flat wagon was chosen in order to prevent fatigue failure and ensure the required operational safety. The need to improve the evaluation methods of fatigue strength of welded joints of the long-wheelbase flat wagons frames at the design stage has been proven.

The content of the article will contribute to the construction of new models of long-base flat wagons for mainline railway and the modernization of existing models, as well as to increase their strength and service life while in operation.

Keywords: *fatigue test, endurance limit, long-base flat wagon, fatigue strength safety factor, strength, service life.*

УДК 629.5

Сергій Тараненко¹, Світлана Голубєва^{2*}

¹ Доцент, Кафедра електрообладнання та автоматики водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9320-2514>

² Старший викладач, Кафедра суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8285-7566>

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

ВИКОРИСТАННЯ «ДЕРЕВА ВІДМОВ» ЯК ЛОГІКО-ІМОВІРНІСНОГО МЕТОДУ АНАЛІЗУ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Незважаючи на успіхи в дослідженнях та розробці конструкцій сучасних електродвигунів для промислових підприємств різного призначення, зокрема суднові електродвигуни, досі не створено надійних методик для визначення причин їх відмов, а застосування на практиці відомих методик, у тому числі діагностики технічного стану двигунів, не лише вимагає великої трудомісткості та високої кваліфікації персоналу, але й у багатьох випадках фактично неефективні. Особливо це стосується важких експлуатаційних пошкоджень, що виникають при руйнуванні деталей і супроводжуються порушенням синхронізації їх поворотно-поступального та обертального руху. З іншого боку, виконане дослідження показує, що причини несправностей та відмов електродвигунів можуть визначатися і логіко-імовірнісними методами, у тому числі на основі аналізу дерева відмов, із залученням результатів досліджень різноманітних несправностей. Шляхом структурування ознак відмов було складено дерево відмов, що логічно описує причинно-наслідкові зв'язки між подією відмови і початковим пошкодженням, що викликало його, окремо по кожному з обраних для аналізу видів відмов, пов'язаних з важкими пошкодженнями електродвигунів досліджуваного типу. В результаті використання дерева відмов на практиці можливо визначити причини відмови електродвигунів та електродвигунів з автоматичними системами управління з достатньою достовірністю за мінімальними витратами часу.

Ключові слова: електродвигун, несправність, відмова, логічний метод, дерево відмов, система управління.

Вступ. У 1961 р. Х.А. Уотсон із «Белл телефону» запропонував метод аналізу надійності з використанням дерева відмов для систем управління міжконтинентальними ракетами «Мінітмен». Надалі Д.Ф. Хаасль розвинув цю методику широкого кола технічних проблем, які стосуються надійності. Головна перевага дерева відмов у порівнянні з іншими методами – аналіз обмежується виявленням тільки тих елементів системи та подій, що призводять до даної конкретної відмови системи чи аварії [1].

Щоб відшукати і наочно представити причинний взаємозв'язок за допомогою дерева відмов, необхідні елементарні блоки, які підрозділяються і зв'язують велику кількість подій.

У проведенні аналізу дерева відмов реалізовано дедуктивний метод (причини-наслідки), що дає найбільш серйозні можливості щодо пошуку кореневих причин подій для статичних

систем, оскільки дає наочну і докладну схему взаємозв'язків елементів інфраструктури та подій, що впливають на їх надійність.

Використання дерева відмов полягає в такому[2]:

аналіз орієнтується на знаходженні відмов;

дає змогу виявити ненадійні місця;

забезпечується графікою і є наочним матеріалом для тієї частини інженерно-технічних фахівців, які беруть участь в обслуговуванні системи;

дає можливість виконувати якісний або кількісний аналіз надійності системи;

дає можливість фахівцям по черзі зосереджуватися на окремих конкретних відмовах системи;

забезпечує глибоке уявлення про поведінку системи і проникнення в процес її роботи;

є засобом спілкування фахівців, оскільки вони представлені в чіткій наочній формі;

допомагає дедуктивно виявляти відмови;

дає конструкторам, користувачам та керівникам можливість наочного обґрунтування конструктивних змін або встановлення ступеня відповідності конструкції системи заданим вимогам і аналізу компромісних рішень;

полегшує аналіз надійності складних систем тощо.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Метод аналізу за допомогою дерева відмов є найефективнішим для усунення причин відмов. Дерево відмов (аварій, подій, наслідків небажаних подій та ін.) лежить в основі логіко-імовірнісної моделі причинно-наслідкових зв'язків відмов системи (як виду прояву небезпеки) з відмовами її елементів та іншими подіями (впливами). При аналізі виникнення відмови системи (події) подія представляється послідовністю і комбінацією порушень і несправностей, і таким чином вона є багаторівневою графологічною структурою причинних взаємозв'язків, отриманих в результаті простеження динаміки розвитку небезпечних ситуацій у зворотному порядку, щоб знайти можливі причини їх виникнення.

Метод дерева відмов, як і будь-який інший, має певні переваги та недоліки. Так, наприклад, метод дає уявлення про поведінку системи, але вимагає від фахівців з надійності глибокого розуміння системи та конкретного розгляду щоразу лише однієї певної відмови; допомагає дедуктивно виявляти відмови; дає конструкторам, користувачам та керівникам можливість наочного обґрунтування конструктивних змін та аналізу компромісних рішень; дозволяє виконувати кількісний та якісний аналіз надійності; полегшує аналіз надійності складних систем. Водночас реалізація методу потребує значних витрат коштів та часу.

Крім того, отримані результати важко перевірити і важко врахувати стан часткової відмови елементів, оскільки при використанні методу, як правило, вважають, що система знаходиться або у справному стані, або в стані відмови. Суттєві труднощі виникають і при отриманні в загальному випадку аналітичного рішення для дерев, що містять резервні вузли та відновлювані вузли з пріоритетами, не кажучи вже про значні зусилля, які потрібні для охоплення всіх видів множинних відмов [3].

У літературі на даний час застосовують метод дерева відмов для структурного аналізу об'єктів [4,5,6]. Аналіз дерева відмов є поширеним методом моделювання надійності складних технічних систем, які зазвичай виконуються на стадії їх проектування [7].

Аналіз наукових джерел щодо діагностики технічного стану складних технічних систем вказує на поширене використання так званого «дерева відмов». В цьому дереві візуалізуються та систематизуються причинно-наслідкові зв'язки між відмовами технічних систем. Таке широке використання дерева відмов пов'язане в тому числі і з підвищенням ефективності технічних систем, а отже може бути застосовано і для аналізу відмов судових електродвигунів та судових електродвигунів з автоматичними системами управління. Очевидно, що відпрацьовані методики побудови дерева відмов можуть привести до поліпшення процесу

прийняття рішень щодо усунення несправностей та оптимізації інтелектуальних систем управління.

Мета і завдання дослідження. Розробка методики логічного визначення причин несправностей та відмов електродвигунів під час їх експлуатації, у тому числі з автоматичними системами управління, що застосовується не лише фахівцями експертного рівня, а й середньої кваліфікації.

Для досягнення поставленої мети використано логіко-імовірнісний метод аналізу дерева відмов. Для цього потрібно побудувати дерево відмов і оцінити його, а потім треба вжити відповідних заходів, щоб усунути чи зменшити причину відмов і, таким чином, уникнути зупинки установок. Результати розрахунків впливу та щільності відмов можуть бути використані при проектуванні та експлуатації суднових електричних приводів.

Матеріали та методи дослідження. Для вирішення завдання було застосовано метод аналізу дерева відмов (Fault Tree Analysis – FTA) – це багаторівнева графологічна структура (граф) причинних взаємозв'язків у системі, отриманих внаслідок простеження небезпечних ситуацій, щоб знайти можливі причини їх виникнення. На рис. 1 наведена схема побудови дерева відмов [2].

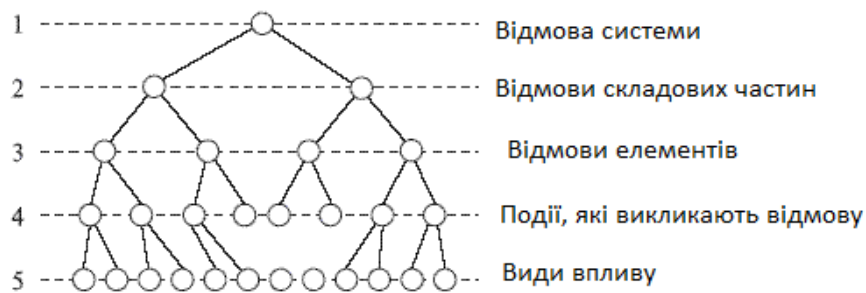


Рис. 1. Схема побудови дерева відмов

Побудова дерева відмов електродвигуна, що розглядається, була виконана в кілька послідовних наближень [8]:

- 1) визначення можливих джерел, причин та ознак несправностей для даного об'єкта;
- 2) деталізація та структурування ознак та причин відмов за виділеними блоками (вузлами) об'єкта з їх докладним описом;
- 3) складання прямого дерева відмов об'єкта з основних причин несправностей.

Слід зазначити, що даний вид логічного аналізу не передбачає будь-яких розрахунків ймовірності відмови, як це зазвичай прийнято при оцінці надійності об'єктів, що проектуються, – апіорі передбачається, що такий аналіз вже був виконаний розробником при проектуванні об'єкта. Тоді, якщо припустити, що в експлуатації відмова вже трапилася, основним завданням логічного аналізу дерева відмов буде не виведення формул для розрахунку ймовірності виникнення, а логічний пошук самої причини відмови, що вже відбулася [7].

Побудова логічного графа дерева відмов електродвигуна. Асинхронні двигуни (АД) становлять до 80% всього електричного навантаження судна. При цьому асинхронне навантаження можна поділити на дві основні групи. Перша група, підключена до розподільного щита, є двигунами приводів, що обслуговують головну енергетичну установку, судову електростанцію та невеликий ряд механізмів різного призначення. Друга група, що позначає потужні приводи баластових насосів, станцій гідравліки та вантажних насосів. Електродвигуни другої групи значно відрізняються від двигунів першої групи за своїми параметрами, але основні причини виходу з експлуатації АД однакові.

Трифазні АД є найбільш масовою продукцією електромашинобудування, проте їх надійність недостатня. Основним видом відмови суднових електродвигунів є пошкодження його обмотки, що потребує капітального ремонту [9].

Дерево відмов АД представлено на рис. 2, в якому показані відмови чотирьох основних елементів, відмова, одного з яких, згідно з деревом, веде до відмови АД. Дуже цікавою виявляється побудова дерева відмов для автоматизованих електроприводів. Перспективним виявляється використання частотного регулювання. На рис. 3 – 5 показано коротке дерево відмов АД з перетворювачами частоти (ПЧ), самого ПЧ та системи управління (СУ) АД з ПЧ.

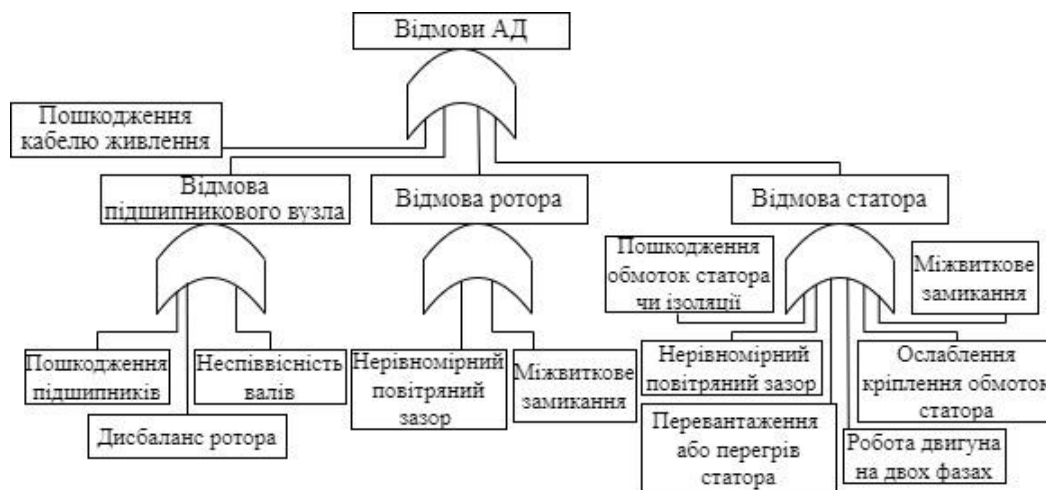


Рис. 2. Дерево відмов АД

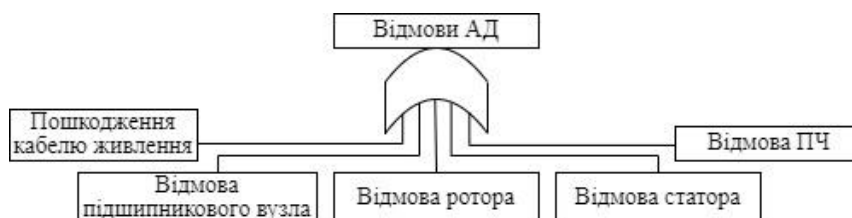


Рис. 3. Дерево відмов АД з ПЧ

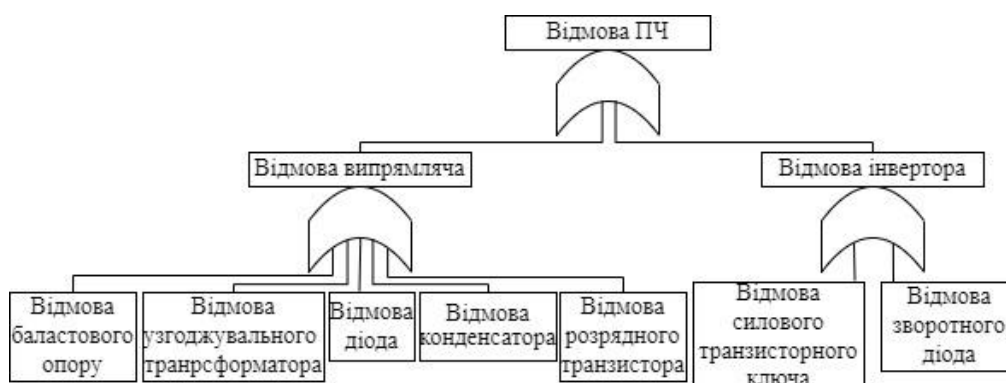


Рис. 4. Дерево відмов ПЧ

Слід зазначити, більшість достовірних даних про відмови можна отримати лише експертним шляхом.

Виконаний аналіз підтверджує висновок, що зі збільшенням кількості елементів досліджуваної системи її загальна надійність неминуче знижується. Тобто, загальна ймовірність відмови СУ АД з частотним управлінням буде вищою за ймовірність відмови СУ АД з нерегульованими механізмами. Завдання в цьому випадку полягає в тому, щоб звести цю різницю до мінімуму, підвищити надійність перетворювача частоти в існуючих умовах роботи на судах, а також знизити його вплив на інші елементи системи.

Перетворювачі частоти на судах використовують для живлення та управління електродвигунами гребних електричних установок (ГЕУ), судових електроприводів, технологічних механізмів та встаткування та ін.

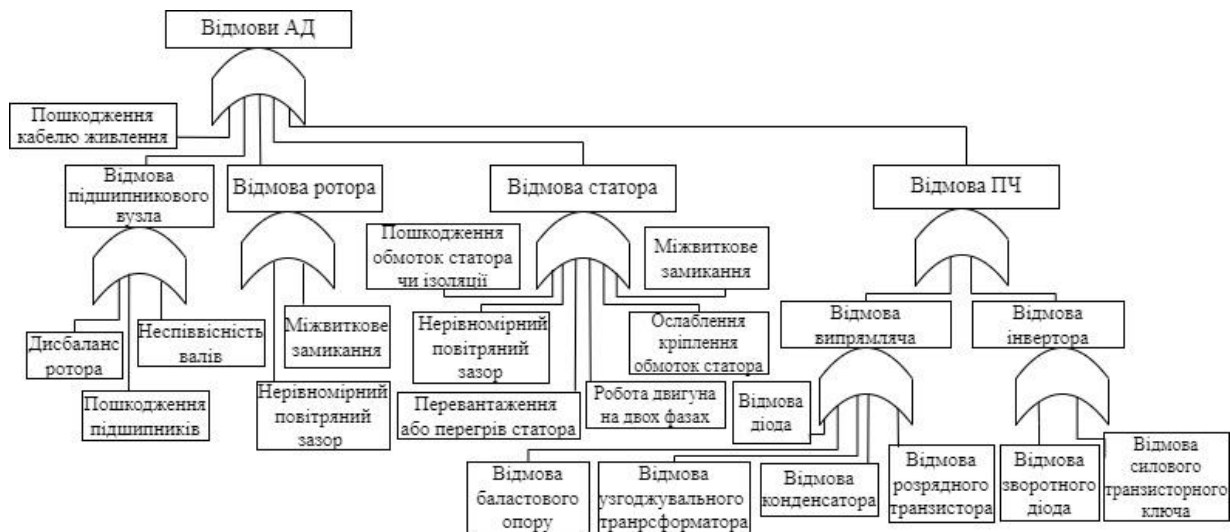


Рис. 5. Дерево відмов СУ АД з ПЧ

На рис. 6, а представлено дерево відмов, характерне для судових насосів (зокрема баластних, вантажних насосів), виконаних за існуючою схемою, не оснащених ПЧ. У разі виконання за системою ПЧ-АД дерево відмов набуває вигляду, представленого на рис. 6, б. Аналогічні дерева відмов можна отримати інших механізмів з електродвигунами на судах.

Під час проведення вантажних операцій та при русі судна для попередження виникнення небезпечних ситуацій використовуються автоматичні системи баластування та кренування. Баластна система призначена для прийому в цистерни водяного баласту, перекачування і видалення його з судна з метою зміни осадки і остійності судна. При проведенні баластних операцій виникає низка проблем як технічного, так і екологічного характеру.

Таким чином, питання підвищення ефективності функціонування устаткування для прийняття та обробки баластних вод є актуальним, так само, як і раціональний вибір відповідного обладнання при проектуванні або модернізації суден.

При проведенні операцій зміни баласту найбільш відповідальною ланкою є саме баластний насос, від ефективності функціонування якого в значній мірі залежить час проведення баластних операцій. Проведені дослідження показали, що подача баластного насоса може змінюватися в широких межах і при збільшенні призводити до значного зростання споживаної потужності.

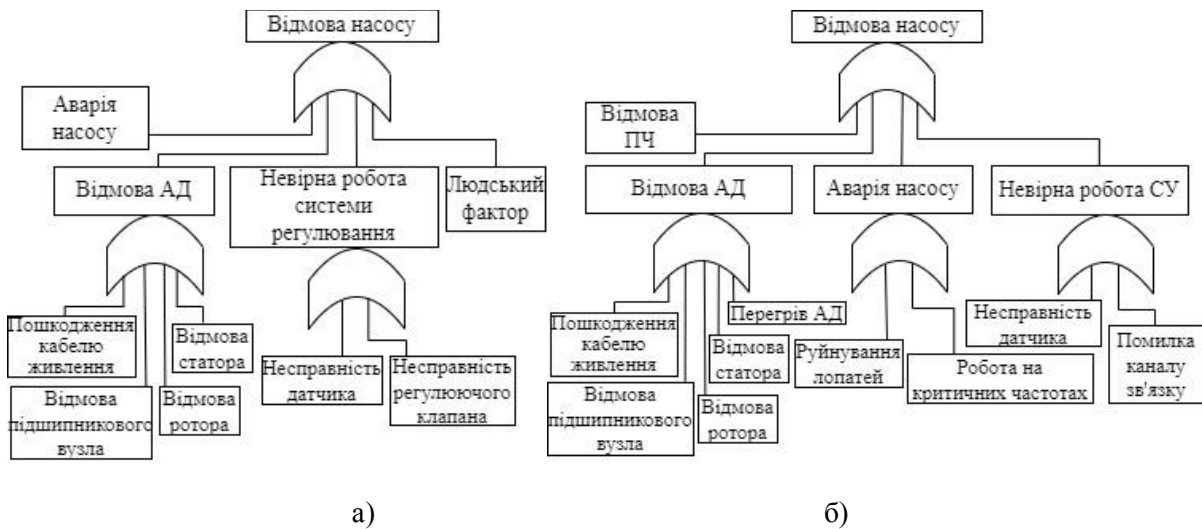


Рис. 6. Дерева відмов мережевого, рециркуляційного насосів

без частотного регулювання (а) та оснащених частотно-регульованим електроприводом (б)

Підвищення ефективності функціонування насосу можливе за рахунок впровадження керованого електроприводу, в якому регульованим параметром є максимальний натиск рідини. Як регульований електропривод баластного насоса передбачається використання електроприводу з живленням від частотних перетворювачів фірми Stromberg [10].

Стабілізація напору рідини здійснюється за рахунок того, що при зменшенні тиску напір в мережі збільшується, а частота обертання електродвигуна насоса в результаті дії системи регулювання зменшується.

Частотне управління приводом насоса баластної системи забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а механічні характеристики мають високу жорсткість [11].

Застосування пристроїв плавного регулювання частоти обертання двигунів в насосних агрегатах, крім економії електроенергії, дає ряд додаткових переваг, а саме: плавний пуск і зупинка двигуна виключає шкідливий вплив перехідних процесів (типу гідравлічний удар) в напірних трубопроводах і технологічному обладнанні; пуск двигуна здійснюється при струмі, обмеженому на рівні номінального значення, що підвищує довговічність двигуна, знижує вимоги до потужності мережі і комутуючої апаратури; можлива модернізація діючих технологічних агрегатів без заміни насосного обладнання [12].

Розглянемо аналогічним способом дерево відмов двигунів постійного струму (ДПС) (рис. 7) та тиристорного перетворювача (рис. 8).

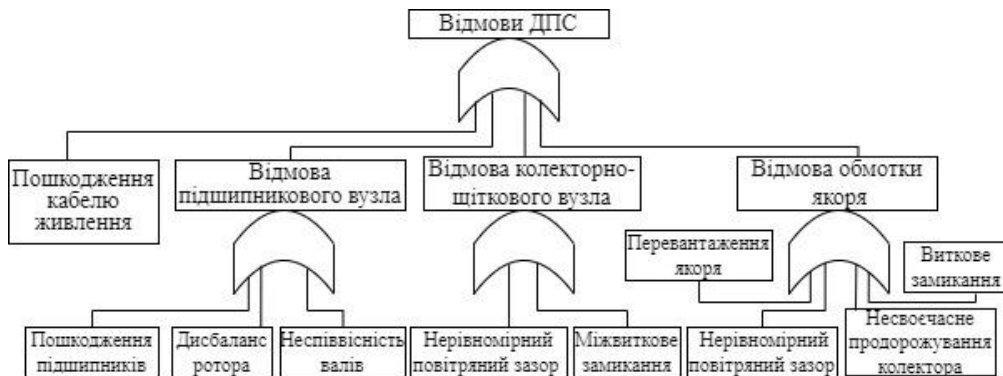


Рис. 7. Дерево відмов ДПС



Рис. 8. Дерево відмов тиристорного перетворювача електроприводу

Вибір такого напрямку пояснюється такими причинами:

основну частку вартості ЕП становить вартість електродвигуна і силових напівпровідникових елементів, тоді як заміна лише системи управління має дати швидкий економічний ефект за рахунок збільшення надійності і поліпшення якості регулювання;

двигуни постійного струму та основна частина силових тиристорних блоків не виробили свій ресурс і можуть перебувати в експлуатації.

Побудуємо дерево відмов у разі управління ДПС за допомогою тиристорного перетворювача (ТП) (рис. 9).

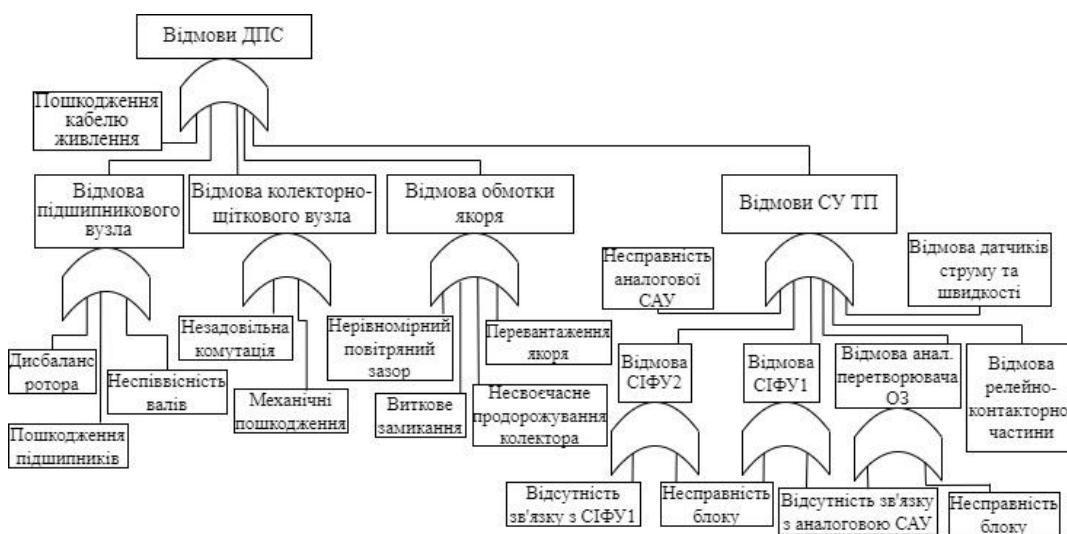


Рис. 9. Дерево відмов ДПС з ТП

Висновки. Залежно від конкретних цілей аналізу дерева можуть бути побудовані для будь-яких видів відмов – первинних, вторинних та ініційованих відмов.

Метод аналізу дерева відмов сприяє ретельному аналізу причин відмов технічних систем та вироблення заходів, найбільш ефективних для їх усунення. Такий аналіз проводять кожного періоду функціонування, кожної частини чи системи загалом.

Розроблено дерева відмов для АД та ДПС, а також їх систем управління, що дозволяє у явному вигляді визначати вразливі елементи двигунів та модернізувати їх. Дерева відмов мають наочність, що робить їх зручним і надійним інструментом у роботі.

На основі оцінки дерева відмов можна визначити появу події, яка може призвести до небажаного порушення роботи. Потрібно побудувати дерево відмов та оцінити його, а потім треба вжити заходи, щоб усунути чи зменшити причину відмов і, таким чином, уникнути зупинки установок.

Подальші дослідження в розробці методик визначення причин несправностей логічними методами можуть бути спрямовані на відпрацювання структури логічних графів для охоплення ширшого спектра можливих несправностей та відмов.

ЛІТЕРАТУРА

1. Санталова Г.О. Безпека життєдіяльності: метод. вказів. до організації самост. роботи ст. усіх спец. ден. та заоч. форм навч. Краматорськ: ДДМА, 2014. 48 с.
2. Копей Б.В., Копей В.Б., Мартинець О.Р., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Використання «дерева відмов» як методу структурного аналізу штангової насосної установки. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2013. № 2(47). С. 62-71.
3. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.
4. FTA. Дерево отказов, как метод структурного анализа. URL: <https://inlnk.ru/NDMjxP> (дата звернення: 28.10.2022).
5. Техническая диагностика механического оборудования/ В.А. Сидоров и др. Донецк: Новый мир, 2003. 125 с.
6. Zhanyu Ge. Statistical analysis of sucker rod pumping failures in the Permian basin: thesis in Petroleum Engineering. Texas Tech University. Texas, 1998. 156 p.
7. Хрулев А.Э., Клименко В.Г. Особенности построения и применения логических методов поиска причин отказов поршневых двигателей внутреннего сгорания в эксплуатации. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2020. № 7(167). С. 146-157.
8. Хрулев А.Э. Использование логико-вероятностных методов для определения причин отказов турбокомпрессоров в эксплуатации ДВС. Автомобиль и электроника. Сучасні технології, 2019. № 16. С. 5-18. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2019.16.0.5>.
9. Тараненко С.В., Голубева С.М. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. Водний транспорт, 2021. № 2(33). С. 5-12. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01>.
10. Аврамов О.С., Колебанов О.К. Система управління баластними насосами контейнеровоза CMG CMA HERODOTE. // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства: Матеріали VIII Всеукраїнської студ. наук. конф. м. Херсон, 22 лист. 2018 р. Херсон: Видавництво ХДМА, 2018. Том. 2. С. 11-13.
11. Seascope BWMS Ballast Water Treatment System. URL: <https://inlnk.ru/BpLJL1> (дата звернення: 28.10.2022).
12. Бруд А.С., Колебанов О.К. Дослідження можливості застосування електроприводу для модернізації вантажної системи танкера. Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства: Матеріали VIII Всеукраїнської студ. наук. конф. м. Херсон, 22 лист. 2018 р. Херсон : Видавництво ХДМА, 2018. Том. 2. С. 48-50.
13. Губаревич О.В., Голубева С.М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. Наукові праці Донецького національного технічного університету, 2019. №1(21). С. 55-63. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>.
14. Кравченко В.М., Сидоров В.А. Визуальное диагностирование механического оборудования: підручник. Донецк: ООО Юго-Восток, ЛТД, 2004. 120 с.
15. Чупейкина Н.Н., Удодова Э.О. Виды отказов асинхронных двигателей, их признаки, причины и методы устранения. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2006. №10. С. 284-329.

REFERENCES

1. Santalova, H.O. (2014). Bezpeka zhyttiediiialnosti [Life safety]. *Kramatorsk: DDMA* [in Ukrainian].
2. Kopey, B.V., Kopey, V.B., Martinets, O.R., Stefanishin, O.I. & Stefanishin, A.B. (2013). Vykorystannia «dereva vidmov» yak metodu strukturnoho analizu shtanhovoi nasosnoi ustanovky [Using the "fault tree" as a method of structural analysis of a sucker-rod pumping unit]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch – Exploration and Development of Oil and Gas fields*, 2(47), 62-71 [in Ukrainian].
3. Dillon, B. (1984). *Inzhenernyie metodyi obespecheniya nadezhnosti system* [Engineering Methods for Ensuring System Reliability]. (Ch. Singh, Trans). Moscow: Mir [in Russian].
4. FTA. Derevo otkazov, kak metod strukturnoho analiza [Fault tree as a way of structural analysis]. *intellect.icu*. Retrieved from <https://inlnk.ru/NDMjxP>.
5. Sidorov, V.A., Kravchenko, V.M., Sedush, V.Ya. & Oshovskaya, E.V. (2003) *Tekhnicheskaya diagnostika mekhanicheskogo oborudovaniya* [Technical diagnostics of mechanical equipment]. Donetsk: Novyyiy mir [in Russia].

6. Zhanyu, Ge. (1998) Statistical analysis of sucker rod pumping failures in the Permian basin. *Thesis in Petroleum Engineering*. Texas: Texas Tech University.
7. Hrulev, A.E. & Klimenko, V.G. (2020) Osobennosti postroeniya i primeneniya logicheskikh metodov poiska prichin otkazov porshnevnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya v ekspluatatsii [Features of the construction and application of logical methods for searching for the causes of failures of reciprocating internal combustion engines in operation]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace engineering and technology*, 7(167), 146-157 [in Ukrainian].
8. Hrulev, A.E. (2019) Ispol'zovanie logiko-veroyatnostnykh metodov dlya opredeleniya prichin otkazov turbokompressorov v ekspluatatsii DVS [The use of logical-probabilistic methods to determine the causes of failures of turbochargers in the operation of internal combustion engines]. *Avtomobil y elektronika. Suchasni tekhnolohii – Automobile and electronics. Modern technologies*, 16, 5-18 [in Russian]. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2019.16.0.5>.
9. Taranenko, S.V. & Golubieva, S.M. (2021) Analiz pokaznykh nadiinosti sudnovykh elektrodvyhunyv, shcho vykorystovuiutsia u suchasnomu sudnovomu obladnanni [Analysis of the reliability indicators of marine electric motors used in modern ship equipment]. *Vodnyi transport – Water transport*, 2(33), 5-12 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01>.
10. Avramov, O.S. & Kolebanov, O.K. (2018) Systema upravlinnia balastnymy nasosamy konteinerovoza CMG CMA HERODOTE [Ballast pump control system for container ship CMG CMA HERODOTE]. *VIII Vseukrainska studentska naukova konferentsiia «Suchasni problemy morskoho transportu ta bezpeka moreplavstva» – VIII All-Ukrainian Student Scientific Conference «Modern problems of maritime transport and safety of navigation»*. (Vol. 2), (pp. 11-13). Kherson: Vydavnytstvo KhDMA [in Ukrainian].
11. Seascope BWMS Ballast Water Treatment System. *elit-engine.ru*. Retrieved from <https://inlnk.ru/BpLJL1>.
12. Brud, A.S. & Kolebanov, O.K. (2018) Doslidzhennia mozhlivosti zastosuvannya elektropryvodu dlia modernizatsii vantazhnoi systemy tankera [Study of the possibility of using an electric drive for the modernization of the cargo system of a tanker]. *VIII Vseukrainska studentska naukova konferentsiia «Suchasni problemy morskoho transportu ta bezpeka moreplavstva» – VIII All-Ukrainian Student Scientific Conference «Modern problems of maritime transport and safety of navigation»*. (Vol. 2), (pp. 48-50). Kherson: Vydavnytstvo KhDMA [in Ukrainian].
13. Gubarevych O.V., Golubieva S.M. Analiz metodiv diahnozyky tekhnichnoho stanu izoliatsii asynkronnykh dyvhunyv [Analysis of methods for diagnosing the technical condition of the insulation of asynchronous motors]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific works of Donetsk National Technical University*, 1, 55-63 [in Ukrainian].
14. Kravchenko, V.M., & Sydorov, V.A. *Vyzualnoe dyahnostyrovanye mekhanicheskoho oborudovanyia [Visual diagnostics of mechanical equipment]*. Donetsk: OOO Yugo-Vostok, LTD [in Russian].
15. CHupejkina, N.N., & Udodova, E.O. Vidy otkazov asinhronnykh dvigatelej, ih priznaki, prichiny i metody ustraneniya [Types of failures of asynchronous motors, their signs, causes and methods of elimination]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' – Mining Information and Analytical Bulletin*, 10, 284-329 [in Russian].

Sergey Taranenko¹, Svitlana Golubieva^{2*}

¹Associate Professor, Department of Electrical Equipment and Automation of Water Transport, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9320-2514>

²Senior Lecturer, Department of Ship Power Plants, Auxiliary Machinery and Their Operations Transport, The State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska street, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8285-7566>

* **The corresponding author:** glbvnu@gmail.com

USING THE FAULT TREE AS A LOGICAL-PROBABILISTIC METHOD FOR ANALYSIS OF SHIP ELECTRIC MOTORS

Despite the progress in research and development of designs of modern electric motors for industrial enterprises for various purposes, including marine electric motors, reliable methods for determining the causes of their failures have not yet been created, and the application of well-known methods in practice, including diagnosing the technical condition of engines, not only requires a lot of labor and highly qualified personnel, but in many cases it is actually inefficient. This is especially true of severe operational damage arising from the destruction of parts and accompanied by a violation of

the synchronization of their reciprocating and rotational motion. On the other hand, the performed study shows that the causes of malfunctions and failures of electric motors can also be determined by logical and probabilistic methods, including on the basis of fault tree analysis involving the results of research on various faults. By structuring the signs of failures, a failure tree was compiled that logically describes the cause-and-effect relationships between the failure event and the initial damage that caused it separately for each of the failure modes selected for analysis associated with severe damage to the electric motors of the type under study. As a result of using the fault tree in practice, it is possible to determine the causes of failure of electric motors and electric motors with automatic control systems with sufficient reliability and minimal time.

Keywords: *electric motor; malfunction; refusal; logical method; fault tree, control system.*

Олександр Голота^{1}, Сергій Плакін², Юрій Шкіль³*

- ¹ Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0282-2767>
- ² Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>
- ³ Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

*Автор, відповідальний за листування: sashagolota3012@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ МАГНІТОПЛАНУ ВІДНОСНО КОЛІЙНОЇ СТРУКТУРИ

У статті запропоновано спосіб визначення положення екіпажу магнітоплану завдяки використанню методу далекометрії. Основу розробленої ідеї складає використання випромінювачів за допомогою яких можна реєструвати обертальні рухи екіпажу (тангаж і нишпорення), а також здійснювати реєстрацію крену. За результатами проведених досліджень, в роботі обґрунтовано таке: фазова далекометрія з одним випромінювачем на платформі екіпажу дозволяє визначати положення екіпажу на перегоні, його зміщення в горизонтальній площині щодо поздовжньої осі колійної структури та висоту підвісу між днищем екіпажу і шляхопроводом, а наявність трьох випромінювачів дозволять реєструвати три обертальні рухи (тангаж, нишпорення та крен).

Новизна роботи полягає в обґрунтуванні способу безперервного позиціонування високошвидкісного магнітолевітуючого транспортного засобу по 6-ти ступенях свободи на основі фазової далекометрії для довільної конфігурації в тривимірному просторі фіксованого шляхопроводу та цілісності навігаційної системи.

Розглянутий метод навігації призначений для використання в високошвидкісних транспортних наземних системах на магнітному підвісі, організації автоматизованого управління рухом колісним транспортом на локальних майданчиках виробничого призначення, організації швидкісного малорозмірного муніципального транспорту індивідуального користування.

***Ключові слова:** магнітоплан, магнітний підвіс, рухома платформа, центр ваги, фазова далекометрія.*

Вступ. Високошвидкісний наземний транспорт на магнітному підвісі є одним із пріоритетних напрямів розвитку досліджень у транспортній науці [1]. Для адекватного управління цим видом транспорту необхідна прецизійна система управління його рухом, що ґрунтується на точному визначенні його розташування щодо колійного полотна [2]. Сучасні навігаційні системи повною мірою не відповідають вимогам позиціонування з урахуванням специфіки високошвидкісного наземного транспорту, зокрема, швидкодії, а в деяких випадках і безперервній роботі цілої системи [3], тому пошук нових підходів до вирішення цього завдання є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Один із можливих підходів полягає у застосуванні методу вимірювання фазових співвідношень сигналів від двох синхронізованих генераторів високої стабільності: «опорного», розташованого в початковому або кінцевому пункті інтервалу руху, та «інформаційного», розташованого на самому транспортному засобі

(магнітоплані, екіпажі). Сигнали від обох генераторів по роздільних лініях (радіовипромінюючі кабелі, leaky feeder [4, 5]) зв'язку надходять в диспетчерський пункт управління рухом, де вимірюється різниця фаз цих сигналів, яка є функцією відстані між пунктом управління рухом і транспортним засобом, що рухається, з «інформаційним» генератором на борту, тобто однозначно визначає координати положення екіпажу на відповідному інтервалі руху [6].

Однак для керування рухом транспортного засобу диспетчерський пункт повинен мати інформацію не лише про місцезнаходження його щодо кінцевих пунктів пересування, а й про його просторове положення щодо шляхопроводу (guideway), що потрібно для контролю просторового коливання, навантаження, стійкості левітаційного руху [7]. Визначення параметрів орієнтації рухомого засобу можливе методом фазової далекометрії, якщо на рухомому засобі встановити два синхронізовані з першим генератором «інформаційних» генераторів (маркера), а з кожної сторони вздовж колійної структури розташувати по два просторово рознесених радіовипромінюючих кабелі. При такій конструкції по вимірних фазових співвідношеннях «опорного» та «інформаційного» сигналів в чотирьох радіовипромінюючих кабелів можливе однозначне визначення положення кожного «інформаційного» генератора в системі координат чотирьох кабелів. Сигнал від «опорного» генератора надходить п'ятим кабелем. З огляду на те, що генератори жорстко пов'язані з транспортним засобом, їх координати визначають як місцезнаходження, так і просторову орієнтацію транспортного засобу.

Мета і завдання дослідження. Метою та завданням даного дослідження є вдосконалення системи управління рухом магнітоплану з можливістю визначення його розташування відносно колійного полотна. Основою роботи є визначення можливості застосування методу фазової далекометрії для системи керування високошвидкісним наземним транспортом.

Матеріали та методи дослідження. Розглянемо математичну модель визначення просторового становища рухомої платформи за умов фіксованої колійної структури. У разі жорсткого одновагонного екіпажу основним оперативним параметром є центр ваги (ЦВ) – точка застосування рівнодіючої сили ваги всіх його частин та вантажів. ЦВ може зміщуватися по осях екіпажу залежно від розташування вантажів та наповненості пасажирями. Зміщення ЦВ по поздовжній осі екіпажу впливає на його комфортний рух (рівновагу, стійкість та керованість) та визначає центрування екіпажу. Зміщення ЦВ по вертикальній осі на комфортність пасажирів впливає незначно. Для поїзда з кількох вагонів рух ЦВ ускладнюється внаслідок гнучких механічних зв'язків між ними. Під час руху центрування одновагонного екіпажу порушується, проте воно не повинно виходити за допустимі межі при максимальній швидкості та наявності зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Візьмемо початок координат трьох взаємно пов'язаних осей – поздовжньої Ox , вертикальної Oy та поперечної Oz у точку ЦВ. Будь-який рух екіпажу можна розглядати як результат двох видів руху – переміщення ЦВ та обертання платформи екіпажу щодо ЦВ, що задається кутами α , β і γ (рис. 1).

Кут розвороту екіпажу навколо поздовжньої осі Ox від горизонтального положення називається кутом крену γ . Нахил буває лівий і правий і відраховується в межах $0 - 90^\circ$. Кут розвороту екіпажу навколо поперечної осі Oz від горизонтального положення називається кутом тангажу β . Тангаж може бути позитивним зі збільшенням швидкості руху або негативним при її зниженні. Кут розвороту екіпажу навколо вертикальної осі Oy від північного напрямку земного меридіана за годинниковою стрілкою називається кутом нишпорення α .

Таким чином, складний рух екіпажу (або магнітоплану) в просторі можна розкласти на три поступові рухи ЦВ щодо нерухомих координат шляхопроводу і три обертальні рухи щодо системи координат екіпажу, тобто магнітоплан має 6 ступенів свободи. При цьому за координатами ЦВ можна обчислити пройдений екіпажем шлях у кожний момент часу щодо початку координат шляхопроводу; висоту ЦВ над колійною структурою та бічне відхилення ЦВ від поздовжньої лінії руху. Поступовий рух залежить від підйомної лоренцівської сили,

ваги магнітоплану, результуючої тяги електроприводу з урахуванням сил магнітного опору та лобового опору. Обертальний рух екіпажу залежить від діючих на нього моментів: поперечного (крутного) моменту M_x , що діє навколо поздовжньої осі і прагне змінити кут крену γ (поперечний момент крену); поздовжнього моменту M_z , що діє навколо поперечної осі і прагне змінити кут тангажу β (момент тангажу) і колійного моменту M_y , що діє навколо вертикальної осі та прагне змінити кут курсу α (момент нишпорення).

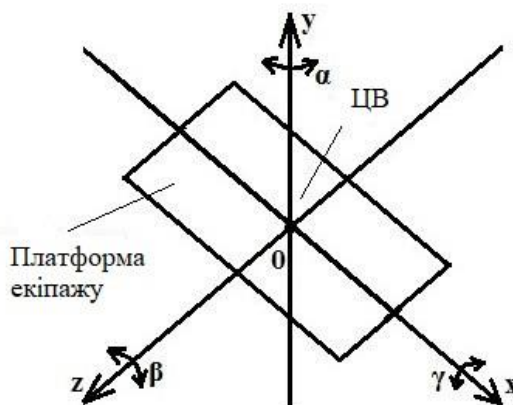


Рис. 1. Кути зміщення платформи екіпажу щодо ЦВ

Поступові та оберткові рухи взаємопов'язані. Наприклад, зміна кута тангажу призводить до зміни висоти ЦВ екіпажу над шляховою структурою, зміни бічного відхилення і т. д. Для того, щоб екіпаж міг рухатися з прискоренням, прямолінійно, рівномірно, необхідна рівновага сил і моментів, що діють на нього. У напрямку координатних осей Ox , Oy , Oz розрізняють поперечну, поздовжню та колійну обертальну рівновагу екіпажу. Поздовжня рівновага – рівновага екіпажу щодо поперечної осі Oz – може бути порушена при зміні центрування, дії вертикальних поривів вітру, при зміні режимів роботи. Поперечна рівновага – рівновага екіпажу щодо поздовжньої осі Ox – може бути порушена нерівномірним завантаженням платформи, поздовжньою кривизною колійної структури, несиметричною роботою електроприводу. Шляхова рівновага – рівновага екіпажу щодо вертикальної осі Oy – може бути порушена при несиметричній роботі електроприводу, горизонтальних поривах вітру.

Управління рівновагою здійснюється шляхом управління режимами роботи електроприводу від інформаційних сигналів, що надходять від навігаційної системи магнітолевітаційного транспорту та містять інформацію про координати ЦВ щодо нерухомих координат колійної структури та координати обертальних рухів платформи екіпажу. Для цього в прямокутній системі координат чотирьох ліній передачі сигналів поставимо координати маркера у разі поступального руху екіпажу. Положення маркера M (фазового центру випромінювача) щодо початку координат визначатимемо всередині прямокутника $ABCD$ (рис. 2), де точки A , B , C , D розташовуються на лініях передачі сигналів колійної структури. Для визначення приймемо точку C за початок координат. Тоді координати маркера визначаються величинами a та b . Вони ж є вихідними даними і при обчисленні кутів обертання платформи екіпажу.

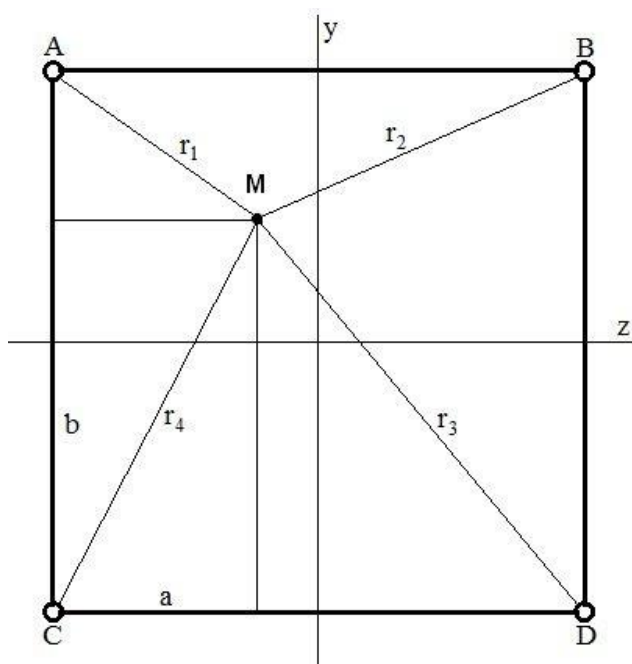


Рис. 2. Координати маркера у системі координат чотирьох ліній передачі

Для визначення a та b через AC , CD , AB та BD – відомі відстані між лініями передачі сигналів і r_1 , r_2 , r_3 , r_4 – відстані від маркера M до ліній передачі сигналів, що вимірюються засобами фазової далекометрії навігаційної системи, виразимо площі трикутників AMC , AMB , BMD та DMC через три відомі сторони і через основу та висоту [8], а потім, відповідно, прирівняємо:

$$0,5CD \cdot b = \sqrt{p_1(p_1 - r_4)(p_1 - r_3)(p_1 - CD)}; \quad (1)$$

$$0,5AC \cdot a = \sqrt{p_2(p_2 - r_4)(p_2 - r_1)(p_2 - AC)}; \quad (2)$$

$$0,5AB \cdot (AC - b) = \sqrt{p_3(p_3 - r_1)(p_3 - r_2)(p_3 - AB)}; \quad (3)$$

$$0,5BD \cdot (CD - a) = \sqrt{p_4(p_4 - r_2)(p_4 - r_3)(p_4 - BD)}; \quad (4)$$

Тут

$$p_1 = \frac{r_3 + r_4 + CD}{2}, \quad p_2 = \frac{r_1 + r_4 + AC}{2}, \quad p_3 = \frac{r_1 + r_2 + AB}{2}, \quad p_4 = \frac{r_2 + r_3 + BD}{2} \quad (5)$$

Вирази для a та b мають вигляд:

$$a = \frac{2\sqrt{p_2(p_2 - r_4)(p_2 - r_1)(p_2 - AC)}}{AC} = CD - \frac{2\sqrt{p_4(p_4 - r_2)(p_4 - r_3)(p_4 - BD)}}{BD}; \quad (6)$$

$$b = \frac{2\sqrt{p_1(p_1 - r_4)(p_1 - r_3)(p_1 - CD)}}{CD} = AC - \frac{2\sqrt{p_3(p_3 - r_1)(p_3 - r_2)(p_3 - AB)}}{AB};$$

Отримані величини a і b є шуканими координатами маркера M в системі координат нерухомих ліній передачі сигналів колійної структури.

Подальший крок – визначення координат точкового джерела радіовипромінювання у системі нерухомих ліній передачі сигналів. У процесі руху екіпаж здійснює поступальні рухи у системі нерухомих координат колійної структури та обертальні рухи у системі координат платформи екіпажу. Опис цих рухів здійснюється через визначення координат маркерів M_1 і M_2 (джерел радіовипромінювання) методом фазової далекометрії [9]. Маркери розташовані на фронтальній та тильній сторонах платформи екіпажу на його поздовжній осі, рис. 3.

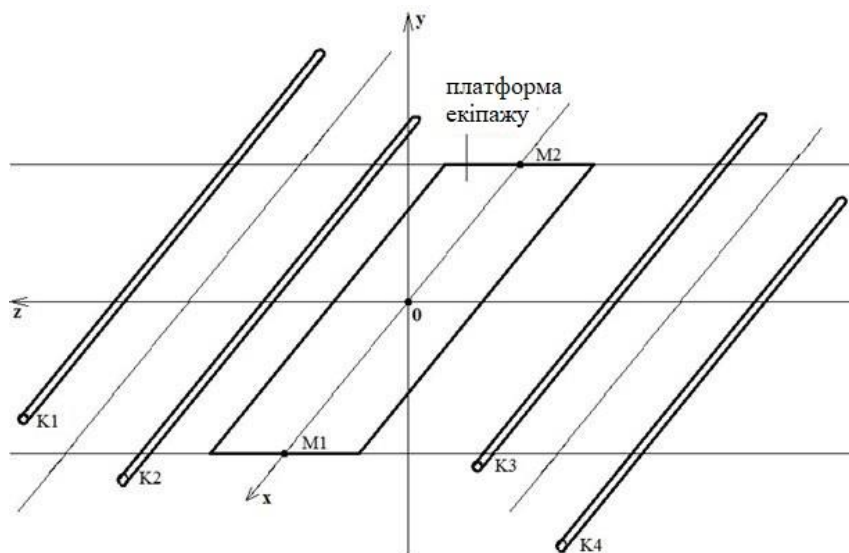


Рис. 3. Розташування маркерів M_1 та M_2 відносно коаксимальних ліній передач K_1, K_2, K_3, K_4

При поступовому русі відбувається зміщення платформи екіпажу (відповідно та жорстко прив'язаних до неї маркерів) паралельно до осі x або осі y . Ці зміщення визначаються через координати $a, -a$ при горизонтальному русі маркера M_1 і координати $b, -b$ при горизонтальному русі маркера M_2 . При вертикальному русі зміщення визначається через координати $a', -a'$ для маркера M_2 , рис. 4.

При поступовому зміщенні маркерів M_1 і M_2 має виконуватися умова рівності координат $a = a'; b = b'; -a = -a'; -b = -b'$.

Одноіменні координати маркерів при поздовжньому зміщенні повинні співпадати між собою. Порушення будь-якої з цих рівностей говорить про те, що платформа екіпажу здійснює поряд з поступовим рухом також обертальні рухи навколо координатних осей самої платформи. Обертальні рухи можна розглядати через зміщення маркерів M_1 і M_2 , виражені через кути між поздовжньою лінією колійної структури та поздовжньою лінією платформи екіпажу при обертанні навколо осі OY (нишпорення) та кути між поздовжньою лінією колійної структури та поздовжньою лінією платформи екіпажу при обертанні навколо осі OZ (тангаж) (рис. 5 та 6).

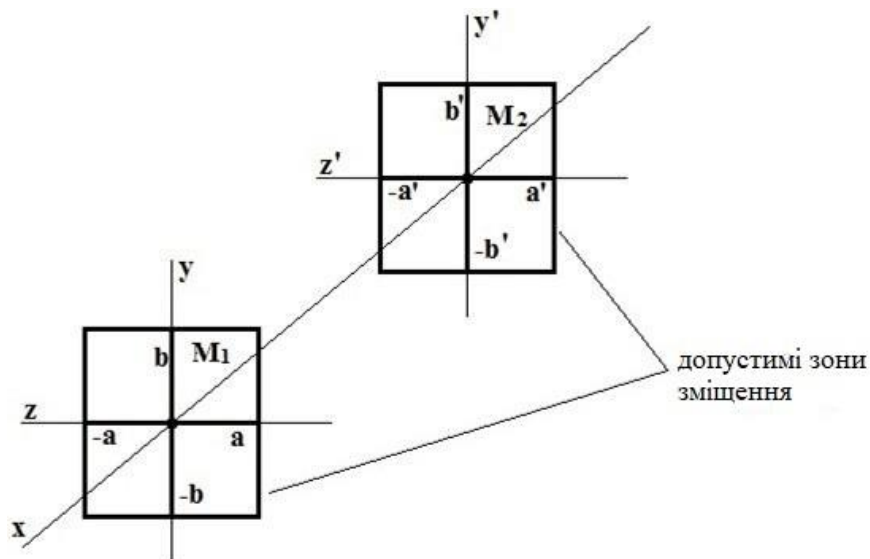


Рис. 4. Зони зміщення маркерів M_1 та M_2 у межах координат $a, -a$ ($a', -a'$) и $b, -b$ ($b', -b'$)

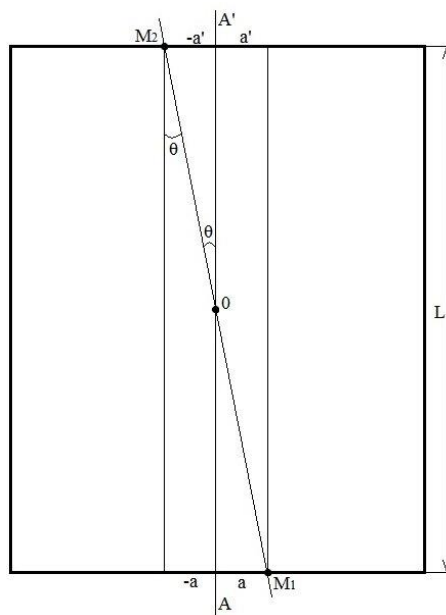


Рис. 5. Взаємне розташування поздовжньої осі платформи екіпажу $M_1 M_2$ та поздовжньої осі колійної структури $A'A$ при обертанні платформи екіпажу навколо вертикальної осі OY

Кут обертання θ навколо осі OY на підставі геометричних побудов рис. 5 визначається виразом

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{a' - a}{L}, \quad (7)$$

де a та a' координати зміщення маркерів M_1 і M_2 по осі OZ на фронтальній та тильній стороні платформи екіпажу відповідно, а L – довжина платформи (відстань між маркерами вздовж поздовжньої осі платформи)

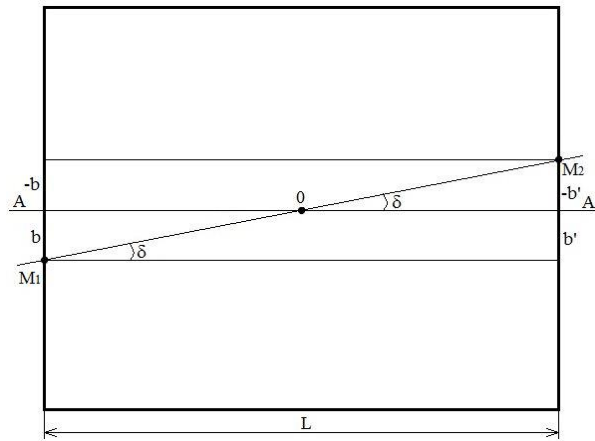


Рис. 6. Взаємне розташування поздовжньої осі платформи екіпажу M_1M_2 та поздовжньої осі колійної структури $A'A$ при обертанні платформи екіпажу навколо горизонтальної осі OZ

Число можливих поєднань координат маркерів у межах a $-a$ і a' і $-a'$ подано в табл. 1. Координати a та a' повинні братися з урахуванням знаків, тоді знак, отриманий у результаті обчислень, буде вказувати напрямок обертання платформи – вліво або вправо, відносно поздовжньої осі колійної структури.

Таблиця 1. Поєднання координат маркерів при обертанні навколо осі OY

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Взаємне розташування маркерів								
Відношення між $ a $ і $ a' $	$ a < a' $	$ a > a' $	$ a < a' $	$ a > a' $	$ a < a' $	$ a > a' $	$ a > a' $	$ a < a' $
Знак кута повороту	+	-	-	-	+	+	+	-
Напрямок повороту	право	ліво	ліво	ліво	право	право	право	ліво

Аналогічним чином визначається кут обертання δ навколо осі OZ

$$\delta = \arctg \frac{b'-b}{L}, \quad (8)$$

де b і b' – координати зміщення маркерів M_1 і M_2 по осі OY на фронтальній та тильній стороні платформи екіпажу відповідно.

Орієнтація поздовжньої осі платформи екіпажу через координати маркерів M_1 і M_2 відносно поздовжньої осі колійної структури AA' при обертанні платформи екіпажу навколо горизонтальної осі OZ представлена на рис. 6. Число можливих поєднань координат маркерів у межах b і $-b$ та b' і $-b'$ подано в табл. 2.

Таблиця 2. Поєднання координат маркерів при обертанні навколо осі z

№	Взаємне розташування маркерів	Відношення між $ b $ і $ b' $	Знак кута повороту	Напрямок поворота
1		$ b > b' $	-	вниз
2		$ b < b' $	+	вгору
3		$ b > b' $	+	вгору
4		$ b < b' $	+	вгору
5		$ b > b' $	-	вниз
6		$ b < b' $	-	вниз
7		$ b < b' $	-	вниз
8		$ b > b' $	+	вгору

Координати b і b' повинні прийматись з урахуванням знаків, тоді знак, отриманий в результаті обчислень, вказуватиме напрямок обертання платформи вгору або вниз щодо поздовжньої осі колійної структури.

Що стосується визначення крену, то його рівень вимірюється за допомогою третього маркера і обчислюється аналогічно за попередніми розрахунками. Маркер розташований на екіпажі в площині XU , але не на лінії $M_1 - M_2$. Частоти маркерів рознесені для селекції на приймаючому боці диспетчерського пункту.

Висновки. Таким чином, за результатами проведених досліджень, в роботі обґрунтовано таке: фазова далекометрія з одним випромінювачем на платформі екіпажу дозволяє визначати положення екіпажу на перегоні, його зміщення в горизонтальній площині щодо поздовжньої осі колійної структури та висоту підвісу між днищем екіпажу і шляхопроводом, а наявність трьох випромінювачів дозволять реєструвати три обертові рухи (тангаж, нишпорення та крен).

Новизна роботи полягає в обґрунтуванні способу *безперервного* позиціонування високошвидкісного магнітолевітуючого транспортного засобу по 6-ти ступенях свободи на основі фазової далекометрії для *довільної* конфігурації в тривимірному просторі фіксованого шляхопроводу та *цілісність* навігаційної системи.

Розглянутий метод навігації призначений для використання в високошвидкісних транспортних наземних системах на магнітному підвісі, організації автоматизованого управління рухом колісним транспортом на локальних майданчиках виробничого призначення, організації швидкісного малорозмірного муніципального транспорту індивідуального користування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий): пособие./ В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковичкий, К. В. Гончаров. Д. : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. 207 с.
2. Henning U. Advanced Converter and Control Components of the TRANSRAPID Propulsion System // Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems (STECH 03), August 19 to 22, 2003, Tokyo, Japan. Department of Mechanical Systems Engineering of Tokyo Univ. of Agriculture & Technology.
3. Yang Y., Mao Y., Sun B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. Satellite Navigation 1.1, 2020. С. 1-8. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0006-0>.
4. Farahneh H., Fernando X. Modeling the leaky feeder as a multi antenna array. 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014. С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6901150>.
5. Wang H., Yu F. R., Zhu L., Tang T., Ning B. Finite-State Markov. Modeling of Leaky Waveguide Channels in Communication-based Train Control (CBTC) Communications Letters, IEEE, 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1308.2188>
6. Системы управления и энергообеспечения магнитолевитирующего транспорта: монография / Дзензерский В. А. и др. Донецк : Киев: Наукова думка, 2014. 276 с.
7. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций на сверхпроводящих магнитах: монография / Дзензерский В.А. и др. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2011. 248 с.
8. Richard C.Dorf. The engineering handbook. CRC press, 2018, 232 с.
9. Плаксин С.В., Шкиль Ю.В. Навигационная система магнитолевитирующего экипажа на основе синхронизированных СВЧ генераторов., Радиоелектроника. Информатика. Управление, 2005. №13. С. 48–53.
10. Golovkov V. Potarova N. Rudenko P. Stradov, B.. Receiving system of a pulsed laser rangefinder. Journal of Optical Technology, 2020. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>
11. Hoeher P. Optical Ranging and Visible Light Positioning, 2019. <https://doi.org/10.3139/9783446463035.011>
12. Mizuno T. Laser rangefinders for planetary exploration, 2017. С. 28-29. <https://doi.org/10.23919/MOC.2017.8244480>
13. França T. N., Shi H., Deng Z., Stephan R. M.. Overview of Electrodynamics Levitation Technique Applied to Maglev Vehicles. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3089104>
14. Lv G., Liu Y., Zhang Z., Zhou T. Characteristic Analysis of Coreless-Type Linear Synchronous Motor With the Racetrack Coils as Secondary for EDS Maglev Train. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022. С. 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3163520>
15. Shao N., Wang M., Hou Q. Analysis on the Dynamic Response of an EDS Maglev Train Based on Pacejka Similarity Tire Model, 2021. С. 72-76. <https://doi.org/10.1109/ICAICA52286.2021.9498233>.

REFERENCES

1. Skalozub, V. V., Solovyov, V. P., Zhukovitsky, I. V., & Goncharov, K. V. (2013) *Intellektual'nyye transportnyye sistemy zheleznodorozhnogo transporta (osnovy innovatsionnykh tekhnologiy): posobiye* [Intelligent transport systems of railway transport (basics of innovative technologies): manual]. *Izdatel'stvo Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akad. V. Lazaryana - D.: Publisher of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.* [in Russian].
2. Uwe, H. (2003). Advanced Converter and Control Components of the TRANSRAPID Propulsion System. In *The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: STECH 2003* (pp. 577-582). The Japan Society of Mechanical Engineers.
3. Yang, Y., Mao, Y., & Sun, B. (2020). Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. *Satellite Navigation*, 1(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0006-0>.
4. Farahneh, H., & Fernando, X. (2014, May). Modeling the leaky feeder as a multi antenna array. In *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6901150>.
5. Wang, H., Yu, F. R., Zhu, L., Tang, T., & Ning, B. (2013). Finite-state Markov modeling of leaky waveguide channels in communication-based train control (CBTC) systems. *IEEE communications letters*, 17(7), 1408-1411. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1308.2188>
6. Dzenzerskiy, V.A. et al. (2011). *Sistemy upravleniya y enerhoobespecheniya mahnytolevitiruyushcheho transporta: monografya* [Systems of management and energy supply of magnetolevitating transport: monograph]. *Kyev: Naukova dumka - Kyiv: Scientific opinion.*
7. Dzenzerskiy V.A. (2011). *Dinamika ekipazhey netraditsionnykh konstruksiy na sverkhprovodyashchikh magnitakh: monografiya* [Dynamics of Crews of Unconventional Designs on Superconducting Magnets: Monograph]. *Dnepropetrovsk: ART-PRESS*. 248 p. [in Russian].
8. Dorf, R. C. (2018). *The engineering handbook*. CRC press.
9. Plaksyn S.V., Shkyl' Y.V. (2005) *Navigatsionnaya sistema magnitolevitiruyushcheho ekipazha na osnove sinkhronizirovannykh SVCH generatorov* [Navigation system of a maglev crew based on synchronized microwave generators]. *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnya*, 4, 48-53 [in Russian].
10. Golovkov, V. A., Potapova, N. I., Rudenko, P. N., & Stradov, B. G. (2020). Receiving system of a pulsed laser rangefinder. *Journal of Optical Technology*, 87(11), 688-692. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>
11. Hoeher, P. (2019). Optical Rangefinding and Visible Light Positioning. *Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG*, 74-80. <https://doi.org/10.3139/9783446463035.011>.
12. Mizuno, T. (2017). Laser rangefinders for planetary exploration, In: *2017 22nd Microoptics Conference (MOC)*, 28-29. <https://doi.org/10.23919/MOC.2017.8244480>.
13. França, T. N., Shi, H., Deng, Z., & Stephan, R. M. (2021). Overview of electrodynamic levitation technique applied to maglev vehicles. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3089104>.
14. Lv, G., Liu, Y., Zhang, Z., & Zhou, T. (2022). Characteristic Analysis of Coreless-Type Linear Synchronous Motor With the Racetrack Coils as Secondary for EDS Maglev Train. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3163520>.
15. Shao, N., Wang, M., & Hou, Q. (2021, June). Analysis on the Dynamic Response of an EDS Maglev Train Based on Pacejka Similarity Tire Model. In *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. (pp. 72-76). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAICA52286.2021.9498233>.

Oleksandr Holota¹, Serhii Plaksin², Yurii Shkil³

¹ Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho, str., Dnipro, 49005, Ukraine

² Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho, str., Dnipro, 49005, Ukraine

³ Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho, str., Dnipro, 49005, Ukraine

**DETERMINATION OF THE COORDINATES OF THE SPATIAL ORIENTATION
OF THE MAGNETOPLAN REGARDING THE RAIL STRUCTURE**

The article proposes a way to determine the position of the crew of the tape recorder using the method of rangefinder. The basis of the developed idea is the use of emitters with which you can register the rotational movements of the crew (pitch and dredging), as well as to register the roll. According to the results of the research, the following is substantiated: phase rangefinder with one emitter on the crew platform allows to determine the position of the crew on the race, its displacement in the horizontal plane relative to the longitudinal axis of the track structure and the height of the suspension between the crew bottom and three rotational movements (pitch, digging and roll).

The novelty of the work is to substantiate the method of continuous positioning of high-speed magnetic levitation vehicle on 6 degrees of freedom based on phase rangefinder for arbitrary configuration in three-dimensional space of a fixed overpass and the integrity of the navigation system.

The considered method of navigation is intended for use in high-speed transport ground systems on a magnetic suspension, the organization of the automated control of movement of wheeled transport on local platforms of industrial function, the organization of high-speed small-scale municipal transport of individual use.

Keywords: *magnetic plane, magnetic suspension, moving platform, center of gravity, phase rangefinder.*

Олена Кириллова^{1*}, Валерія Кириллова²

¹ Завідувач, Кафедра експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3414-7364>

² Доцент, Кафедра експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-0408>

*Автор, відповідальний за листування: kirillova18@i.ua

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОСТОРОВОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ ПОРТІВ

Порти є основою інфраструктурного каркасу глобальної системи міжнародних перевезень. Тому завжди є актуальними питання щодо функціонування і розвитку портів. Для формування теоретичних основ і дієвих механізмів управління портами важливе значення має не тільки аналіз сучасного стану транспортних мереж і портових систем, окремих портів та їх інфраструктури, а також й аналіз процесів зародження, становлення, функціонування та розвитку портів. Результати такого ретроспективного огляду з позиції критичного аналізу відповідного історичного досвіду сприяють формуванню системного погляду на перспективи розвитку вітчизняних портів. Адже перспективний і ретроспективний аналізи тісно пов'язані між собою. Без ретроспективного аналізу неможливо об'єктивно зрозуміти перспективи руху того чи іншого порту на шляху його подальшого розвитку. В роботі розглянуто системи управління, які діяли протягом періоду незалежності України в її портах, проаналізовано поточний статус вітчизняних портів, а також проведено аналіз існуючих у світі підходів до періодизації процесів розвитку портів. Це зроблено з метою формування теоретичних основ просторової та функціональної еволюції портів: з позиції системного погляду на процеси і можливі напрями їх майбутнього розвитку; на базі методів ретроспективного аналізу існуючих у світі та систематизованих в роботі теоретичних моделей, кожна з яких на емпіричному рівні може бути обрана особою, що приймає рішення, як наочний «шаблон» розвитку конкретного порту з урахуванням поточного стану і наявних реалій.

Ключові слова: морський транспорт, портова галузь, порти, розвиток, управління, система, ретроспективний аналіз.

Вступ. Немає ніяких сумнівів, що порти є найважливішою структурною частиною морського і річкового транспорту. Саме порти є основою інфраструктурного каркасу глобальної системи міжнародних перевезень. Саме в порту починається і закінчується транспортний процес морського перевезення вантажів. Недарма порти називають «морськими воротами», через які в країну потрапляють імпорتنі вантажі і йдуть з країни експортні, забезпечуючи потреби різних суб'єктів міжнародних торгових відносин. Тому питання стосовно функціонування і розвитку портів у всіх проявах і напрямках, завжди привертає увагу представників транспортної галузі. Сьогодні ця тема залишатися актуальною і привертає до себе увагу політиків різних країн, практиків і вчених-транспортників, а також багатьох людей, яких турбує загроза продовольчої кризи, що викликана блокуванням українських портів у зв'язку з російською агресією.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питання, що пов'язані з управлінням експлуатаційною діяльністю портів та їх розвитком, знаходяться в колі уваги не тільки представників портової виробничої галузі, але й у сфері інтересів науковців-транспортників, які проводять свої фундаментальні дослідження з урахуванням реалій емпіричного рівня. В процесі дослідження розглядалися і матеріали поданих у статті наукових робіт, присвячених визначеним вище питанням і безпосередньо тематиці статті.

У дослідженні [1] розглянута Інтегрована морська політика (Integrated maritime policies (IMP)), яка забезпечує комплексну структуру управління для підтримки сталого використання морів і океанів, одночасно забезпечуючи комфортний і безпечний рівень життя для населення навколишніх прибережних регіонів. Висновки до роботи містять рекомендації для політиків та зацікавлених сторін щодо ключових стратегічних та інституційних міркувань, які мають сприяти ефективному впровадженню національної IMP.

У роботі [2] розглядаються внутрішньоконтинентальні контейнерні перевезення і переваги вибору способу перевезення вантажів у контейнерах на короткі відстані до морських портів Західної Європи. Положення, сформульовані у [2], визначають можливості щодо розвитку внутрішньоконтинентальних мереж, які прилягають до прибережних територій морських портів Західної Європи, а також сприяють створенню інтермодальних транспортних систем доставки вантажів до територій цих портів завдяки концентрації транспортних потоків на внутрішньоконтинентальних транспортних мережах. Поряд з тим це дослідження обмежується досить вузьким сегментом ринку і орієнтовано лише на порти Бельгії.

У статті [3] досліджений досвід портової галузі Китаю і встановлено, що необмежена конкуренція між сусідніми портами регіону призводить до непотрібного дублювання зусиль і марнотратства дефіцитних портових ресурсів. В роботі наведено результати дослідження питань стосовно подолання цієї проблеми шляхом інтеграції регіональних портів Китаю. Авторами роботи за допомогою моделі «Difference-in-Differences» (DID, «Різниця у Відмінностях»), з одного боку, проаналізовано вплив портової інтеграції (ПІ) на економічне зростання Китайських портових міст, а з іншого – визначено причини просторових відмінностей у розвитку цих міст саме через реалізацію ПІ. На підставі аналізу сукупності показників за 69 портовими містами Китаю з 2000 по 2018 рр. автори констатують, що ПІ може значно прискорити економічне зростання портових міст. Зокрема в процесі дослідження продемонстровано позитивний вплив ПІ на економічне зростання міст (особливо малих і середніх) у регіоні дельти річки Янцзи (Yangtze River Delta region (YRD)). У свою чергу, встановлено, що економічні наслідки ПІ для міст регіону Бохайського регіону (Bohai Rim region (BR)) і для великих міст натомість незначні. Цей результат вказує на існування сильних просторових відмінностей у впливах ПІ. Крім того, в роботі проказано, що ПІ позитивно впливає на раціоналізацію портових виробничих ресурсів та їх розподіл між регіональними портами, сприяючи, таким чином, економічному зростанню відповідних міст. Результати, наведені в роботі [3] є корисними вказівками для портів світу, які реалізують політику інтеграції та консолідації своїх портових і в цілому транспортних систем.

У роботі [4] досліджується еволюція портової мережі вздовж Морського шовкового шляху (Maritime Silk Road (MSR)), мотивована необхідністю сталого розвитку цієї глобальної системи транспортного забезпечення міжнародної торгівлі. В роботі на основі даних про 55 основних портів, розташованих уздовж MSR, виконане моделювання еволюції цієї мережі. Результати моделювання показують, що порти Південно-Східної Азії та Південної Азії у майбутньому завдяки сталому розвитку стануть основними вузлами в мережі MSR, тоді як статус портів Китаю в цій мережі з часом значно знизиться. Результати також показують, що порти, які зараз будуються, такі як Melaka Gateway, Hambantota та Gwadar, матимуть в майбутньому важливий вплив на структуру мережі MSR. Це дослідження є корисною довідкою для розвитку портів уздовж MSR з точки зору сталого розвитку.

У статті [5] запропоновано модель п'яти поколінь (5GP) і розглянуто шлях розвитку морських портів, починаючи з 1960-х рр., від першого до п'ятого покоління, запропонованого,

визначеного і описаного саме авторами [5]. На основі критеріїв 5GP проведено критичний аналіз розвитку порту Сінгапур.

У статті [6] розроблено нова концептуальна основа порту шостого покоління (6GP). Критерії для 6GP включають: здатність порту обслуговувати контейнеровози місткістю 50 000 TEU і осадкою до 20 м; напів- або повна автоматизація контейнерного терміналу та потужне транспортне сполучення з внутрішніми районами, мінімізація негативних зовнішніх ефектів. Проте, оскільки в 2017 р. жоден з існуючих портів не відповідав критеріям 6GP, а контейнеровози розглянутої місткості не входили (і досі не входять) до структури світового флоту, то в статті [6] був критично проаналізований робочий документ Т. Беббінгтона [7] щодо технічних та економічних викликів сучасної портової стратегії, а також рішень стосовно можливого планування, а також будівництва і експлуатації такого порту в майбутньому.

У роботі [8] досліджено питання еволюції внутрішньопортового оперативного управління (VOU), як прикладної науки з виділенням донаукової і наукової стадій, етапів її розвитку та характеристикою досягнутих на кожному етапі наукових результатів. Показано, що початок донаукової стадії формування VOU слід пов'язувати з виникненням професійної діяльності по організації завантаження/розвантаження суден біля необладнаного морського узбережжя, а її закінченням вважати затвердження концепції «експлуатаційної справи в портах». Цей термін запропоновано розглядати і в якості початкової віхи наукової стадії розвитку VOU на етапах зародження, становлення, створення методології і подальшого вдосконалення аж до сучасного стану. Встановлено, що на науковій стадії прогресування VOU принципово важливе значення мали: на етапі зародження – обґрунтування необхідності впровадження планування в оперативне управління портовим виробництвом; на етапі становлення – визнання корисності комплексного розвитку практики і теорії внутрішньопортового управління; на етапі створення методології – початок розробки теоретичних положень і методичного інструментарію VOU в застосуванні до процесу обробки суден; на етапі оптимізації та автоматизації VOU – інтенсивне збагачення методології оперативного управління обробкою суден принципами, підходами і методами народжених науково-технічною революцією наук і розгортання на цій основі робіт зі створення автоматизованих систем управління роботою портів.

У статті [9] з точки зору функціональної єдності та нерозривності розглянуто такі фундаментальні у транспортній термінології поняття, як «перевізний» і «вантажоперевалювальний» процеси, які є складовими загального транспортного процесу. Крім того, розглянуто сучасну роль портів, як ключових ланок у системах доставки вантажів водним транспортом.

У роботі [10] досліджено актуальне локальне виробниче завдання, що пов'язане з розвитком портової інфраструктури. В роботі побудовано та проаналізовано паретову межу відповідної задачі багатокритеріальної оптимізації. В результаті сформульовані теоретичні та методичні положення щодо обґрунтування оптимальної структури парку портового перевантажувального обладнання на підставі багатокритеріального підходу.

Таким чином, важливе значення для формування теоретичних основ і дієвих практичних механізмів управління функціонуванням і розвитком портів має не тільки аналіз сучасного стану транспортних мереж і портових систем, окремих портів та їх інфраструктури, технологій портового виробництва і тенденцій, що мають місце у практиці функціонування сучасних портів, а також й ретроспективний огляд процесів зародження, становлення, функціонування та розвитку портів. Результати такого ретроспективного огляду з позиції критичного аналізу історичного досвіду сприяють формуванню сучасного погляду на перспективи розвитку вітчизняних портів з урахуванням поточних реалій і світових тенденцій. Адже перспективний і ретроспективний аналізи тісно пов'язані між собою. Без ретроспективного погляду на процеси зародження, становлення і розвитку різних портів неможливо об'єктивно зрозуміти перспективи руху того чи іншого порту на шляху його подальшого розвитку.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є формування теоретичних основ просторової та функціональної еволюції портів, аналіз і систематизація відповідних моделей:

з позиції системного погляду на процеси і можливі напрямки розвитку портів;

на базі ретроспективного аналізу існуючих у світі підходів до розвитку портів у процесі їх зародження та становлення.

Для досягнення мети в дослідженні поставлено і вирішено такі завдання:

розглянуто системи управління портами України, які діяли протягом періоду її незалежності;

проаналізовано поточний статус портів України;

проведено аналіз існуючих у світі підходів до періодизації процесів розвитку портів.

Теоретичною і методичною основою дослідження є загальнонаукові методи аналізу і синтезу, індукції та дедукції, абстрагування та конкретизація, узагальнення та формалізації, основні положення та принципи загальної теорії систем, системного і ретроспективного аналізу, а також теорії транспортних процесів і систем.

Матеріали та методи дослідження

Ретроспективний огляд системи управління портами України. Україна, як і всі інші пострадянські країн (Литви, Латвії та Естонії), після проголошення незалежності (1991 р.), мала таку систему управління своїми портами, яка передбачала функціонування кожного порту у формі державного підприємства, яке одночасно здійснювало функції портової адміністрації і портового оператора.

У 1993 р. з'явилися перші приватні стивідорні компанії, які почали працювати на підставі договорів про спільну діяльність. Спільна діяльність стала першою організаційно-правовою формою співпраці українських державних портів з приватними стивідорними компаніями. Ініціатором впровадження такої форми співпраці між державним і приватним секторами став начальник Одеського порту Микола Павлюк. Одеський морський торговельний порт уклав тоді договори про спільну діяльність з такими компаніями, як «Айронімпекс-Україна», «Металзюкрейн Корп. ЛТД» і «Новолог». Така форма співпраці у той час дозволила порту притягнути додаткові вантажопотоки та залучити необхідні інвестиції, не просто «вижити», а продовжити працювати.

У 2002 р. на умовах спільної діяльності у різних сферах портового бізнесу досі впевнено працювали вже 20 приватних компаній. І все було б гаразд ... якби не бажання Держави зробити «як краще», а отримати «як завжди»! Так, вже у 2003 р. під тиском Міністерства транспорту в добровільному та судовому порядку договори про спільну діяльність були розірвані (за винятком трьох компаній). У 2008 р. вже Міністерство транспорту та зв'язку України видало наказ про заборону Державним портам укладати такого роду угоди. Така заборона, яка співпала з загальною світовою кризою, обумовила зниження ділової активності та початок стагнації в українському портовому секторі. Він і далі продовжував би «гальмувати», але з'явилися деякі важливі тенденції, які змусили не тільки говорити про реформи у портовій галузі, а й діяти:

з *одного* боку, в українському портовому секторі, незважаючи на кризу:

по-перше, продовжився розвиток приватних терміналів;

по-друге, у державних портів виникли потреби в інвестиціях;

з *іншого* боку, у глобальному портовому бізнесі:

по-перше, деякі міжнародні організації (ЮНКТАД, Світовий Банк) почали активно займатися питаннями реформування портової галузі та регулювання портової діяльності на глобальному рівні;

по-друге, ускладнились функції морських портів, відбулась трансформація багатьох з них у виробничо-промислові комплекси і масштабні транспортно-розподільні центри;

по-третє, посилилась роль глобальних портових операторів, які працюють у портах всього світу, керують суміжними видами транспортного бізнесу і є найбільшими інвесторами, що

знаходяться у постійному пошуку способів розширити свій вплив, свою присутність у портовій діяльності різних країн світу.

Таким чином, ситуація виявилася очевидною.

З одного боку, Україна та її портовий сектор, що потребує значних інвестицій, які держава, на жаль, не в змозі забезпечити.

З іншого – глобальні, а також українські гравці ринку портових послуг, які готові інвестувати у портову галузь.

У свою чергу, є ще й міжнародні організації, які «рішуче підтримують» і тих, і інших.

Але є «маленька» перешкода – національне законодавство.

У зв'язку з вище сказаним, під впливом світових і національних тенденцій, а також при підтримці міжнародних організацій, в Україні були переглянуті і переосмислені статус і роль портів.

Поточний статус портів України. Відомо, що 16 червня 2013 р. набув чинності Закон «Про морські порти України» [11]. Це була ключова подія, яка розділила історію розвитку українських портів на період «ДО» та «ПІСЛЯ».

Отже, до червня 2013 р., відповідно до Кодексу торговельного мореплавства України (КТМУ) [12] поняття «морський торговельний порт» означало «державне транспортне підприємство», яке призначене для обслуговування суден, пасажирів і вантажів на відведеній йому території та акваторії, а також для перевезення вантажів і пасажирів на суднах, які належать порту.

У свою чергу, відповідно до Закону «Про морські порти України» [11], «... морський порт – це встановлена межами територія і акваторія...», але не просто територія і акваторія, а «... територія і акваторія, обладнана для обслуговування суден і пасажирів, проведення вантажних, транспортних та експедиторських робіт, а також інших пов'язаних з цим видів господарської діяльності».

Таким чином порти із державних транспортних підприємств, тобто із постачальників традиційних послуг по обробці вантажів, перетворилися в складні багатофункціональні, диверсифіковані промислово-виробничі комплекси і транспортно-розподільні центри, що розташовані у межах встановленої території і акваторії, яка обладнана для обслуговування суден і пасажирів, проведення вантажних, транспортних та експедиторських робіт, а також інших пов'язаних з цим видів господарської діяльності.

Територія портів може складатися з державних, комунальних і приватних земельних ділянок. На цих ділянках мають право працювати суб'єкти господарювання всіх форм власності і здійснювати діяльність, пов'язану з обслуговуванням суден, пасажирів, вантажів і підприємств, продукція і / або сировина яких транспортується по території та акваторії порту [11]. До глобальних змін, внесених цим Законом, також належать:

лібералізація тарифоутворення на послуги з перевалки вантажів;

дозвіл на оренду або концесію портових причалів терміном до 49 років;

новий підхід до визначення самого поняття «морський порт».

Таким чином, після прийняття Закону «Про морські порти України» [11], статус портів, дійсно, змінився, але аж ніяк не спростився. Його роль і функції навпаки ускладнилися. Крім того, після вступу Закону «Про морські порти України» відбулося розмежування функцій:

адміністративні функції були передані Адміністрації морських портів України (АМПУ) – державному підприємству із відповідними філіями у всіх морських портах України;

функції з операційної (стивідорної) діяльності залишилися у державних (приватних) підприємств – стивідорних компаній (портових операторів).

Проте до такої нової системи портових відносин ані держава, ані приватний бізнес виявилися не готовими. Тому і досі в експертному середовищі виникають різні дискусійні питання, а також продовжуються розмови про необхідність вдосконалювати існуючу систему управління функціонуванням і розвитком портів. Але перед тим, як досліджувати питання

удосконалення такої системи (системи управління функціонуванням і розвитком портів), доцільно вирішити не менш актуальне завдання, яке стосується, перш за все, встановлення та систематизації існуючих у світі підходів до розвитку портів, а також тих процесів, якими необхідно управляти.

Аналіз існуючих підходів до періодизації процесів розвитку портів. Спостереження за життєвими циклами різних портів поступово виявило деякі спільні риси, однакові тенденції та загальні закономірності в їх розвитку. Це сприяло формуванню певних підходів до процесів розвитку портів і появи відповідних моделей розвитку портів (рис. 1). Розглянемо поступово і стисло кожен з наведених моделей (рис. 1) для формування загального системного уявлення про існуючі підходи до розвитку портів.



Рис. 1. Основні моделі розвитку портів

Модель «ANYPORT» (1980 р.) – є однією з перших класичних моделей розвитку портів. Вона запропонована англійським вченим Джеймсом Бердом у 1980 р. Класична модель «ANYPORT» у постановці Джеймса Берда демонструє найбільш загальноновизнаний концептуальний погляд на розвиток портової інфраструктури у просторі. Модель розроблена на основі вивчення досвіду функціонування і закономірностей розвитку портів східного узбережжя Британії. Авторська концепція Джеймса Берда передбачає 6 етапів розвитку портів (рис. 2):

Етап 1. Виникнення порту – етап, який містить у собі становлення порту з невеликою та неглибокою причальною лінією, що прилягає до центру міста.

Етап 2. Розширення причалів – етап, який передбачає розширення можливих мереж порту всередину центру міста, але без будови нових вантажних причалів.

Етап 3. Гранична розробка причального фронту – етап вичерпання технічних можливостей обробки суден на первинно створених причалах. Цей етап пов'язаний із розвитком перевантажувальної техніки і зі збільшенням розмірів суден.

Етап 4. Розширення причальної лінії – етап розширення порту і створення нових, більш глибоководних і протяжних причалів, здатних приймати і обробляти багатотоннажні судна у

великій кількості. Розширення порту в більшості випадків пов'язано зі зміщенням його потужностей вздовж морського узбережжя (наприклад, до гирла річок).

Етап 5. Модернізація причальної лінії – етап модернізації перевантажувального обладнання з метою прискорення обробки суден великих розмірів і значної місткості.

Етап 6. Спеціалізація причалів – етап орієнтації портових причалів і портового перевантажувального обладнання на обробку певних типів суден і перевалювання певних видів вантажів.

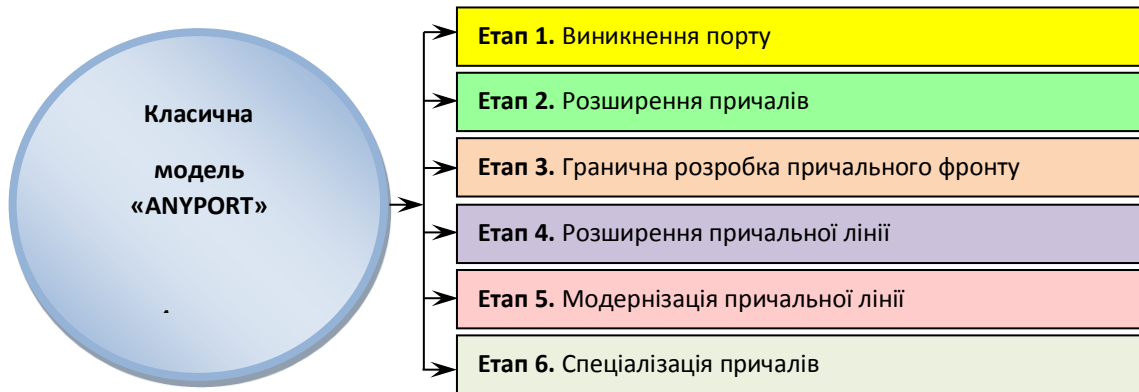


Рис. 2. Періодизація етапів розвитку портів за класичною моделлю «ANYPORT» (автор: Джеймс Берд, 1980 р.)

Крім цього, в моделі «ANYPORT» відокремлюється дві стратегії розвитку портів (рис. 3): просторовий розвиток, що передбачає рух виробничих потужностей порту від центру міста, шляхом будівництва нових глибоководних причалів на вільному просторі;

технічний розвиток, який передбачає створення перевантажувальних комплексів і терміналів, а також спеціалізацію перевантажувального обладнання з метою прискорення обробки спеціалізованих суден та зменшення витрат на переробку вантажів.

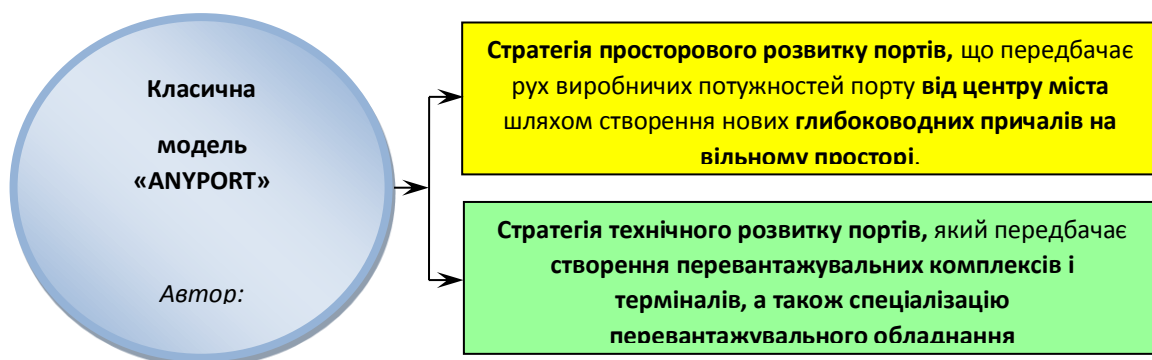


Рис. 3. Стратегії розвитку портів за класичною моделлю «ANYPORT» (Автор: Джеймс Берд, 1980 р.)

Незважаючи на таку всебічність і універсальність класичної моделі «ANYPORT» (рис. 2), кожен наступний автор намагався її удосконалити і скоригувати на свій власний розсуд, шляхом введення нових фаз. Так, з часом ця модель доповнилась такими фазами: закриття; розширення; додавання; консолідації; перепрофілювання та ін. Проте дуже скоро стало зрозуміло, що ці додаткові фази дозволяють лише краще пояснювати процеси розвитку кожного конкретного порту, який аналізується за допомогою моделі «ANYPORT». А класична модель Джеймса Берда з цими «латочками» лише втрачає свою унікальність та універсальність. Це призвело до того, що ряд вчених зробили висновок про те, що подальше удосконалення цієї моделі не має сенсу і є безглуздою тратою часу. В результаті канадський вчений Жан-Поль Родріге пішов іншим шляхом і запропонував не ускладнювати, а навпаки, спростити класичну модель «ANYPORT». Він запропонував зазначені Джеймсом Бердом 6 етапів розвитку портів згрупувати у 3 основні фази: становлення; розширення; спеціалізація (рис. 4).

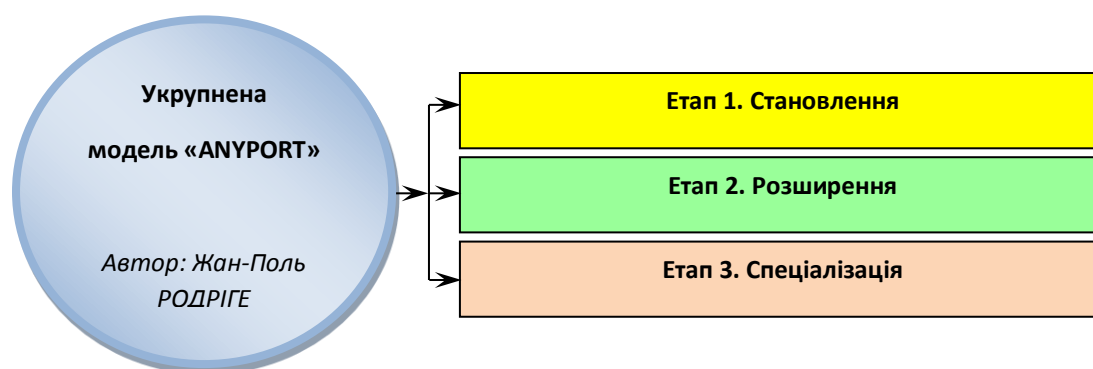


Рис. 4. Основні фази укрупненої моделі «ANYPORT» (автор: Жан-Поль РОДРИГЕ)

Недоліком різних варіантів моделі «ANYPORT» є те, що всі вони зосереджують увагу тільки на інфраструктурі порту. У зв'язку з цим у 1985 р. з'являється модель розвитку портів за версією UNCTAD.

Модель UNCTAD (1985 р.). Узагальнюючи отримані Дж. Бердом та Ж.-П. Родріге результати, у 1985 р. Конференція ООН з торгівлі та розвитку (UNCTAD) пропонує свою концепцію розвитку портів, яка спирається на вантажний (внатажознавчий) аспект портових операцій. Відповідно до запропонованої концепції, весь період розвитку портів включає 5 етапів, виходячи зі специфіки наявної вантажної бази (рис. 5):

Етап 1. Конвенційний (традиційний) порт. На цьому етапі порт представляє собою групу причалів загального призначення, які пристосовані для перевалювання генеральних вантажів (тобто штучних та навалочних вантажів в упакованому вигляді (наприклад, нафта в бочках, добрива у пакетах, пшениця в мішках) або з пакуванням у трюмі судна.

Етап 2. Поява терміналів для обробки навалочних вантажів. На даному етапі із загальної маси тарно-штучних вантажів відокремлюються вантажопотоки навалочних вантажів. Виникає необхідність у накопичуванні таких вантажів у порту до певного розміру судової партії для подальшого транспортування навалом на спеціалізованих суднах-балкерах. Для накопичення та перевалювання такого вантажу, а також для обробки відповідних суден-балкерів перед портом стає об'єктивна необхідність мати та своєчасно надавати окремий причал зі спеціальним перевантажувальним обладнанням і підйомно-транспортним устаткуванням. Таким чином, поява терміналів для обробки навалочних вантажів стає об'єктивною реальністю, що обумовлена попитом портової клієнтури (вантажовласників і судовласників).

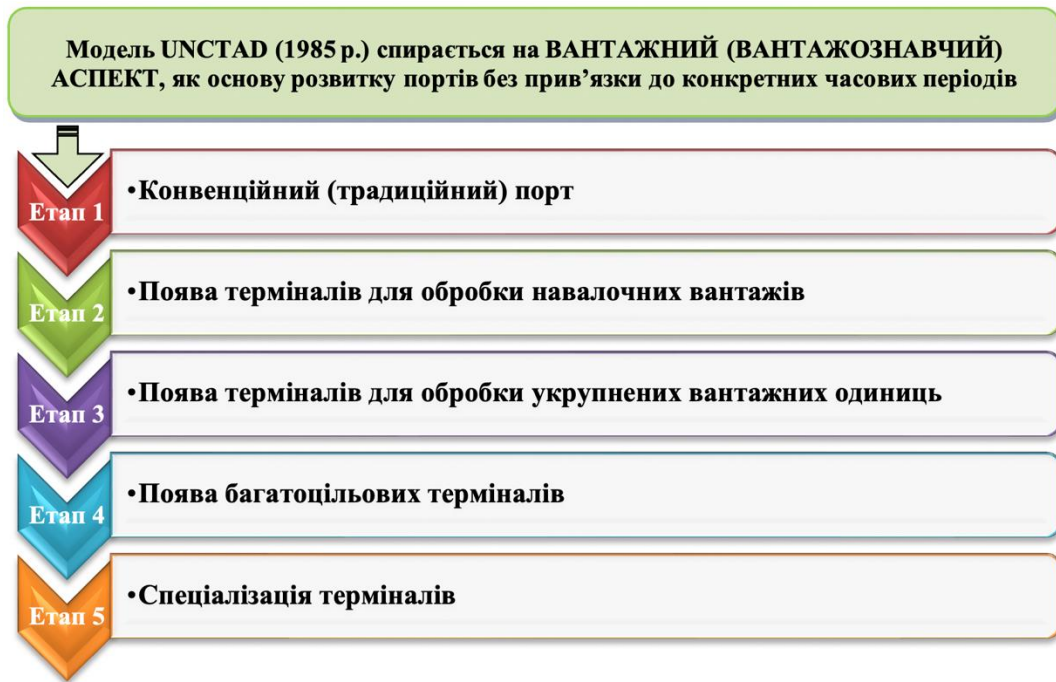


Рис. 5. Періодизація процесів розвитку портів відповідно до моделі UNCTAD (1985 р.)

Етап 3. Поява терміналів для обробки укрупнених вантажних одиниць (УВО). Даний етап характеризується двома тенденціями:

перша – поява засобів укрупнення тарно-штучних вантажів: палети, біг-беги, ящики, контейнери, пакети. Спочатку вони представляють невелику частку вантажопотоків. Їх обробка відбувається на звичайних причалах для перевантаження генеральних вантажів, а перевезення здійснюється на конвенціональних судах;

друга тенденція складається у постійному скороченні обсягів генеральних вантажів за рахунок відокремлення нових навалочних вантажів, які з часом досягають значних обсягів і потребують для обробки різних терміналів.

Етап 4. Поява багатоцільових терміналів. Збільшення обсягів використання УВО і поява спеціалізованих суден для їх перевезення (автомобілевози, ро-ро судна, контейнеровози ячейкового типу та ін.) вимагає спеціального перевантажувального обладнання для обслуговування таких вантажів і обробки відповідних спеціалізованих суден. Проте на той час вантажопотоки кожного виду УВО виявляються невеликими, а пріоритети в обробці того чи іншого спеціалізованого судна у майбутньому стають важко визначеними. Це обумовлює потребу у будівництві гнучких багатоцільових терміналів, які прийдуть на зміну частині старих причалів для генеральних вантажів. Ці термінали у більшості випадків якісно справляються зі всіма категоріями вантажів, тому легко перетворюються у спеціалізовані термінали для тих вантажів, які виявляються пріоритетними у майбутньому. Паралельно з цим на даному етапі продовжується зростання і диверсифікація вантажопотоків сухих навалочних вантажів.

Етап 5. Спеціалізація терміналів. Заключним етапом розвитку портів за моделлю UNCTAD (1985 р.) є поява спеціалізованих терміналів для обслуговування великих обсягів певних вантажопотоків та обробки відповідних спеціалізованих суден. На цьому етапі не завжди виникає необхідність у будівництві нових терміналів. За потребою існуючі багатоцільові термінали легко конвертуються у спеціалізовані термінали для переробки певних вантажів шляхом закупівлі додаткового обладнання. До часу досягнення даного етапу інші генеральні

вантажі (для перевезення яких був не потрібен спеціалізований флот, а для обробки не вимагалось вузькоспеціалізоване перевантажувальне обладнання) зміщуються на багатопільові термінали.

Розглянута модель UNCTAD пояснює історичний зв'язок між змінами характеристик вантажопотоків і стратегіями розвитку портів. Проте така модель розвитку портів у сучасних умовах має дещо обмежену придатність при наявних вантажопотоках і при досі невизначених перспективах можливих економічних змін. У моделі прийнятий до уваги дуже важливий, але лише єдиний фактор, що суттєво впливає на розвиток портів. Проте вплив інших не менш значущих чинників в цій моделі не враховано. Таким чином, розглянута концепція UNCTAD заснована на тому, що основною рушійною силою розвитку портів є вантажопотоки, а точніше зміна їх характеристик (номенклатури, структури, обсягів). У зв'язку з цим основним недоліком розглянутої моделі є саме те, що вона обмежується лише вантажним (вантажознавчим) аспектом, як основою розвитку портів.

Модель «ГЕНЕРАЦІЇ ПОРТІВ» («Port Generation Model») або «ТРЬОХ ПОКОЛІНЬ» UNCTAD – є наступною теоретичною моделлю розвитку портів, яка запропонована Конференцією ООН з торгівлі та розвитку у 1990 р. Вона має табличну форму представлення (табл. 1) і передбачає поділ всього періоду розвитку портів за трьома фазами (поколіннями), з їх прив'язкою до певних часових періодів і з урахуванням сукупності наступних п'ятьох факторів [13]: вантажна база; політика розвитку порту і його стратегія; сфери діяльності та межі розширення портової зони; характеристика організації портової діяльності; виробничі характеристики. Крім того, до моделі додаються ключові відмінності кожного етапу розвитку порту.

Деякий час модель «ТРЬОХ ПОКОЛІНЬ» UNCTAD була корисним інструментом аналізу і порівняння різних портів у контексті їх розвитку. Це робило її дуже популярною і визнаною.

Проте з часом ця модель зазнала серйозної критики. Наприклад, проф. А. Бересфорд назвав класифікацію портів за цією моделлю «неточною, нечіткою та такою, що не відповідає реаліям функціонування» [14]. Таким чином, з часом виявилися наступні слабкі сторони моделі «ТРЬОХ ПОКОЛІНЬ» UNCTAD:

вона дає спрощений погляд на еволюцію портів, що робить її мало реалістичною і неточною;

її використання ускладнює процес віднесення певного порту до того чи іншого покоління, роблячи таку ідентифікацію досить суб'єктивною, а значить пов'язаною з ризиками помилок, оскільки кожний порт, як правило, є унікальним об'єктом зі своїми специфічними рисами і особливостями функціонування портового виробництва, яке залежить від різних чинників;

вона відображає дискретні стадії розвитку портів, що не відповідає дійсності;

вона не враховує факт того, що не всі порти обов'язково проходять весь цикл для того, щоб отримати статус порту «третього покоління».

Існуючі недоліки попередніх моделей розвитку портів обумовили появу наступної моделі, яка створена у 1998-1999 рр. в рамках дослідницького проєкту «WORKPORT», що фінансувався ЄС, і на відміну від моделі «ТРЬОХ ПОКОЛІНЬ» UNCTAD, показав зміни, що відбуваються в морських портах. Модель «WORKPORT» передбачає розподіл всього періоду розвитку портів на 5 етапів (поколінь), з їх прив'язкою до певних часових періодів, а також з відокремленням 8 основних факторів, за якими характеризуються порти у ці часові періоди (табл. 2): форма власності; вид вантажу; організація і процеси вантажно-розвантажувальних робіт; інформаційне забезпечення і підтримуючі системи; трудова культура; розвиток портів і їх функції; безпека труда та охорона здоров'я; охорона навколишнього середовища. Крім того, до моделі додаються ключові відмінності кожного етапу розвитку порту.

Таблиця 1. Специфікація портів за поколіннями відповідно до моделі «ГЕНЕРАЦІЇ ПОРТІВ» або «ТРЬОХ ПОКОЛІНЬ» UNCTAD

Фактори	Період розвитку портів		
	Перше покоління (до 1960-х рр.)	Друге покоління (після 1960-х рр.)	Третє покоління (після 1980-х рр.)
Основні (домінуючі) вантажопотоки	Генеральний вантаж	Генеральний вантаж Масові (навалочні/наливні) вантажі	Навалочний вантаж Укрупнені вантажні одиниці Контейнерні вантажі
Відношення до розвитку порту і його стратегії	<i>Консервативна стратегія</i> Порт, як пункт стиковки (взаємодії) видів транспорту	<i>Експансіоністська стратегія</i> Порт, як транспортний, промисловий, і комерційний центр	<i>Комерційно-орієнтована стратегія</i> Інтегрований транспортний центр / мультимодальний транспортний вузол / платформа для міжнародної торгівлі
Сфери діяльності (ключові функції порту)	(1) - Вантажопереваловання зберігання, навігаційне обслуговування в межах існуючих границь порту	(1) «+» (2), де (2) – посилення комерціалізації діяльності, судно-орієнтований сервіс, розширення границь порту у прибережну зону	(1) «+» (2) «+» (3), де (3) – вантажна і інформаційна дистрибуція, створення терміналів і розподільчих центрів
Організаційні характеристики	Незалежні види діяльності всередині порту. Неформальні відношення між портом і клієнтурою. Відсутність єдиної системи внутрішньо портового управління і взаємодії з клієнтурою	Посилення централізації внутрішньо портового управління і ділової взаємодії між портом і клієнтурою. Слабка координація видів діяльності в порту. Непостійні, випадкові та одиничні відносини між портом і міською владою	Створення єдиного портового співтовариства. Інтеграція порту в торговий і транспортний ланцюг. Тісна співпраця порту з міською владою. Розвиток організаційної структури. Створення мобільної системи внутрішньо портового управління і ділової взаємодії з клієнтурою.
Виробничі характеристики	Вантажопотік. Прості індивідуальні послуги клієнтурі. Низка додана вартість.	Вантажопотік. Перетворення вантажу. Комплексні послуги клієнтурі. Значна додана вартість.	Вантажопотік і інформаційний потік. Вантажна і інформаційна дистрибуція. Розширені пакети послуг клієнтурі. Висока додана вартість.
Визначальні (ключові) фактори	Труд (робоча сила) / Капітал	Капітал	Технології / Інновації («ноу-хау»)

Джерело: [13]

Модель «WORKPORT» демонструє основні тенденції, які спостерігаються в процесі розвитку портів. Ці тенденції саме і служать основою, так би мовити, «ключем», для портових влад у пошуку шляхів підвищення ефективності функціонування порту та можливостей його розвитку. В цілому модель «WORKPORT»:

усунула недоліки попередніх моделей;

дозволила значно збільшити кількість факторів, включених до аналізу, а також кількість характеристик портів за цими факторами і за відповідними періодами;

прийняла до розгляду нові зв'язки і закономірності;

вперше зосередила увагу на етапі, який почався у 2000-х рр, і характеризується інтеграцією інтересів всього портового співтовариства. Це етап, в якому наші порти знаходяться у поточному періоді. А з цього логічно випливає необхідність тісної взаємодії між з усіма учасниками ринку транспортних послуг, їх співпраці, координації дій, узгодження рішень.

Таблиця 2. Модель «WORKPORT» розвитку портів

Фактори	1960-і рр.		1970-і рр.	1980-і рр.	1990-і рр.	2000-і рр.
1	2	3	4	5	6	7
Форма власності	Інфраструктура знаходиться, головним чином, у муніципальній власності. Управління та вантажні операції знаходяться в державному або приватному секторі власності в залежності від країни / порту.	Посилення присутності приватної власності, особливо в частині управління портами, а також в частині реалізації вантажних операцій (ствідорної діяльності).		Початок приватизації національних портів (в основному у Великобританії). Укрупнення портової власності. Посилення комерціалізації. Порти стають більш орієнтованими на клієнтів. Подальша приватизація портів.	Концентрація власності контейнерних терміналів шляхом часткового поглинання міжнародними портовими операторами.	
Види вантажів	Генеральний тарно-штучний вантаж: початок змін технологій вантажних робіт; поступовий перехід до укрупнених вантажних одиниць; генеральні вантажі розділяються на палетизовані, контейнерізовані, ро-ро. Наваловальний і наливний вантаж: невеликі зміни технологій		Збільшення суден, зростання їх вантажопідйомності / вантажомісткості			Консолідація генеральних вантажів практично завершена
Організація процесів перевантаження вантажів	Генеральний вантаж		Ріст механізації та автоматизації процесів одночасно з процесом укрупнення вантажнів		Повна автоматизація перевантажувальних операцій і операцій складування на деяких контейнерних терміналах	
	Наваловальний вантаж	Висококомеханізований процес	Спеціалізація терміналів	Повна автоматизація		
	Наливний вантаж	Висококомеханізований і автоматизований процес	Спеціалізація терміналів	Збільшення автоматизації		
Підтримуючі процеси і інформаційне сполучення	Зв'язок, документообіг та обмін інформацією. Ручна форма, яка заснована на паперових носіях	Пошта, телефон, телеграф, факс	Пошта, телефон, факс, телекс, радіо, EDI ¹	Пошта, телефон, факс, телекс, радіо, EDI, Інтернет	Стандартизація інформації	Підтримуючі процеси і інформаційне сполучення
Організація труда: трудові ресурси; організація роботи; умови праці; трудовий договір; трудові відношення.	Інтенсивний розвиток технологій обробки генеральних вантажів. Механізація вантажних операцій при перевантаженні інших видів вантажів. Багато ручного труда. Сильний вплив професійних спілок і об'єднань. Ієрархічна організаційна структура управління.		Укрупнення вантажних одиниць обумовлює механізацію труда. Посилення спеціалізації робочої сили. Скорочення потрібної робочої сили зі збільшенням вантажопотоку.	Суміщення професій персоналу. Лінійна організаційна структура. Збільшення попиту на ІТ-знання. Цілодобовий цикл роботи. Заміни прямих контрактів з робочими на контракти через пул.	Збільшення акценту на якість послуг, що надаються.	Завершення фази трудових пулів.

1	2	3	4	5	6	7
Портові функції Процеси розвитку	Порт стає містом зміни видів транспорту. Порт орієнтується на вантаж. Другорядність інших видів діяльності за межами основної функції обробки вантажів. Неформальні контакти з клієнтами порту.		Зростання індустріалізації. Розширення території порту. Більш тісні контакти порту з клієнтурою.	Диверсифікація діяльності компаній, які знаходяться в порту. Створення вільних портів і центрів дистрибуції. Об'єднане управління портом.	Процеси глобалізації портів.	
Аспекти охорони здоров'я і безпеки робочого середовища	Небезпека портових робіт із-за високої долі ручного труда, неадекватного регулювання, недостатньої підготовки портових робочих.		Зниження аварійності і скорочення невиходів на роботу із-за проблем зі здоров'ям. Зменшення аварій проблем з фізичним здоров'ям із-за скорочення ручних операцій.	Удосконалюється ергономічний дизайн вантажного обладнання.	Поліпшення підготовки по техніці безпеки. Офіційна політика захисту здоров'я і безпеки. EU – директиви по робочому часу. Посилення екологічного контролю на робочому місці.	
Екологія	Як правило, низький рівень обізнаності.		Реагування на інциденти.	EU – екологічна оцінка. Спеціальне законодавство. Підвищення обізнаності / відповідальності. Місцеві ініціативи.	Більш активна система екологічного менеджменту. Директиви ЕС, ESPO/ECO ²	Інтеграція екологічних проблем в бізнес-план. Гарантована якість EMS.
Визначальні (ключові) фактори	Висока трудомісткість.		Висока капіталомісткість Впровадження нових технологій.	Подальший прогрес в технологіях	Подальший розвиток інформаційних і комунікаційних технологій.	<u>Інтеграція інтересів всього портового співтовариства</u>

Джерело: [14]

Примітка.

EDI (Electronic Data Interchange, Електронний обмін даними) - технологія, що дозволяє обмінюватися комерційною інформацією між організаціями у структурованому цифровому вигляді, заснованому на регламентованих форматах і стандартах повідомлень.

² ESPO - Європейська організація морських портів (European Sea Ports Organization). Заснована в 1993 р., є представницьким органом портової влади, асоціацій портів і портових адміністрацій морських портів держав-членів Європейського Союзу та Норвегії. Україна є членом-спостерігачем цієї організації.

ЕСО - Організація економічного співробітництва.

Вільний порт або порто-франко (італ. Porto franco - вільний порт) - порт (або його певна частина, порто-франківська зона), що користується правом безмитного ввезення та вивезення товарів. Порто-франко не входить до складу митної території держави. Часто створюється при спорудженні нового порту з метою залучення вантажів і збільшення товарообігу. Більшість міжнародних аеропортів мають аналогічні зони, хоча вони, як правило, називаються інтернаціональними або митними зонами.

У зв'язку з цим, поява розглянутої моделі з'явилася важливим кроком в удосконаленні теоретичних уявлень щодо хронології розвитку портів.

Разом з тим у цій моделі є деякі недоліки:

модель має табличну форму представлення (табл. 2), що уявляється не дуже наочним і зовсім не зручним для використання;

модель перевантажена змістовним описом, що ускладнює її використання, як прикладного інструменту для визначення шляхів розвитку портів;

модель відображає дискретні стадії розвитку портів, що не відповідає дійсності;

модель не враховує факт того, що не всі порти обов'язково проходять весь цикл для того, щоб отримати статус порту «п'ятого покоління».

Доцільно звернути увагу, що модель «WORKPORT» вперше, але лише на рівні деякого спостереження, зафіксувала факт такого явища, як інтеграція інтересів всього портового співтовариства, явища, яке з часом стало властивим не тільки портовому бізнесу, а взагалі транспортному середовищу, набувши глобальні світові масштаби.

Далі ідея, а скоріше спостереження щодо інтеграції інтересів всього портового співтовариства, знайшли продовження у моделі «ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ І РЕГІОНАЛІЗАЦІЇ ПОРТІВ», яку у 2005 р. запропонували канадські вчені Жан-Поль Родріге (Jean-Paul Rodrigue) і Тео Ноттебум (Theo E. Notteboom) [15] (рис. 4). Ця модель базується на скоригованій моделі Джеймса БЕРДА, тобто на той моделі, що передбачає три уточнених етапи розвитку портів (становлення, розширення, спеціалізацію). До визначеної моделі (рис. 4) Жан-Поль Родріге і Тео Ноттебум додали фазу «портової регіоналізації» (рис. 6), а при її описанні використали термін «хінтерленд (hinterland) порту». Цей термін не є новим. Він був введений до понятійного апарату географії А.Геттнером ще наприкінці XIX ст. У перекладі з німецької мови «хінтерленд (hinterland)» позначає «земля за...». Але з часом концепція хінтерлендів змінювалася і у 2005 р. ООН визначила «хінтерленд порту», як область виробництва порту і внутрішня материкова область, яка обслуговується портом.

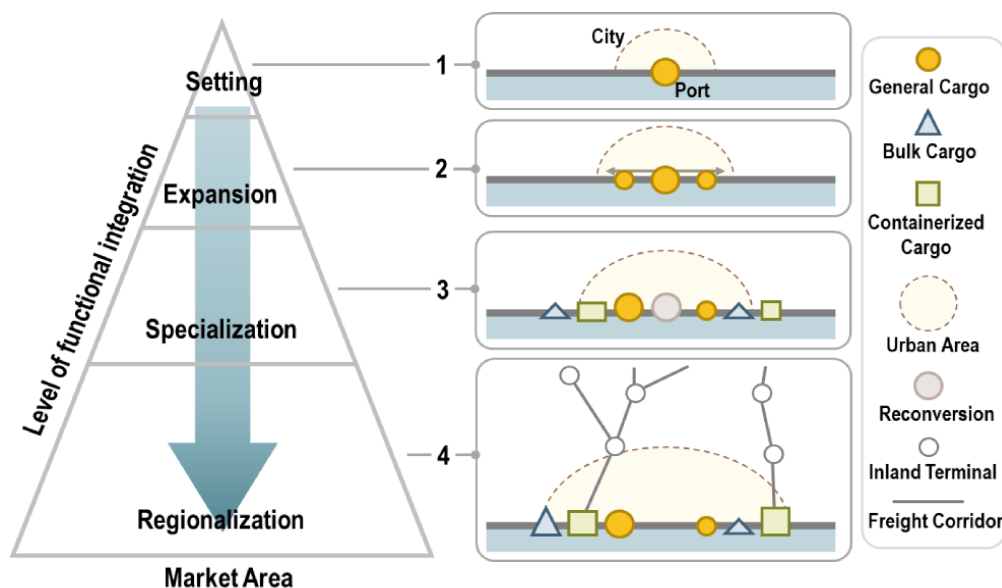


Рис. 6. Модель «ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ І РЕГІОНАЛІЗАЦІЇ ПОРТІВ» (2005 р.) – модель РОДРІГЕ-НОТТЕБУМА (2005 р.)

Джерело: [15]

Відповідно до моделі «ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ І РЕГІОНАЛІЗАЦІЇ ПОРТІВ» (рис. 6) будь-який порт починається з невеликого портового майданчика з незначними бічними набережними, прилеглими до центру міста (1) (Етап 1. Становлення (Setting)).

Подальший розвиток порту відбувається шляхом його територіального (просторового) розширення. Це, у свою чергу:

є результатом розвитку транспортних технологій, зокрема технологій перевезення і перевантаження вантажів;

характеризується зміною просторових зв'язків між портом та міським ядром, оскільки, наприклад, нові термінали та доки вже будуються у районах, що розташовані подалі від ділового центру міста (2) (Етап 2. Розширення (Expansion)).

На наступному етапі (Етап 3. Спеціалізація (Specialization)) спостерігається посилена спеціалізація вантажно-розвантажувальних робіт. Так, зростають розміри суден, збільшується попит на додаткові обладнані ділянки і території, що пристосовані для обробки (перевантаження) і зберігання певних видів вантажів. Ці нові ділянки порту зосереджуються на місцях віддалених від існуючих споруд порту. Таким чином портовий простір розширюється і спеціалізується. На цьому етапі, як правило, відбувається поступова передача місту первинних портових ділянок, розташованих біля центру, для їх конверсійного використання (тобто для будівництва житла, розробки приморських парків, розвитку туристичних зон). Тобто створюються численні можливості для реконверсії портових територій, пристосування їх для інших цілей та цивільного використання (створення набережних парків, побудова житла, комерційних споруд, створення туристичних зон тощо).

Наступна фаза стосується регіоналізації портів (Етап 4. Регіоналізація (Regionalization)) (рис. 6).

Фаза регіоналізації портів (Етап 4. Регіоналізація (Regionalization)) у моделі Родріге-Ноттебума (рис. 6) передбачає етап інтеграції між прибережними портами та об'єктами материкової інфраструктури (4).

Далі у тій же роботі [15] розглянута вище модель (рис. 6) була уточнена і представлена її авторами у вигляді моделі «ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (рис. 7). У цій версії моделі весь період розвитку портів Жан-Поль Родріге і Тео Ноттебум представили у сукупності шести етапів (рис. 7).

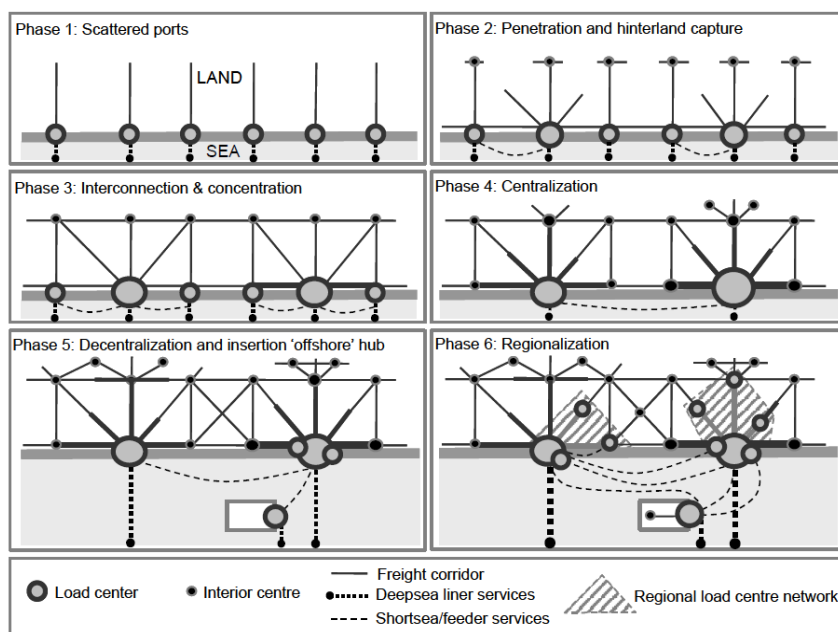


Рис. 7. Модель «ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2005 р.)
– уточнена модель РОДРІГЕ-НОТТЕБУМА (2005 р.)

Джерело: [15]

Звертає увагу той факт, що класична модель «ANYPORT» (рис. 2), тобто первина модель розвитку портів, яка розроблена у 1980 р. Джеймсом Бердом, також мала 6 етапів. А першим, хто її наважився удосконалити шляхом скорочення етапів був ніхто інший, як Жан-Поль Родріге. І вже через деякий час, у 2005 р., а потім і у 2010 р., саме Жан-Поль Родріге зі своїм співавтором вирішили повернутися до 6-ти етапної моделі, правда, з дещо іншими назвами і осучасненими змістами етапів. Так, в авторській інтерпретації удосконалена модель «ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2005 р.) передбачає такі фази розвитку (рис. 7):

Фаза 1. Окремі роз'єднанні (розкидані) порти (Scattered ports).

Фаза 2. Проникнення і завоювання хінтерленда (Penetration and hinterland capture).

Фаза 3. Взаємозв'язок і концентрація (Interconnection and concentration).

Фаза 4. Централізація (Centralization).

Фаза 5. Децентралізація і включення портів (хабів) траншшипменту (Decentralization and insertion of transshipment hubs).

Фаза 6. Регіоналізація (Regionalization).

Таким чином, саме шостий етап передбачає регіоналізацію, але з акцентом на інтеграцію порту лише з регіональною мережею вантажних центрів. Так, в цій моделі передбачається, що регіоналізація розширює хінтерленд порту, який за допомогою ряду ринкових стратегій все тісніше пов'язує порт з внутрішніми районами країни і центрами розподілу внутрішньоматерикових вантажопотоків (рис. 7). При цьому в моделі робиться припущення, що всі шляхи сполучення, вантажні коридори та вантажні розподільчі центри вже сформовані, належним чином облаштувані та обладнані. При цьому вантажні розподільчі центри, в основному, мають дві форми:

порти внутрішніх водних шляхів (inland waterway ports), які інтегруються у хінтерленд прибережних портів (портів траншшипменту) через систему фідерних перевезень (перевезень вантажів на баржах чи на малотоннажних судах). Наприклад, це стосується дельти Рейн / Шельдт у Західній Європі, де внутрішні річкові порти виступають в якості живильників для дельтових портів, таких як Роттердам і Антверпен;

внутрішні (внутрішньоматерикові) транспортні вузли (вантажні термінали) суміжних видів транспорту (inland ports) (у тому числі так звані «сухі порти»), які інтегруються у хінтерленд прибережних портів через системи наземних транспортних (залізничних та/або автомобільних) мереж.

Таким чином, тенденція інтеграції інтересів всього портового співтовариства, яка спостерігалася у 2000-х рр. XX ст. і вперше зафіксована у моделі «WORKPORT», набуло свого логічного продовження і відповідного відображення у моделі Родріге-Ноттебума (2005 р.). Але, на жаль, цей зв'язок між моделями і відповідними явищами авторами моделі Родріге-Ноттебума так і не був продемонстрований у явному вигляді через конкретні теоретичні положення, визначення та висновки. Так, тенденція інтеграції інтересів всього портового співтовариства у моделі Родріге-Ноттебума представлена і відповідним чином візуалізована (рис. 7) через стадію Регіоналізації (Regionalization), яка, на жаль, враховує лише просторовий аспект визначеного явища, причому лише просторову інтеграцію прибережної інфраструктури портів і внутрішньоматерикової інфраструктури суміжних видів транспорту.

Згодом ця модель була дещо удосконалена і «побачила світ» у роботі 2010 р. [16] під назвою модель «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ». В цій моделі авторами переглянутий зміст шостої фази (рис. 8), яка тепер передбачає інтеграцію прибережних портів не тільки з внутрішньоматериковою інфраструктурою, а й з «офшорними» хабами, розташованими на острівних територіях. При цьому автори моделі при її описі зміщують акцент і зосереджують увагу на пріоритетності регіоналізації на основі саме форленду порту.

Таким чином, модель «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2010 р.) (рис. 8) відрізняється від попередніх моделей. Вона:

поряд з поняттям «хінтерленд порту», розглядає поняття «форленд порту», як область, що пов'язана з розглянутим прибережним портом за допомогою морського транспорту;

уточнює зміст етапу регіоналізації, який включає інтеграцію прибережних портів з «офшорними» хабами, розташованими на острівних територіях, роблячи акцент на пріоритетності саме портового форленду.

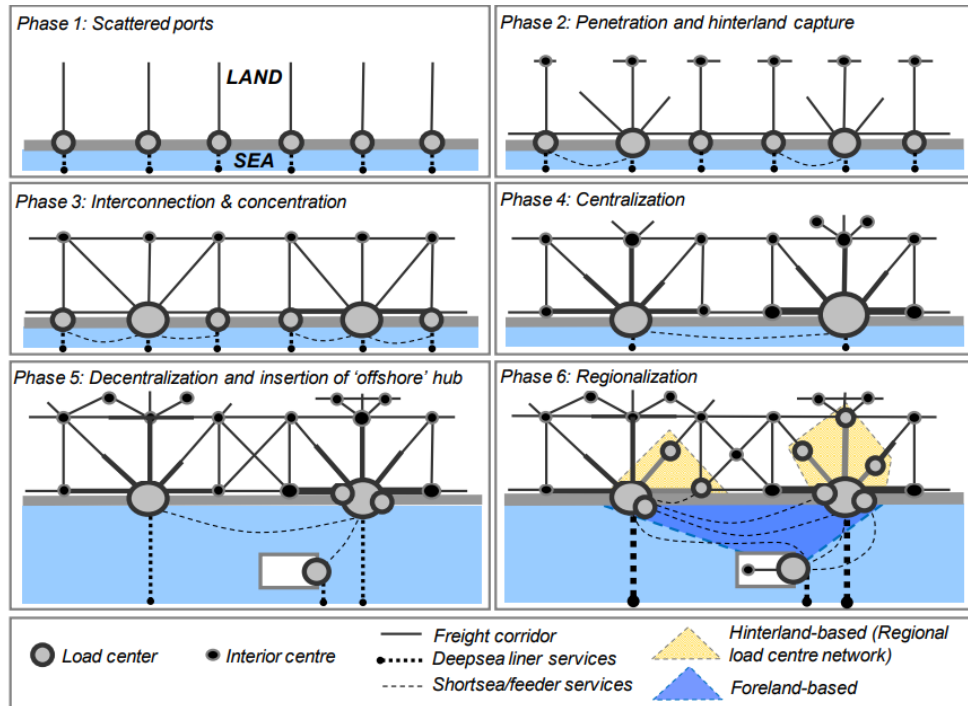


Рис. 8. Модель «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ», включаючи переглянуту шосту фазу (2010 р.) – уточнена модель Родріге-Ноттебума (2010 р.)

Джерело: [16]

Поряд з тим, модель «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2010 р.) має і деякі недоліки. Так, наприклад, автори моделі «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» у своїх роботах відмічають, що перехід до фази портової регіоналізації – це процес поступовий, який керується ринком. Тобто на етапі портової регіоналізації простежується всім відомий метафоричний образ «невидимої руки ринку», який колись сформулював Адам Сміт для опису здатності ринків до саморегулювання, у тому числі, за допомогою цін. Але, крім ціни на транспортні послуги, у сфері портового бізнесу діють інші ринкові механізми, які впливають на рух цієї «невидимої руки». І це «уходить» із поля зору авторів моделі «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2010 р.). Крім того, автори моделі:

роблять акцент на пріоритетності зовнішніх взаємозв'язків між територією прибережного порту та його форлендом і хінтерлендом, не приділяючи уваги внутрішньопортовим зв'язкам. Зниження ж уваги саме до внутрішньопортових зв'язків в окремих ситуаціях може «паралізувати» роботу всього порту, як «пляшкового горлечка», в якому «зустрічається» велика кількість вантажопотоків і потоків транспортних засобів, в якому відбувається взаємодія різних видів транспорту і здійснюють свою діяльність різні суб'єкти ринку транспортних послуг, пов'язаних з обслуговуванням вантажів, пасажирів, технічних засобів різних видів транспорту. І цим суб'єктам потрібно домовлятися, узгоджувати свої рішення і координувати свої дії, що б не зупинити роботу всього порту;

роблять акцент на важливості розвитку інфраструктури форленда і хінтерленда, недооцінюючи значення розвитку внутрішньопортової інфраструктури;

роблять акцент на просторових і суто географічних зв'язках між морським і сухопутним відрізками доставки вантажів і не зосереджують уваги на функціональних зв'язках між суб'єктами управління, які керують відповідними об'єктами транспортної інфраструктури, створюють і реалізують практичний механізм втілення в життя таких зв'язків.

Висновки

1. Незважаючи на наведені і проаналізовані вище моделі, слід зазначити, що досі немає універсального підходу до вивчення процесів розвитку портів, досі не вдалося створити єдиної признаної всім транспортним співтовариством універсальної моделі розвитку портів.

2. Моделі UNCTAD «ГЕНЕРАЦІЇ ПОРТІВ» і «WORKPORT» протягом довгого часу широко використовувалися для класифікації портів, але в цьому сенсі зазнали серйозної критики, оскільки, дійсно, важко знайти порт, який би чітко підходив під дану класифікацію. Деякі ознаки порту за наведеними класифікаціями відповідають більш ранньому «поколінню», а інші – більш пізньому.

3. Сьогодні найбільш наближеною до сучасних світових тенденцій є розглянута вище модель «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2010 р.), яку запропонували Жан-Поль Родріге і Тео Ноттебум.

4. Фаза регіоналізації, яка формалізована у різних варіаціях моделі Родріге-Ноттебума, виводить перспективи розвитку кожного порту за межі його діючих територіальних кордонів, тобто концептуально – на інший рівень, що є більш значним з точки зору його географічних масштабів. У контексті зробленого висновку, очевидно, наступне:

реалізація фази регіоналізації портів неможлива сьогодні без інтеграції інтересів всього портового співтовариства, а значить і без узгодженої та скоординованої роботи всіх учасників транспортного процесу доставки вантажів. На цьому, на жаль, автори моделі не акцентують свою увагу. Але, на наш погляд, саме в цьому і міститься секрет «невидимої руки ринку» у портовому бізнесі на етапі його регіоналізації. Також із поля зору авторів моделі «РОЗВИТКУ ПОРТОВОЇ СИСТЕМИ» (2010 р.) «випадає» і розгляд дієвих практичних механізмів реалізації такої інтеграції;

такі елементи транспортної інфраструктури, як порти-хаби, фідерні порти, офшорні порти острівного розташування, вантажні коридори, вантажні розподільчі центри і т.п., а також в цілому портовий хінтерленд і форленд, доцільно досліджувати у сукупності, як єдину систему, що формує мережу вантажорозподілу;

у свою чергу, всі вузлові елементи хінтерлендів і форлендів різних портів, формують інфраструктурний каркас регіональної та в цілому глобальної системи міжнародних вантажоперевезень.

Таким чином, досліджувати перспективи розвитку того чи іншого порту необхідно як єдину систему разом з його хінтерлендом і форлендом, але не зменшуючи роль процесів управління і приділяючи увагу розвитку внутрішньопортової інфраструктури та системи внутрішньопортового управління.

5. Всі розглянуті в роботі моделі:

надають системного погляду на процеси і можливі напрями майбутнього розвитку того чи іншого порту;

розглядаються не тільки як інструмент суто історичного аналізу розвитку того чи іншого порту, а й як дієвий механізм, який може відповісти на питання:

а) завдяки чому цей порт досяг такого рівня розвитку;

б) як цей досвід можливо використовувати для інших портів;

в) який шлях майбутнього розвитку обрати конкретному порту з урахування наявних реалій.

Відповідь на останнє питання залежить від багатьох факторів та умов. Зокрема велике значення мають поточний стан порту та його інфраструктури, географічне розташування та

інвестиційні можливості, а також особисті і професійні якості фахівця, що приймає рішення, і та модель розвитку, яку ця особа обирає за основу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Paridaens H., Notteboom T. National Integrated Maritime Policies (IMP) : Vision Formulation, Regional Embeddedness, and Institutional Attributes for Effective Policy Integration. *Sustainability*, 2021. Vol. 13, P. 9557. <https://doi.org/10.3390/su13179557>.
2. Meers D., Macharis C., Vermeiren T., van Lier T. Modal choice preferences in short-distance hinterland container transport. *Research in Transportation Business & Management*. June 2017. Vol. 23. P. 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.06.019>.
3. Maab Q., Jiaab P., Sheab X., Haralambidesbc H., Kuanga H. Port integration and regional economic development: Lessons from China. *Transport Policy*, September 2021. Vol. 110. P. 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.06.019>.
4. Zhaoa C., Wangb Ye., Yu G., Brown S., Lid R.. The evolution of the port network along the Maritime Silk Road : From a sustainable development perspective. *Marine Policy*, April 2021. Vol. 126. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104426>.
5. Lee P., Lam J. Developing the Fifth Generation Ports Model, (in:) *Dynamic Shipping and Port Development in the Globalized Economy*, ed. P. Lee, K. Cullinane, Palgrave Macmillan, London, 2016. P. 188.
6. Kaliszewski A. Fifth and sixth generation ports (5GP, 6GP) – evolution of Economic and social roles of ports. *Factors contribution to competitiveness*, April 2018. URL : <https://www.researchgate.net/publication/324497972>.
7. Bebbington T. 50,000 TEU... the Future or Not?, *Maritime Executive*, 9 November 2017. URL : <https://maritime-executive.com/editorials/50000-teu-the-future-or-not>.
8. Кириллова О.В., Магамадов О.Р., Шурін Б.В. (2021). Зародження і розвиток внутрішньопортового оперативного управління. *Вісник Одеського національного морського університету*, 2021. № 64. С. 81-98. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2021-1-81-98>.
9. Kyrylova O.V., Korol V.Y., Kyrylova V.Y. To the question of the functional unity of the vehicular and cargo handling processes, and also the modern role of the ports. *Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien: International periodic scientific journal. Sergeieva&Co Karlsruhe, Germany*, 2019. Ісяю 9. Part 1. P. 104-111. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2019-09-01-017>.
10. Kirillova Ye., Malaksiano M. Substantiation of structure of the port handling equipment fleet based on a multicriteria approach // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017. № 5/3 (89). P. 52-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111971>.
11. Закон України «Про морські порти України». URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4709-17#Text>.
12. Кодекс торговельного мореплавства України. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-вр#Text>.
13. Port marketing and the challenge of the third generation port, UNCTAD, TD/B/C.4/AC.7/14, Geneva 1991. P. 23.
14. Beresford A.K.C., Gardner B.M., Pettit S.J., Naniopoulos A., Wooldridge C.F. The UNCTAD and WORKPORT models of port development: evolution or revolution? „*Maritime Policy and Management*”, 2004, № 2. P. 97. <https://doi.org/10.1080/0308883042000205061>.
15. Notteboom T., Rodrigue J-P. Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development, *Maritime Policy and Management*, 2005. Vol. 32, No. 3. P. 297-313. <https://doi.org/10.1080/03088830500139885>.
16. Notteboom T., Rodrigue J-P. Foreland-Based Regionalization: Integrating Intermediate Hubs with Port Hinterlands, *Research in Transportation Economics*, 2010. Vol. 27. P. 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.12.004>.

REFERENCES

1. Paridaens, H., Notteboom, T. (2021). National Integrated Maritime Policies (IMP) : Vision Formulation, Regional Embeddedness, and Institutional Attributes for Effective Policy Integration. *Sustainability*, 2021. 13, 9557. <https://doi.org/10.3390/su13179557>.
2. Meers, D., Macharis, C., Vermeiren, T., & van Lier, T. (2017, June). *Modal choice preferences in short-distance hinterland container transport. Research in Transportation Business & Management*. (June 2017). (Vol. 23, pp. 46-53). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.06.019>.
3. Maab, Q., Jiaab, P., Sheab, X., Haralambidesbc, H., & Kuanga, H. (2021). *Port integration and regional economic development: Lessons from China. Transport Policy*. (September 2021). (Volume 110, pp. 430-439). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.06.019>.
4. Zhaoa, C., Wangb, Ye., Yu, G., Brown, S., & Lid, R. (2021, April). *The evolution of the port network along the Maritime Silk Road : From a sustainable development perspective. Marine Policy*, (April 2021). (Vol. 126). <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104426>.
5. Lee P., Lam J. (2016). *Developing the Fifth Generation Ports Model, (in:) Dynamic Shipping and Port Development in the Globalized Economy*, ed. P. Lee, K. Cullinane, Palgrave Macmillan, London, 2016. P. 188.
6. Kaliszewski, A. (2018). *Fifth and sixth generation ports (5GP, 6GP) – evolution of Economic and social roles of ports. Factors contribution to competitiveness*, April 2018. URL : <https://www.researchgate.net/publication/324497972>.

7. Bebbington, T. (2017, November). *50,000 TEU... the Future or Not?, Maritime Executive*, (November 2017). (pp. 9). URL : <https://maritime-executive.com/editorials/50000-teu-the-future-or-not>.
8. Kyrylova, O.V., Mahamadov, O.R., & Shurin, B.V. (2021). Zarozhennia i rozvytok vnutrishnoportovoho operatyvnoho upravlinnia [Origin and development of intraport operational management]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu - Bulletin of Odessa National Maritime University*, 64, 81-98. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2021-1-81-98>.
9. Kyrylova, O.V., Korol, V.Y. & Kyrylova, V.Y. (2019). To the question of the functional unity of the vehicular and cargo handling processes, and also the modern role of the ports. *Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien: International periodic scientific journal*. Sergeieva&Co Karlsruhe, Germany, 9(1), 104-111. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2019-09-01-017>.
10. Kirillova, Ye., & Malaksiano, M. (2017). Substantiation of structure of the port handling equipment fleet based on a multicriteria approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(89)), 52-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111971>.
11. Zakon Ukrainy «Pro morskii porty Ukrainy» [Law of Ukraine «On Sea Ports of Ukraine»]. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4709-17#Text>.
12. Kodeks torhovelnoho moreplavstva Ukrainy [Merchant Shipping Code of Ukraine]. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-вп#Text>.
13. Port marketing and the challenge of the third generation port. (1991). *UNCTAD, TD/B/C.4/AC.7/14, Geneva*, 23.
14. Beresford, A.K.C., Gardner, B.M., Pettit, S.J., Naniopoulos, A., & Wooldridge, C.F. (2004). *The UNCTAD and WORKPORT models of port development: evolution or revolution? „Maritime Policy and Management”*, 2., 97. <https://doi.org/10.1080/0308883042000205061>.
15. Notteboom, T., & Rodrigue, J.-P. (2005). Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development, *Maritime Policy and Management*, 32(3), 297-313. <https://doi.org/10.1080/03088830500139885>.
16. Notteboom, T., & Rodrigue, J.-P. (2010). Foreland-Based Regionalization: Integrating Intermediate Hubs with Port Hinterlands, *Research in Transportation Economics*, 27, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2009.12.004>.

Olena Kyrylova¹, Valeriya Kyrylova²

¹ Head of department, Department of Port Operations and Cargo Handling Technology, Odessa National Maritime University, Mechnikov str., 34, Odessa, 65029, Ukraine

² Associate Professor, Department of Fleet Operation and Shipping Technology. Odessa National Maritime University, Mechnikov str., 34, Odessa, 65029, Ukraine.

THE ORETICAL FOUNDATIONS OF SPATIAL AND FUNCTIONAL EVOLUTION OF PORTS

Ports are the basis of the infrastructural framework of the global system of international transportation. That is why questions regarding the functioning and development of ports are always relevant. For the formation of theoretical foundations and effective mechanisms of port management, it is important not only to analyze the current state of transport networks and port systems, individual ports and their infrastructure, but also to analyze the processes of the emergence, formation, functioning and development of ports. The results of such a retrospective review from the perspective of a critical analysis of the relevant historical experience contribute to the formation of a systemic view of the prospects for the development of domestic ports. After all, prospective and retrospective analyzes are closely related. Without a retrospective analysis, it is impossible to objectively understand the prospects of the movement of this or that port on the way of its further development. The paper examines the management systems that operated during the period of Ukraine's independence in its ports, analyzes the current status of domestic ports, and also conducts an analysis of existing approaches to the periodization of port development processes in the world. This was done in order to form the theoretical foundations of the spatial and functional evolution of ports: from the standpoint of a systemic view of the processes and possible directions of their future development; on the basis of methods of retrospective analysis of theoretical models existing in the world and systematized in the work, each of which at the empirical level can be chosen by a decision-maker as a visual "template" of the development of a specific port, taking into account the current state and existing realities.

Keywords: maritime transport, port industry, ports, development, management, system, retrospective analysis.

UDC 624.012.45:620.17

Viktoriiia Kovalchuk^{1*}

¹ Assistant professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7764-8057>

* **Corresponding author:** kovaltchukvv@ukr.net

ANALYTICAL AND NUMERICAL SIMULATION FOR THE FORCE OF ADHESION OF REINFORCING ROD WITH CONCRETE

The purpose of this article is to build a mathematical model for calculating the stress-strain state of structural elements of the road pavement. The model is based on the universal function parameter - the force of adhesion of the reinforcing rod to the concrete along their surface contact. It is proposed to define the specified adhesion force as the solution to the simulated boundary value problem. It is shown that it is expedient to use hyperbolic functions to solve such a problem. For the adhesion force, an analytical dependence is obtained, which is a nonlinear function.

The proposed model of analysis of the stress-strain state of the reinforcement in comparison with other models is relatively simple. The results of modeling using Maple for the analytical dependence of the adhesion force on the length of the reinforcing rod are shown. It is established that the empirical parameter of the system significantly affects the distribution function of normal stresses. The developed theory will allow design engineers to solve the problem of optimizing pavement structures.

Keywords: *differential equations, boundary-value problem, reinforcement bond to concrete, road pavement, stress-strain state.*

Introduction

At the present stage, an important area of research in the transport industry and the road sector is to find ways to extend the life of roads. This requires a corresponding improvement in the method of calculating the strength of the road surface.

Analysis of the results of research and monitoring of road quality shows that the durability of the road significantly depends on the upper layer of the road surface. One of the ways to increase the strength of pavement structures is to use different types of reinforcement for cement concrete pavement. Reinforcement of the upper pavement, and sometimes the lower layers, is used to increase the service life of the road structure.

Bond performance of concrete and reinforcement is of paramount importance in the study of the mechanism of load transfer from concrete to the inner reinforcing bar and vice versa [1]. Therefore, the development of a rational model of the interaction of reinforcement with concrete is now an urgent task for scientists and design engineers.

Analysis of recent research and problem statement

The spread of non-metallic composite reinforcement in the construction of roads in Ukraine determines the relevance of the purposeful experimental study of the adhesion of reinforcement to concrete to ensure the strength, rigidity, and crack resistance of pavement structures. Multi-layered road pavement absorbs loads from different types of vehicles. Similarly, the design of the hard surface of the airfield directly perceives the load from the influence of aircraft, and the influence of

operational equipment. In both cases, the condition of the road surface also largely depends on additional related mechanical factors and climatic conditions [2]. At the same time, full consideration of all these factors in the design of rigid pavement of airfields and roads does not allow to predict their durability at the stage of operation.

The gradual destruction of the multilayer road pavement is due to mechanical loads, temperature changes, changes in humidity etc. To prevent the consequences of such exposure to aggressive environments and increase the service life of the road structure using reinforcement of the upper road pavement, and sometimes the lower layers of the road pavement. In appropriate concrete structures, composite reinforcement is considered a promising alternative to steel reinforcement.

Wide use of composite reinforcement related to a unique combination of high strength, corrosion resistance, and low cost. The glass fiber reinforcement bars are widely used in structural engineering as reinforcement of concrete structures [4]. Compared to steel reinforcement, fiberglass reinforcement bars have such advantages as low weight, high strength, electromagnetic neutrality, corrosion resistance and low cost. All these benefits are important factors to increase durability and to reduce of the cost of technical maintenance concrete structures of the pavement, reinforced with this type of rods [5].

The decisive factor to ensure the strength of the pavement structure is the mechanical interaction of reinforcement with concrete, which depends on the size and shape of the cross-section, the profile of the outer surface of the reinforcement, and as well as the mechanical properties of the materials. Quite a lot of experimental and theoretical work is devoted to the interaction of reinforcement with concrete [1 – 16]. Testing of composite elements under direct tension is of fundamental importance to reveal the tension load response and cracking behavior of reinforced concrete [3, 8].

An experimental comprehensive study of the impact of various indicators is carried out by studying the problem of extracting the reinforcing bar from concrete [2]. Recently, not only experimental and numerical studies have become important for this task. Analytical models are also becoming an important component of the general theory of adhesion reinforcement with concrete [3].

The purpose and tasks of the study

The aim of the work is to build a mathematical model of the mechanism of load transfer from concrete to the inner reinforcing bar. The study is aimed at obtaining an analytical dependence for the force of adhesion of the reinforcing bar with concrete along their surface contact.

The second stage of this study is to conduct numerical experiments to analyze the effect of model parameters on the distribution of normal forces in the reinforcing bar and concrete.

Mathematical model of the problem of adhesion of concrete and reinforcement (analytical approach)

Forces of adhesion create a complex stress-strain state in armature and concrete. Accuracy determination of the main parameters of adhesion in reinforcement bond to concrete element depends to a large extent on taking into account real modes of loads and conditions of operation of structures, as well as the correct choice of calculation scheme [16].

Consider the problem of the stress-strain state of a reinforced concrete rod under the conditions of pulling out the reinforcement. Under certain assumptions, the process of interaction of reinforcement with concrete can be analyzed by the behavior of the threaded connection of two parts: a concrete sleeve with an internal thread and a reinforcement rod with a corresponding external thread.

Whenever an external load is applied to concrete, the reinforcing bar receives part of the load through a load transfer mechanism from concrete to steel or composite armature [1]. When a tensile force is applied to the reinforcing bar, it develops stress components parallel and perpendicular to the contact surface. Consider the distribution of normal force directed parallel to the rod.

To analyze the stress-strain state of the rod under certain assumptions, consider a simplified calculation scheme: a reinforcing rod that interacts with a concrete block on a section of length l . To

build a mathematical model, the calculation scheme of the reinforcement element of such a short length dx is accepted that the force per unit length of the reinforcing rod in contact with concrete can be considered proportional to the mutual movement of the rod and sleeve.

Two identical oppositely directed tensile forces \vec{F} act on the rod and on the block. To determine the analytical dependence of the distribution of normal forces \vec{N}_a acting in the reinforcing rod in the specified anchoring area, consider the design element of the rod, the length dx of which is assumed sufficiently small. An analytical model of the bond reinforcement with concrete consists of a second-order linear differential equation [6]:

$$\frac{d^2 N_a}{dx^2} - k^2 N_a = -c \cdot \frac{F}{E_b A_b}, \quad (1)$$

where c – the empirical proportionality factor,

A_b – the cross-sectional area of the concrete block,

E_b – elastic modulus of concrete.

When solution the equation (1), we take into account the boundary conditions:

$$N_a(0) = 0, \quad N_a(l) = F. \quad (2)$$

The general solution of the linear inhomogeneous differential equation (1) we can search in the standard form:

$$N_a(x) = B_1 \exp(kx) + B_2 \exp(-kx) + f_1(x). \quad (3)$$

Then the solution of the boundary-value problem (1)–(2) has the form:

$$N_a(x) = B_1 \exp(kx) + B_2 \exp(-kx) + \frac{c}{k^2} \cdot \frac{F}{E_b A_b}. \quad (4)$$

Here we have the following expressions for constants B_1 and B_2 :

$$B_1 = \frac{F}{2 \operatorname{sh}(kl)} \left(1 + \frac{c}{k^2} \cdot \frac{\exp(-kl) - 1}{E_b A_b} \right),$$

$$B_2 = -\frac{F}{2 \operatorname{sh}(kl)} \left(1 + \frac{c}{k^2} \cdot \frac{\exp(kl) - 1}{E_b A_b} \right).$$

You can also write the general solution of equation (1) in another form:

$$N_a(x) = C_1 \operatorname{sh}(kx) + C_2 \operatorname{ch}(kx) + \frac{c}{k^2} \cdot \frac{F}{E_b A_b}. \quad (5)$$

The integration constants C_1 and C_2 are determined from the boundary conditions (2) of the boundary value problem:

$$C_1 = \frac{F}{\operatorname{sh}(kl)} \left(1 + \frac{c}{k^2} \cdot \frac{\operatorname{ch}(kl) - 1}{E_b A_b} \right), \quad C_2 = -\frac{c}{k^2} \cdot \frac{F}{E_b A_b}.$$

The given formulae show that expression (5) is a more compact form for the analytical solution of the problem.

The integration constants C_1 and C_2 in expressions (5) or integration constants B_1 and B_2 in expressions (4) are determined from the boundary conditions (2) of the boundary value problem. These constants depend on the geometric and mechanical characteristics of the structural material of the reinforcing rod and the concrete block. Subsequent calculations showed that the empirical coefficient c also significantly affects the solution of the boundary-value problem (1) – (2).

Formula (5) gives the expression for the adhesion force in the General case. Calculations have shown that for the case of fiberglass fittings it is possible to take an approximate dependence in the form:

$$N_a(x) = F \cdot \frac{\operatorname{sh}(kx)}{\operatorname{sh}(kl)}. \tag{6}$$

If the variable x runs the value from the interval $x \in [0, l]$, then in the area of interaction of the reinforcing rod with the concrete block, the normal force N_a in the rod becomes values from 0 to F . Since for the force in the concrete block we have $N_b = F - N_a$, then when x changes from 0 to l , the forces N_b in the block change from F to 0.

Simulation results

According to the constructed mathematical model and analytical dependence for the distribution of normal forces, we analyze the influence of system parameters. In particular, we consider the influence of mechanical and geometric characteristics of the reinforcing bar and cement block on the stress-strain state of the reinforcement.

Here we performed several numerical simulations using the Maple computer mathematics system. Numerical simulations were performed for the experimental sample of the reinforcing rod and concrete block with the parameters listed in Table 1.

Table 1. List of Parameters for numerical simulation

Symbol	Description	Value/Unit
E_a	elastic modulus of reinforcing (fiberglass)	45 000 MPa
E_b	elastic modulus of concrete	30 000 MPa
d	nominal diameter of reinforcing rod	14 mm
l	bonded length ($l = 5d$)	70 mm
b	side of the cross section of the concrete block	150 mm
F	external force	80 kN

The comparative analysis of the obtained experimental data shows that the magnitude of the normal forces in the reinforced rod significantly depends on the choice of the empirical coefficient c . The graph (Fig. 1), constructed for fiberglass reinforcement, shows that for $c = 2 \cdot 10^5$ the dependence $N_a(x)$ is significantly nonlinear.

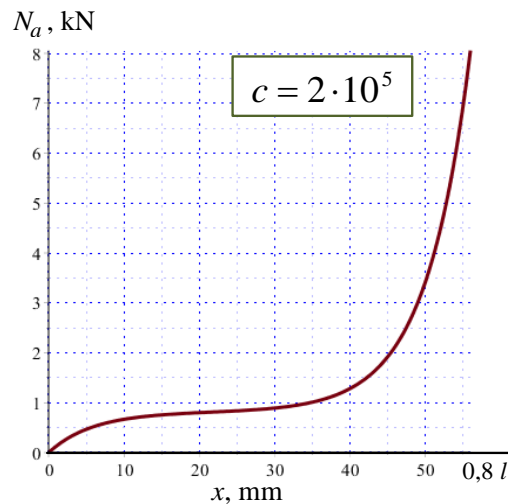


Figure 1. Distribution of normal forces in a reinforced rod

The distribution of normal forces in the reinforced rod at $c = 2 \cdot 10^3$ is almost linear (Fig. 2, a). To show the evolution of the nonlinearity of the normal force function $N_a(x)$ depending on the empirical coefficient, a graph at $c = 2 \cdot 10^4$ is also constructed (Fig. 2, b).

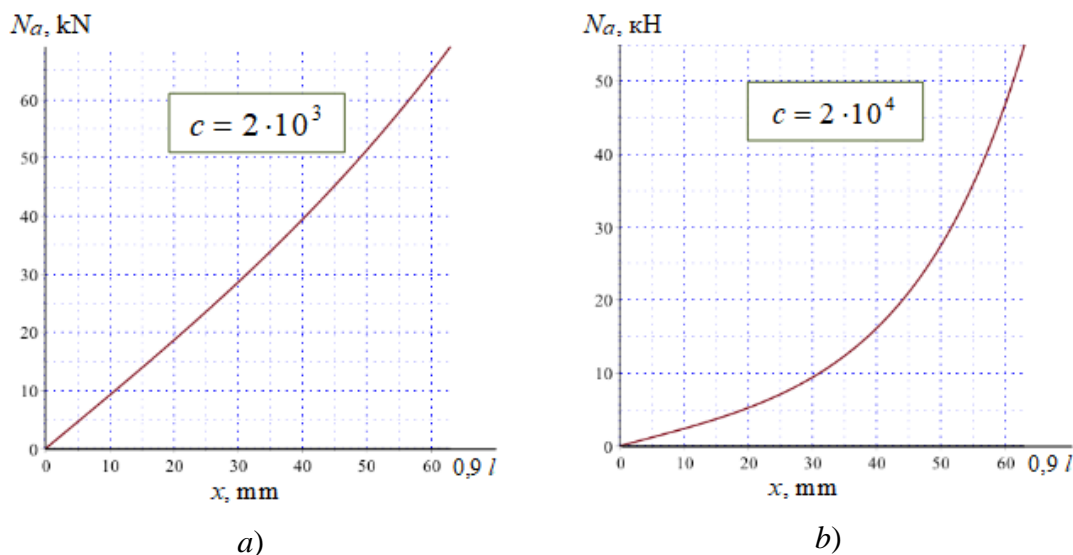


Figure 2. Influence of the empirical coefficient on the distribution of normal forces

The graph in Fig. 1 has an inflection point. This point will correspond to the extreme point on the graph for the intensity $q(x)$ of normal stresses. The intensity of normal stresses can be obtained analytically from expression (5) or (6) by differentiation:

$$q = \frac{dN_a}{dx}$$

If we take into account the exact analytical solution (5) of the boundary value problem, we have the following expression:

$$q(x) = \frac{Fk}{\text{sh}(kl)} \left(\left(1 - \frac{c}{k^2 E_b A_b} \right) \text{ch}(kx) + \frac{c}{k^2 E_b A_b} \text{ch}(k(l-x)) \right)$$

According to the approximate formula (6) we have:

$$q(x) = Fk \frac{\text{ch}(kx)}{\text{sh}(kl)}$$

Therefore, for composite reinforcement (at certain values of geometric and mechanical parameters) the function $q(x)$ has a simpler form.

For the fiberglass reinforcing rod, it is analyzed at what limits of accuracy expression (6) can be an approximation for the function of adhesion force (5). With the numerical parameters shown in Table 1, a graph of the exact analytical solution of the boundary value problem (1) – (2) was constructed. For comparison, a graph of the main part of this solution was also constructed. In Figure 3, curve 1 is constructed for analytical dependence (5), and for curve 2, formula (56) is used.

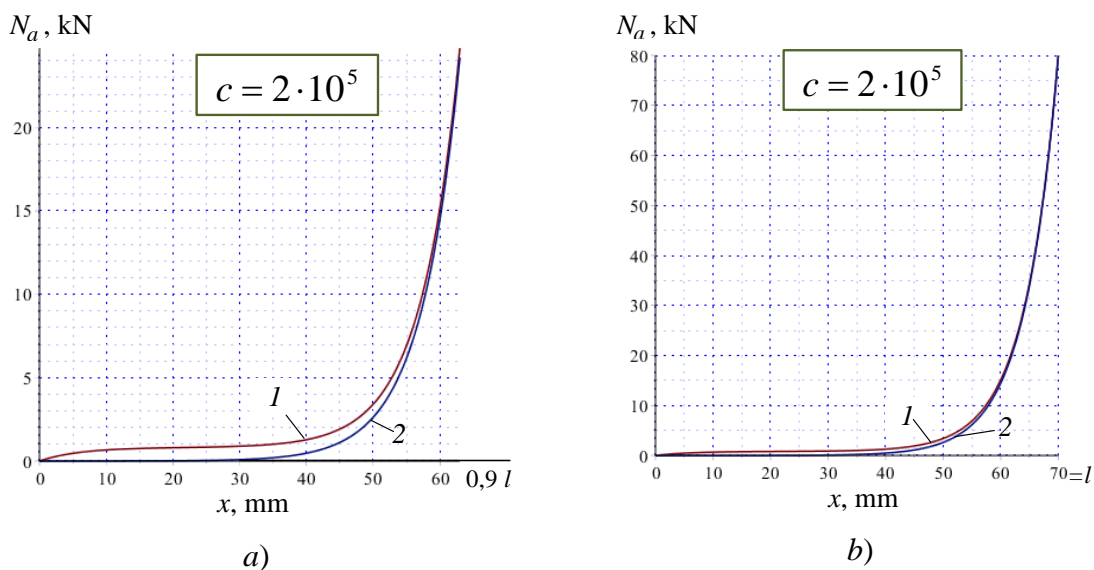


Figure 3. Normal force (curve 1) and thereof main part (curve 2) for a fiberglass reinforcing rod

Comparative analysis of Fig. 3, a) and Fig. 3, b) shows that the differences between (5) and (6) are insignificant and are observed only for small values of x . This means that only the main part (6) of the function $N_a(x)$ can be used for further studies of the stress-strain state of the reinforcement.

Similar studies have also been carried out in the case of steel reinforcement. In the constructed graphs, the difference between curves 1 and 2 is more significant. This means that an accurate analytical solution (5) must be used to analyze the stress-strain state of a steel reinforcing bar.

4. Conclusions

Finding ways to improve the reliability and durability of roads at the present stage is an important area of research in the transport industry and the road sector. At the same time, the task of improving the method of calculations of the arrangement of the upper layer of the pavement with the use of high-strength cement concrete is urgent. In this study, a mathematical model of the interaction of reinforcement with concrete is proposed.

The analytical approach to the analysis of the stress-strain state of the reinforcement in the conditions of interaction with high-strength concrete allows obtaining the dependence of the force of engagement of the reinforcement with concrete based on a simplified model. This functional dependence is nonlinear. The advantage of the analytical approach is the avoidance of numerical errors. The developed theory will allow design engineers to solve the problem of optimizing pavement structures.

REFERENCES

1. Kabir, M. R., & Islam, M. M. (2014). Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling. *Int J Civ Struct Eng*, 5(1), 80–90.
2. Mirnenko, V. I., Dulenko, D. I., & Dyptan, V. P. (2017). Modeli ta metodi ocinki napruzhenno-deformovanogo stanu zhorstkich pokryttiv aerodromiv viyskovogo pryznachennja na osnovy kincevo-elementnogo analizu [Mathematical simulation methodology for prediction of the airfield hard surface condition]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 30 (3), 146–151 [in Ukrainian].
3. Romashko-Maistruk, O. V. (2020). Modelyuvannya zcheplyennya armatury z betonom v zalizobetonnyh elementach [Modeling of reinforcement-concrete adhesion in reinforced concrete elements]. *Zbirnyk naukovykh praz Ukrainyiskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 190, 37-45 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.213925> .
4. Benin, A., Bogdanova, G., Semenov, S. (2014). Experimental study and mathematical modeling of bond of different types winding glass-plastic reinforcement with concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 617, 215–220. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.617.215> .
5. Benin, A., Semenov, S., & Bogdanova, E. (2017). Influence of Long-Term Exposure in the Concrete of FRP Rebars on Bond Characteristics. *Solid State Phenomena*, 263, 3-6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.263.3>.
6. Kiyashko, V., Kosarchuk, V., Chausov, M., Agarcov, O., & Kovalchuk, V. (2020). Napruzhenno-deformovaniy stan kompozitnoyi armatury za umov vzayemodiyi z visokomicnym betonom: analitichni rozrachunki [Stress-strain state of composite reinforcement under the conditions of interaction with high-strength concrete: analytical approach]. *Ecological Sciences*, 2(29), 100–104 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.2.16> .
7. Kabir, M. R., Islam, M. M. & Chowdhury, M. A. (2015). Bond stress-slip behavior between concrete and steel rebar via pullout test: experimental and finite element analysis. *First International Conference on Advances in Civil Infrastructure and Construction Materials*, Retrieved from <https://cutt.ly/yJa4A5t> .
8. Gribniak, V., Jakubovskis, R., Rimkus, A., Ng, P. L., & Hui, D. (2018). Experimental and numerical analysis of strain gradient in tensile concrete prisms reinforced with multiple bars. *Construction and Building Materials*, 187, 572-583. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.00234> .
9. Liu Z., Yue Q., Li R., & Chen X. (2020). Experimental study and modeling of bond of carbon-fiber-reinforced polymer grids to polymer mortar at room and elevated temperatures. *Advances in Structural Engineering*, 23(8), 1644-1655. DOI: <https://doi.org/10.1177/1369433219899784>
10. Elgabbas, F., Vincent, P., Ahmed, E.A., & Benmokrane, B. (2016). Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 91, 205-218. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.045>.
11. Ling, J., Wei, F., Zhao, H., Tian, Y., & Han, B. (2019). Analysis of airfield composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method. *Construction and Building Materials*, 212, 596-606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.336>.
12. Zheng, Y., Zhou, L., Xia, L., Luo, Y., & Taylor, S. E. (2018). Investigation of the behaviour of SCC bridge deck slabs reinforced with BFRP bars under concentrated loads. *Engineering Structures*, 171, 500-515. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.105>.

13. Fakoor, M., & Nematzadeh, M. (2021). Evaluation of post-fire pull-out behavior of steel rebars in high-strength concrete containing waste PET and steel fibers: Experimental and theoretical study. *Construction and Building Materials*, 299, 123917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123917>.

14. Hu, A., Liang, X., & Shi, Q. (2020). Bond characteristics between high-strength bars and ultrahigh-performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(1), 04019323. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002919](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002919).

15. Qasem, A., Sallam, Y. S., Eldien, H. H., & Ahangarn, B. H. (2020). Bond-slip behavior between ultra-high-performance concrete and carbon fiber reinforced polymer bars using a pull-out test and numerical modelling. *Construction and Building Materials*, 260, 119857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119857>.

16. Kolchunov, V. I., Yakovenko, I. A., & Dmitrenko, E. A. (2016). Konechno-elementnoye modelirovaniye nelineynoy ploskoy zadachi scepheniya betona i armatury v PK Lira-SAPR [Finite-element modeling of the nonlinear plane problem of adhesion of concrete and reinforcement in the Lira-CAD PC]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy – Industrial construction and engineering structures*, 3, 6-15 [in Russian]. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbis_2016_3_3.

Вікторія Ковальчук¹

¹ Доцент, Кафедра теоретичної і прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

АНАЛІТИЧНЕ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛИ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРНОГО СТЕРЖНЯ З БЕТОНОМ

Метою даної статті є побудова математичної моделі для розрахунку напружено-деформованого стану конструктивних елементів дорожнього покриття автомобільних доріг. Модель базується на універсальному функціональному параметрі – силі зчеплення арматурного стержня з бетоном уздовж їх поверхневого контакту. Запропоновано визначати задану силу зчеплення як розв'язок змодельованої крайової задачі. Показано, що для розв'язання такої задачі доцільно використовувати гіперболічні функції. Для сили зчеплення отримано аналітичну залежність, яка є нелінійною функцією.

Запропонована модель аналізу напружено-деформованого стану арматури в порівнянні з іншими моделями є відносно простою. Наведено результати моделювання за допомогою Maple для аналітичної залежності сили зчеплення від довжини арматурного стержня. Встановлено, що емпіричний параметр системи суттєво впливає на функцію розподілу нормальних напружень. Розроблена теорія дозволить інженерам-проектувальникам вирішувати задачу оптимізації конструкцій дорожнього покриття.

Ключові слова: диференціальні рівняння, крайова задача, зчеплення арматури з бетоном, дорожнє покриття, напружено-деформований стан.

Halyna Nesterenko¹, Mykhailo Muzykin², Oleh Strelko³, Rozalia Shcherbyna⁴, Olena Pavlenko⁵

¹ Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1629-0201>

² Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Technologies and International Logistics, University of Customs and Finance, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-7061>

³ Doctor of Historical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Transportation Processes Operation, State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3173-3373>

⁴ Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department "Transport Technology and Process Control Traffic" of the State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4505-921X>

⁵ without a scientific degree, assistant of the department "Operational Management" of the Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6509-9406>

WAYS TO INCREASE RAILWAY COMPETITIVENESS

Nowadays, railway transport is the most developed in Ukraine. It is the heart of transport services for individuals and legal entities, without it is difficult to imagine the normal functioning of production facilities and logistics firms. Rail transport also occupies the main place among domestic traffic. Passenger transportation occupies a significant place in the work of transport, so suburban transportation occupies the second place in terms of mass transportation after intercity transportation by automobile transport. The demand for this type of transportation can be called elastic, since there is an impact of seasonality on transportation, for example, the beginning and ending of academic semesters, vacation time. Therefore, it is advisable to consider tourist trains that could run on sections of the Dnipro-Pivdennij station – Apostolovo station, Dnipro-Pivdennij station – Surskoye station, Dnipro-Pivdennij station – Zhovtokamenka station, Dnipro-Pivdennij station – Elizarovo station. The article provides graphs of the movement of these trains, allowing passengers to visit attractions along the entire route. Consequently, tourist routes can improve the development of tourism throughout Ukraine, and not popular destinations. This may result in increased demand for tourist trains, increased monetization of passenger transportation, thereby improving passenger comfort.

Keywords: railway transport, passenger transportation, tourist trains, tourist routes.

Introduction. In many countries of the world, tourism occupies an important place of influence on the country's economy. Tourism has always been very developed in Ukraine. During the period of the COVID19 quarantine, leaving the country was impossible, so domestic tourism was at its peak for decades, so thanks to our picturesque nature, tourist routes were built in other parts of the country. Also note that the profitability of rail tourism passenger transportation becomes a key and effective method of reducing the costs of subsidizing such transportation and bringing it to a profitable level.

Analysis of recent research and problem statement. Tourism is one of the most profitable sectors of the economy for the country. Studying the classification of tourism, it is possible to divide it, namely by: time, territorial affiliation, goals, seasonality, type of route construction, integration of modes of transport, degree of transport provision, completeness of tourist services and degree of concentration of passengers [1-5]. Studying already has a demand in Ukraine, it can be placed that seasonal tourism by rail transport, namely southern destinations in the summer and western

destinations in the winter, is profitable and has a great demand [6-8]. During such periods, additional trains are introduced in the directions where collection and collection are scheduled to be observed.

The peculiarities of tourism in Ukraine were studied by numerous scientists who described in their works, namely Malska M.P., Davidenko L.I., Orekhovska T.M., Poklonskyi F.E. and other. Considering their work, Matsepluk L.V. noted that in the works of previous scientists quite little attention was paid to domestic tourism. So, taking into account the results of the American company "Wagon Lee", the company "Great Europe. it was assumed that tourist trains are and remain relevant for railway passengers. [9]

Anisiewicz [10], Tkachenko, Melnichenko and Boyko [11] also made significant contributions to the study of this problem.

The purpose and main tasks of the article. Research on the development of rail tourism and increasing revenue for the railway through attracting tourists and additional services. This article offers tourist routes that can run on the territory of the Cisdnieper Railways. This will make it possible to organize excursions for domestic and foreign residents, which will ultimately bring material benefits for Ukrzaliznytsia PJSC. The task was to develop tourist routes taking into account interesting tourist areas of the selected region and all indicators that would determine the success and profitability of the railway.

Novelty and scientific significance. Studying the issue of tourist trains, it was determined that the opportunity of laying such trains in strict lines of the schedule is possible and relevant for the area under consideration.

Research materials and methods. Railway transport is the most developed in Ukraine [12]. The advantages of this type of transport are wide distribution and low tariffs. The carrying capacity of the railway network significantly exceeds the current volumes of traffic. The importance of railway transport in the system of transport communications of Ukraine is enhanced by the fact that the main trans-European transport corridors pass through the territory of the state: East - West, Baltic - Black Sea. 46% of total transportation is carried out by rail, but only 14% of international transportation is carried out. In particular, the trans-European railway line E-30, which originates in Berlin, crosses Ukraine on the route Mostyska — Lviv — Kyiv and continues to Moscow. On the territory of Poland, it intersects with high-speed highways E-59 and E-65 and creates the possibility of high-speed rail connections between almost all European countries.

Railway transport is one of the most important branches of the economy of Ukraine [13-15]. It provides production and non-production needs of material production, non-production sphere, as well as the population in all types of transportation.

By functional features, railway transport is divided into freight and passenger. This is due to the fact that transport is a necessary prerequisite for the functioning of both material production and the service sector, including passenger transportation [16-18].

Passenger railway transport is a branch of the non-production sphere and belongs to the infrastructure industries. Freight transport is a branch of production infrastructure. Without directly producing material products, freight transport is the fourth branch of material production after mining, processing industry and agriculture. None of the named three main branches of material production is able to function without transportation. The product is ready for consumption only when it is delivered to the consumer.

On the one hand, railway transport is an indispensable condition for the functioning of the production itself, where it delivers raw materials, fuel and energy resources, components, equipment, etc., and on the other hand, it delivers finished products to the consumer. Thus, in the process of production of finished products, transport has a significant impact on its cost, and hence on efficiency and price. The reduction of the transport component in the cost of manufactured products contributes to the increase in production efficiency. It is possible to reduce transport costs both by improving the functioning of transport, by replacing one type with another, more efficient for the transportation of these products, and by improving the territorial organization of production, which will reduce

transport costs for the delivery of raw materials, fuel and energy resources, equipment, and finished products [19-21].

Railway transport, as transport in general, is a necessary condition for the specialization and comprehensive development of the national economic complexes of the regions, the formation of TECs of both local and district-forming importance. It contributes to the social territorial division of labor, the formation of connections between settlements and within them. Without transport, the integration of Ukraine into the global economic system is impossible. This requires the modernization of old and the construction of new transport highways of interstate importance.

Individual modes of transport do not function in isolation. Performing a joint function of providing the national economic complex with freight and passenger transportation, various types of transport form close relationships among themselves. As a result, a transport system is formed, which develops in cooperation with the entire national economic complex of the country. The transport system is a territorial combination of communication routes, technical means of transport and transport services, which unite all types of transport and all links of the transport process in their interaction and ensure the successful functioning of the national economic complex of the country as a whole.

The operation of the transport system is ensured by the transport infrastructure, which includes communication routes, rolling stock, loading and unloading management of transport and other enterprises and organizations that carry out loading, unloading and transshipment of goods (transported by all types of transport), as well as control and communication means, various technical equipment.

Ukraine has extremely favorable prerequisites for the formation and placement of a transport network.

Railway transport of Ukraine plays a leading role in the implementation of domestic and significant economic relations of Ukraine with foreign countries. It accounts for the bulk of cargo turnover and passenger transportation. This type of transport combines important technical and economic indicators: regularity of movement and high speed of transportation, large throughput and carrying capacity.

At the same time, the economic and geographical situation significantly influenced the passage of transit highways, pipelines, and the formation of mixed-type transport hubs. The flat topography contributes to the widespread placement of communication routes [22-24].

Passenger transportation occupies a special place in the work of transport. This is due to their high socio-economic importance in the life of society and the fulfillment of one of the most important guarantees of the state - freedom of movement. The population's need for transportation is related both to production activities (trips to the workplace and on business trips), and to cultural and household needs (trips for recreation, tourism, and excursions).

The market of transport services is represented by intercity, suburban, inter-city and international types of passenger transportation. Each of them is characterized by a different market capacity, the type and level of competition, the motivation of the trip and the elasticity of demand.

Intercity transportation is the most significant in terms of the number of transported passengers. In large cities, the transport market is quite competitive and is represented by bus, trolleybus and tram connections, the metro, railway transport, private cars, and shuttle taxis. In small cities and towns, it is more monopolized and represented mainly by bus transport and personal cars of citizens. Among the motivations for trips, moving to the place of work or study, to shops and for other personal needs prevails. The demand for these transports is price and income inelastic, but has a high cross-elasticity.

Suburban transportation ranks second in terms of volume after interurban transportation and is represented by railway, bus, and personal vehicles [25-27]. The demand for these transportations is more elastic in terms of price and income. Such an invaluable competitive factor as the reliability and convenience of the schedule has a great impact on the population's final choice of a certain type of transport. For the population making daily commuter trips to work and study, the main mode of transport is the railway due to its high carrying capacity, reliability and regularity of traffic.

It has a great social role in the transportation of the urban population to country plots, to places of mass recreation. In addition, a significant share of intercity transportation is carried out by suburban trains. According to sociological surveys, more than 41% of suburban train passengers travel to work and study, and about 29% travel to the country. More than 45% of passengers use rail transport almost every day [28].

Transportation of tourists, depending on the duration of the trip, is carried out on scheduled and specially organized trains (according to a specific order and route, when the train is both a means of transportation and a place of accommodation for tourists).

In the system of passenger transportation, train routes (according to a strictly established route, the time period and the traffic schedule are observed accordingly). Passenger railway routes, in turn, are divided into: suburban, local and long-distance.

Commuter trains follow a fixed schedule within a region or region. The warehouse usually accommodates 1,500 passengers, with seating for up to 1,000. Trains make frequent stops at local stations, their car numbers are not numbered [29, 30].

Local trains follow between the stations of the same railway, for example, South-Western in Ukraine or in Europe within the borders of the state. They usually cover a distance of 700 km and carry out transportation within a large district, region or small country - between villages and small cities. It happens that the difference between suburban and local trains is quite arbitrary and depends significantly on the geographical characteristics of the area and the country as a whole. Except for high-speed routes, local trains make frequent stops at all destination stations.

Long-distance trains cover a distance of more than 700 km and are divided by speed into: year-round high-speed trains, seasonal (summer) high-speed trains, year-round and seasonal long-distance passenger trains.

The strategy for the development of tourism and resorts of Ukraine for the period until 2022 is aimed at solving the problems of comprehensive development of tourism, hotel industry, resorts, sanatorium-resort service, supporting the creation and modernization of tourist infrastructure, ensuring the proper quality of tourist and resort services, effective use existing tourist potential. In Ukraine, the sphere of tourism and resorts does not play a proper role in the formation of favorable macroeconomic dynamics and budget revenues. On the international tourist market, the national tourist product and natural healing resources of Ukraine are evaluated as less attractive and competitive than in other countries. About twenty million inbound (foreign) tourists visit Ukraine every year, including only about a million people with an organized purpose. In recent years, there has been a 10% decrease in the inbound organized flow. This indicates the dominance of destructive tendencies in the market of tourist services of Ukraine, the predominance of unorganized trips in the general structure of visits.

Taking into account that railway transport is not only the most suitable for providing comfortable movement of large groups of people, but also the most affordable in terms of fare, it is necessary to consider the prospect of its use for the movement of domestic and foreign tourists. The advantages of the railway in serving domestic and foreign tourists are obvious. Among the main ones are the ability to travel in any weather, accessibility to high mountain areas. Therefore, the development of conditions for the development of railway tourism in Ukraine is a rather urgent scientific and practical task.

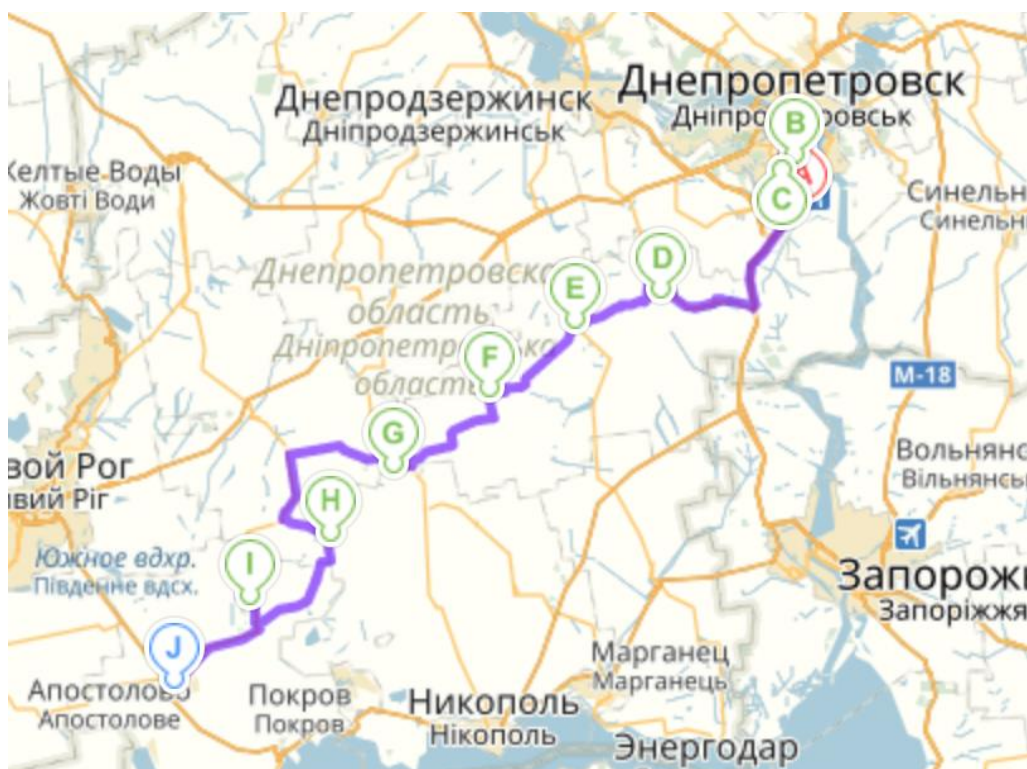


Fig. 1. Route of suburban train Dnipro-Pivdenny – Apostolovo with stops.

Two pairs of suburban trains run daily from Dnipro-Pivdennyi station, connecting Dnipro with the city of Apostolovo (the line between Zustrichni and Apostolovo stations is not electrified).

All stops and points of interest are detailed in the table below. Everyone can choose a route according to their preferences.

Table 1. Stations on the way Zustrichna - Apostolovo

Direction	№ train	Departure time - arrival time	Stations	Notes*
Dnipro-Pivdenny – Apostolovo	6405	dep.: 08:21 ar.: 12:38 daily	Tonnalna	Avalanche Amusement Park
			Zustrichna	Cinema "Sich"
	6409	dep.: 20:25 ar.: 00:42 daily	Surske	Church of Saint Prince Igor
			Prywolne	A drying stream flows through the village with the "Mokra Sura"
			Yelizarovo	Common grave of Soviet soldiers

Continuation of the table 1

Apostolovo - Dnipro- Pivdenny	6402	dep.: 03:24 ar.: 07:46 daily	Nezabudine	The village of Nezabudine is located on one of the sources of the Lyubimivka River, at a distance of 1 km from the village of Khizhine and 2 km from the village of Nezabudine and the railway station of Nezabudine. There is a stream with a brook running through the village that is drying up.
	6408	dep.: 14:34 ar.: 19:01 daily	Loshkarivka	The village of Loshkarivka is located on the bank of the Bazavluk River, the village of Mezhuivka is located upstream at a distance of 0.5 km, and the village of Shevchenko is located downstream at a distance of 3 km. A dry stream with a large brook flows through the village. The railway passes nearby, the Loshkarivka station is 3 km away.
			Pavlopyllia	In Pavlopyllia, there is a grain warehouse of the State Material Reserve of Ukraine — "Bread Base No. 73", several small agricultural enterprises and a communal enterprise are also operating.
			Zhovtokamyanka	Zhovtokamyanka (another name is Drana Kohta) is a Scythian mound near the village of Zhovtokamyanka, Apostoliv District, Dnipro Region, and is one of the largest mounds in terms of size. The mound dates back to the 30s of the IV century BC. It is the grave of a relative of the Scythian king.
			Apostolivo	The church of the Holy Intercession has been preserved in the city. Churches of the Holy Assumption, the Twelve Apostles, Christians of the Evangelical Faith, the Christian Presbyterian Church, the Church of the Intercession of the Most Holy Theotokos, All Reverends of Kyiv-Pechorsky are active. There is a community of Seventh-day Adventists. Near the city, several mounds of the Bronze Age (III-I millennia BC), two Scythian mounds - Baba and Rozkopana Mohyla (IV-III centuries BC) with burials of leaders, in which gold jewelry, weapons, dishes, etc. were discovered, were investigated. Separate burials of nomads of the 13th and 14th centuries were also studied. The People's Museum of the History of the Apostoliv District has been established in the city.

For example, of the suburban train route from Dnipro to Apostolovo, several excursions can be offered:

Two types of excursions are offered on this route of the suburban train Dnipro-Pivdenny - Apostolovo: Historical and Religious. Historical excursions are offered to the villages of Yelizarovo and Zhovtokamyanka. Religious events are held in the village of Surske. There is an extended excursion to Apostolovo through churches, temples, barrows and museums.

Dnipro-Pivdenny is a passenger railway station of the Cisdnieper Railways. Located in the center of Dnipro, it is the second most important station in Dnipro.

The station is located on an auxiliary railway line that connects Sukhachivka station with the large Nizhnyodniprovsk-Vuzol railway hub.

Excursion №1:

Dnipro-Pivdenny - Yelizarovo is listed on figure 2.

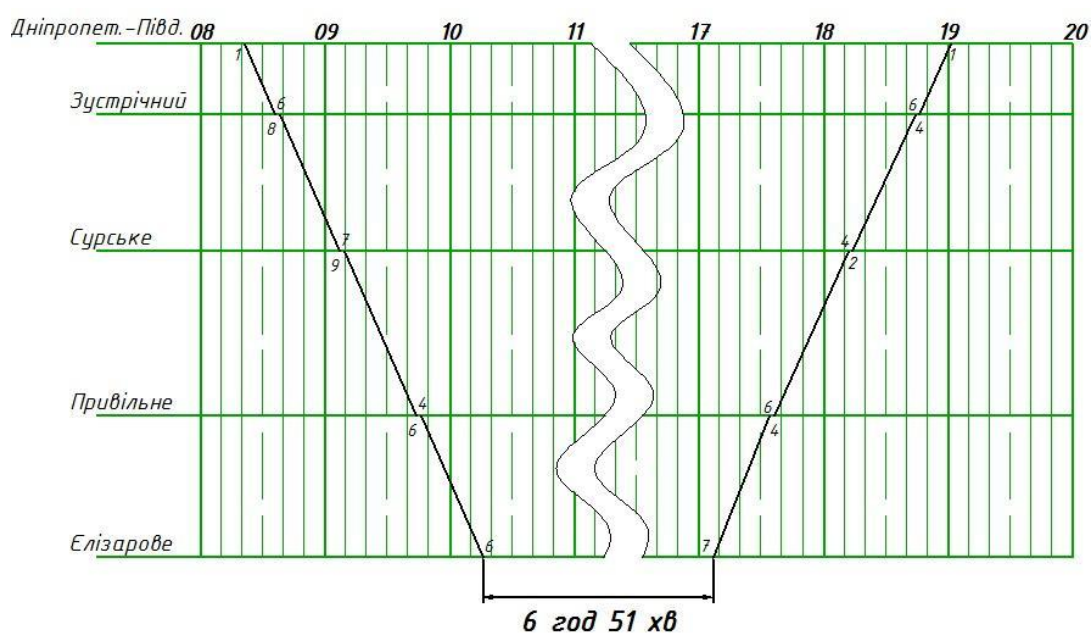


Fig. 2. Train schedule for excursion 1

Excursion №2:

Dnipro-Pivdenny – Zhovtokamyanka is shown in figure 3.

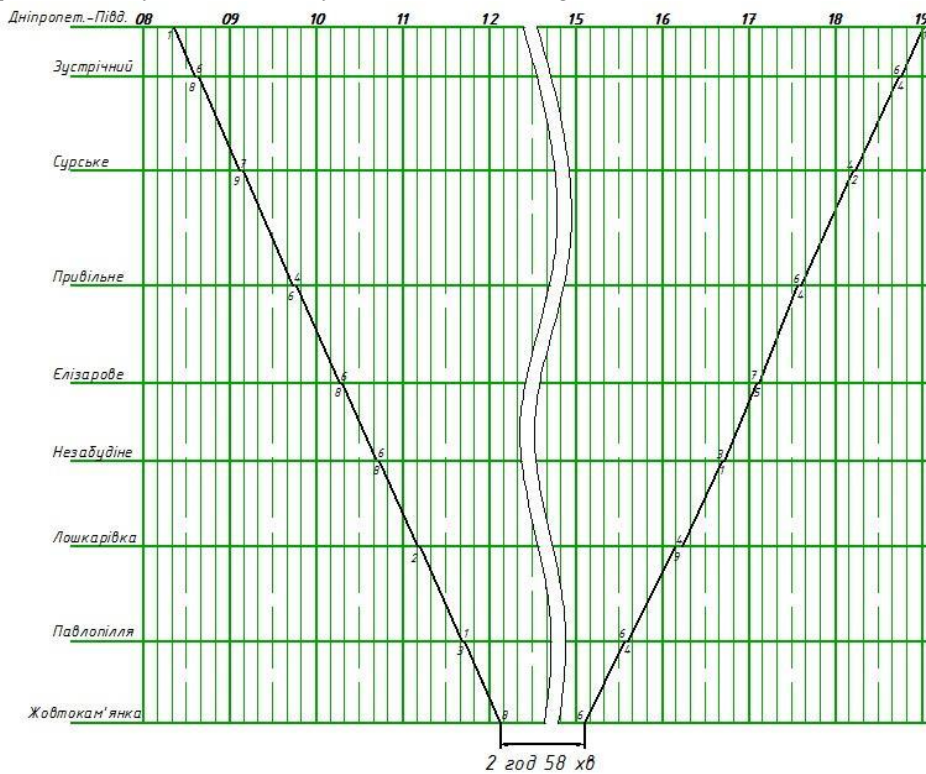


Fig. 3. Train schedule for excursion 2

Excursion №3:

Dnipro-Southern - Surske is shown in figure 4.

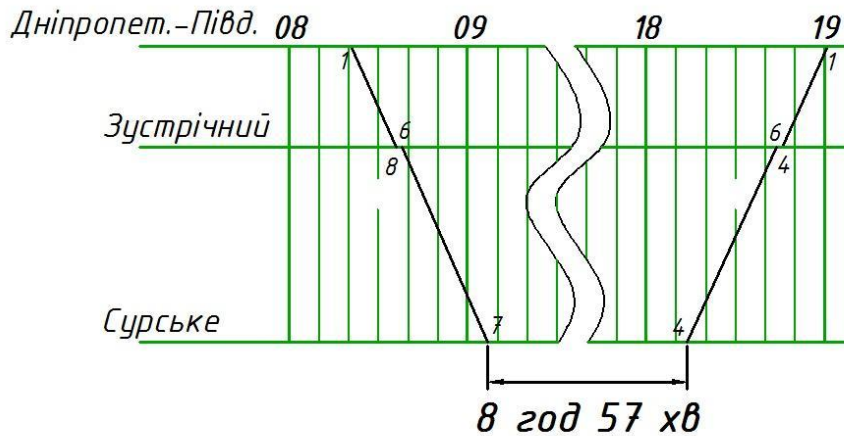


Fig. 4. Train schedule for excursion 3

Excursion № 4:

Dnipro-Southern - Apostolovo is shown in figure 5

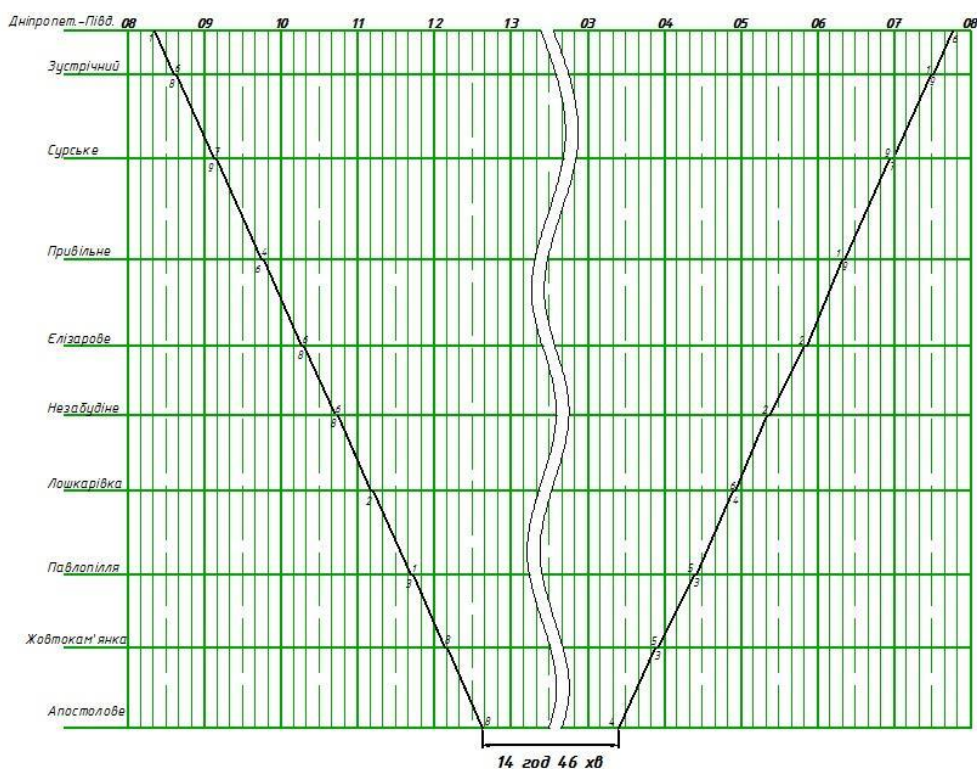


Fig. 5. Train schedule for excursion 4

Conclusions. To sum up, having considered the issue of organizing railway tours, the following conclusions can be drawn.

Rail tours are trips organized by tourists using rail transport.

Railway journeys by duration can be one-day, short-term (up to 3 days), long-term (medium, long and extra-long). According to the duration, they can be carried out on local or long-distance trains; on regular trains (according to the established route and schedule) and on specialized tourist trains.

Ukraine has a developed network of railways and railway tourism is popular among tourists.

The main disadvantages that inhibit the development of railway tourism in our country are:

- instability of internal politics in the state;
- imperfection of the legislation regulating the organization of railway tourism;
- unreasonably inflated prices for renting specialized carriages and the ever-increasing price of travel tickets.

The correct organization of railway trips will not only satisfy the tourist, improve the image of Ukrainian tourism, but also bring a good profit to the organizers and, ultimately, to the state.

REFERENCES

1. Nesterenko, G. I., Muzykina, S. I. & Muzykin, M. I. (2016) Analiz sushchestvuyushchej sistemy organizacii perevozkov passazhirov s ogranichenymi vozmozhnostyami zheleznodorozhnym transportom Ukrainy [Analysis of the Existing System of Organization of Transportation Passengers with Disabilities by Railway Transport in Ukraine]. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1(225), 139-146. [in Russian]
2. Strelko, O., Berdnychenko, Yu., Soloviova, O., Kyrychenko, H., Soloviova, L., Hurinchuk, S., & Isaienko, S. (2022). Development of scheduled urban passenger transportation by road in Ukraine. In: *Proceedings of the 26 International Conference Transport Means 2022*, Pt. I., 447-452. Kaunas University of Technology, Kaunas. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2022.P1>.
3. Nesterenko, G. I., Avramenko, S. I., Muzykin M. I. & Hanenya O. I. (2017) Zaluchennia dodatkovykh obsiahiv pasazhyriv [Attracting additional volumes of passengers]. *Car Fleet*, 5-6(122-123), 48-50. [in Ukrainian].

4. Martsenyuk, L.V. (2013) Osnovni zasady rozvytku transportnoho turyzmu v Ukraini [Basic principles of transport tourism development in Ukraine]. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 47, 24-32. [in Ukrainian]
5. Muzykin, M. I., Nesterenko, G. I. & Avramenko, S. I. (2019). Analiz dostupnosti vokzaliv AT Ukrainiska zaliznytsia dlia liudei z obmezhenymy mozhlyvostyamy [Analysis of the Availability of the Station of JSC «Ukrainian Railway» for People with Disabilities]. *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2(250), 59-64. [in Ukrainian]
6. Alohynskiy, Y., Remzina, N., Tregubov, O., Shevchenko, V., & Britchenko, I. (2022). Logistics approaches to stabilization and development of tourism activities during the pandemic. *International Journal of Agricultural Extension*, 10(2), 129-146. <https://doi.org/10.33687/ijae.010.00.3890>.
7. Rutynskiy, M., & Kushniruk, H. (2020). The impact of quarantine due to COVID-19 pandemic on the tourism industry in Lviv (Ukraine). *Problems and Perspectives in Management*, 18(2), 194-205. [https://doi.org/10.21511/ppm.18\(2\).2020.17](https://doi.org/10.21511/ppm.18(2).2020.17).
8. Hren, L. M., Naden, E. V., Aliieva, P. I., Husarov, K. A., Stankevych, S. V., Koroleva, E. N., & Matsyura, M. V. (2021). The public administration and environmental tourism. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(2), 191-194. https://doi.org/10.15421/2021_98.doi:
9. Martsenyuk, L.V. (2015) Vazhlyvist rozvytku zaliznychnoho turyzmu v Ukraini v suchasnykh sotsialno-ekonomichnykh umovakh [The importance of the development of railway tourism in Ukraine in modern socio-economic conditions]. *Problems of transport economy*, 9, 84-90. [in Ukrainian].
10. Anisiewicz, R. (2021). Conditions for development of the entrepreneurial ecosystem in tourism in the border area of the European Union: The example of the tri-border area of Poland–Belarus–Ukraine. *Sustainability*, 13(24), 13595. <https://doi.org/10.3390/su132413595>.
11. Tkachenko, T. I., Melnichenko, S.V. & Boyko, S. V. (2010) Stratehichniy rozvytok turystychnoho biznesu [Strategic development of tourist business]: monograph. 596 p. [in Ukrainian]
12. Semenov, V. F. (2014). Terytorialni umovy i stratehii rozvytku turyzmu v rehionakh [Territorial conditions and strategies of tourism development in the regions]. *Bulletin of the Odessa National University*, 1(2). [in Ukrainian].
13. Soloviova, L., Strelko, O., Isaienko, S., Soloviova, O., & Berdnychenko, Yu. (2020). Container transport system as a means of saving resources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 459(5), 052070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052070>.
14. Nesterenko, H. I. & Muzykin, M. I. (2014) Vplyv «vikon» na propusknuyu spromozhnist zaliznychnoho naprjamku [Influence of maintenance windows on the working capacity of railway route]. *Science and Transport Progress*, 3 (51), 24–33. [in Ukrainian]
15. Fesovets, O., Strelko, O., Berdnychenko, Yu., Isaienko, S., & Pylypchuk, O. (2019). Container transportation by rail transport within the context of Ukraine’s European integration. In Proceedings of 23rd International Scientific Conference. Transport Means.–2019.–Part I (pp. 381-386). Kaunas University of Technology, Kaunas. Retrieved from <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-1.pdf>
16. Butko, T., Prokhorchenko, A. & Muzykin, M. (2016) An improved method of determining the schemes of locomotive circulation with regard to the technological peculiarities of railcar traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(83)), 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80471>.
17. Riashchenko, V., Zivitere, M., & Kutryieva, L. (2015). The problems of development of the Ukrainian tourist market and ways of their solutions. *Information Technologies, Management and Society*, 8(1), 21-26. Retrieved from https://www.ismaitm.lv/images/Files/Proceedings/2015/05_ITMS_2015_Riashchenko_Zhivitere_Kutryieva.pdf.
18. Strelko, O. H., Kyrychenko, H. I., Berdnychenko, Yu. A., Sorochynska, O. L., & Pylypchuk, O. Ya. (2019). Application of information technologies for automation of railway and cargo owner interaction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 582(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/582/1/012029>.
19. Butko, T., Muzykin, M., Prokhorchenko, A., Nesterenko, H. & Prokhorchenko, H. (2019) Determining the rational motion intensity of train traffic flows on the railway corridors with account for balance of expenses on traction resources and cargo owners. *Transport and Telecommunication Journal*, 20(3), 215–228. <https://doi.org/10.2478/tjt-2019-0018>.
20. Rossolov, A., Naumov, V., Popova, N., Vakulenko, E., & Levchenko, O. (2021). Estimation of transport accessibility in case of rational transport hub location. *Transport* 36(1), 1-12. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14299>.
21. Nesterenko, H., Muzykin, M. & Avramenko, S. (2019) Practical aspects of improving the operation interaction of the station and sidings. *Transport Problems: VIII International Symposium of Young Researchers* (pp. 927–934). Katowice, Poland.
22. Kravchenko, O. (2020). Scenario analysis of the assessment of the rail transport impact on the economic growth (on the example of Ukraine). *Economic Studies journal*, 29(1), 114-135. Retrieved from https://www.iki.bas.bg/Journals/EconomicStudies/2020/2020-1/5_O.Kravchenko_f-f.pdf
23. Butko, T. & Prokhorchenko, A. (2013). Investigation into train flow system on Ukraine’s Railways with methods of complex network analysis. *American Journal of Industrial Engineering*, 1(3), 41–45.
24. Storonyanska, I., Dub, A., Graftska, O., Hrynychshyn, I., Bilanyuk, O., & Pierscieniak, A. (2021). The tourist infrastructure of local communities in Ukraine: current state and impact on local economic development. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 7(2), 102-118. <https://doi.org/10.51599/are.2021.07.02.06>.
25. Ivannikova, V., & Nesterov, O. (2021). Model of Transport System Optimization in Kyiv (Ukraine). In: Prentkovskis, O., Yatskiv (Jackiva), I., Skačkauskas, P., Junevičius, R., Maruschak, P. (eds), *TRANSBALTICA XII*:

Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure (pp. 456-467). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3_45.

26. Pivtorak, H., Zhuk, M., & Gits, I. (2022). Shifting the population mobility of the Ukraine western region on the strength of the COVID-19 pandemic. *Archives of Transport*, 62(2), 7-23. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.9173>.

27. Vakulenko, K., Kuhtin, K., Afanasieva, I. & Galkin, A. (2019). Designing optimal public bus route networks in a suburban area. *Transportation Research Procedia*, 39, 554-564. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.057>.

28. Nesterenko, H., Muzykin, M., Bibik, S., & Horobchenko, D. (2020). Analiz tekhnolohii orhanizatsii korotkoproblizhnykh perevezen u transportnomu vuzli [Analysis of the technology of short-distance transportation in the transport hub]. *Transport Systems and Technologies*, 35, 182-193. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-18>.

29. Nesterenko, H. I., Bech, P. V., Muzykin, M. I. & Avramenko, S. I. (2018). Improvement of supervisory control of train movement by means of introduction of operational zones. *Science and Transport Progress*, 6(78), 59–70. <https://doi.org/10.15802/stp2018/154060>.

30. Nesterenko, G. I. & Chibisov, Yu. V. (2012). Optimal route selection when distributing the freight trainflow in the railway junction with the consideration of the level of the traffic capacity saturation. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 3(174), 138–143.

**Галина Нестеренко¹, Михайло Музикін², Олег Стрелко³, Розалія Щербина⁴,
Олена Павленко⁵**

¹ Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Управління експлуатаційною роботою» Українського державного університету науки і технологій, Україна

² Кандидат технічних наук, доцент кафедри «Транспортних технологій та міжнародної логістики» Університету митної справи та фінансів, Україна

³ Доктор історичних наук, професор, декан факультету «Управління залізничним транспортом» Державного університету інфраструктури та технологій, Україна

⁴ Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Технологій транспорту та управління процесами перевезень» Державного університету інфраструктури та технологій, Україна

⁵ без наукового ступеня, асистент кафедри «Управління експлуатаційною роботою» Українського державного університету науки і технологій, Україна

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗНИЦІ

На сьогодні залізничний транспорт є найрозвинутішим в Україні. Він є серцем транспортних послуг для фізичних та юридичних осіб, без нього важко уявити нормальне функціонування виробництв та логістичних фірм. Залізничний транспорт також займає головне місце серед перевезень внутрішніх сполучень. Пасажирські перевезення займають вагоме місце в роботі транспорту, тож приміські перевезення займають друге місце за масовістю після внутрішньоміських перевезень автотранспортом. Попит на такий вид перевезень можна назвати еластичним, оскільки є вплив сезонності на перевезення, наприклад початок і закінчення навчальних семестрів, канікулярний час та час відпусток. Тож доцільно розглянути туристичні поїзди, що мали б змогу курсувати на ділянках ст. Дніпро-Південний – ст. Апостолово, ст. Дніпро-Південний – ст. Сурське, ст. Дніпро-Південний – ст. Жовтокам'янка, ст. Дніпро-Південний – ст. Елизарово. В статті наведені графіки руху даних поїздів, що дозволяють пасажирам відвідати пам'ятки на всьому шляху прямування. Отже, туристичні маршрути можуть покращити розвиток туризму по всій Україні, а не тільки на популярних напрямках. Результатом чого можуть стати збільшений попит на туристичні поїзди, збільшена монетизація пасажирських перевезень, за рахунок чого можливість покращення комфорту пасажирів.

Ключові слова: залізничний транспорт, пасажирські перевезення, туристичні поїзди, туристичні маршрути.

Наталя Потаман^{1*}

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 щодо кількості диспетчерів та автомобілів, необхідних для задоволення потреб клієнтів зі зменшенням витрат на доставку та підвищення 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 з формування раціональної маршрутної мережі доставки вантажів, деякі з них подані 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
Наближені методи	Метод випадкового пошуку Метод локальної оптимізації Модифікації точних методів Евристичні методи

Використанням наближених методів займалися Бакаєв О.О., Воркут А.І., Героніmus Б.Л., Житков В.І., Ловецький С.Є., 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].

У 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 наряду 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. Значного розвитку 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, оскільки доставка тарно-штучних вантажів у логістичній системі є значно дорожчою, ніж доставка масових вантажів.

Для формування раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів як 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, бо 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. Оскільки 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 таку 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 таких 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

$$Z_{\text{заг}} = Z_{1-3} + Z_4 \quad (6)$$

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

$$Z_{1-3} = 3\Pi_d \cdot N_d \quad (7)$$

де $3\Pi_d$ – заробітна платня одного диспетчера, грн.;

N_d – кількість диспетчерів, од.

Витрати на виконання процесу доставки вантажу

$$Z_4 = Z_{\text{пост}} + Z_{\text{зм}} + Z_{\text{нр}} + Z_{\text{фор}} + Z_{\text{ом}}, \quad (8)$$

де $Z_{\text{зм}}$ – змінна складова витрат на транспортування вантажу, грн.;

$Z_{\text{пост}}$ – постійна складова витрат на транспортування вантажу, грн.;

$Z_{\text{нр}}$ – витрати на навантаження-розвантаження, грн.;

$Z_{\text{фор}}$ – витрати на формування маршруту, грн.;

$Z_{\text{ом}}$ – витрати на заморожування грошових коштів, грн.

$$Z_{\text{пост}} = S_{1ч} \cdot t_{\text{д}}, \quad (9)$$

де $S_{1ч}$ – постійна складова собівартості транспортування, грн./год.;

$t_{\text{д}}$ – час доставки, год.

Змінна складова витрат на перевезення

$$Z_{\text{зм}} = S_{1км} \cdot L, \quad (10)$$

де $S_{1км}$ – змінна складова собівартості транспортування, грн./км;

L – відстань доставки, км.

Витрати на навантаження-розвантаження

$$Z_{\text{нр}} = S_{1ч} \cdot t_{\text{нр}}, \quad (11)$$

де $t_{\text{нр}}$ – час навантаження-розвантаження вантажу, год.

Витрати на формування маршруту

$$Z_{\text{фор}} = S_{1ч}^{\text{д}} \cdot t_{\text{фор}}, \quad (12)$$

де $S_{1ч}^{\text{д}}$ – собівартість 1 год роботи диспетчера, грн./год.;

$t_{\text{фор}}$ – час формування маршруту, год.

Витрати на заморожування грошових коштів

$$Z_{\text{ом}} = \frac{Q \cdot C_{1т} \cdot t_{\text{д}} \cdot \alpha}{365 \cdot 24 \cdot 100}, \quad (13)$$

де $C_{1т}$ – вартість 1 т вантажу, грн./т;

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

$$t_{\text{д}} = \frac{L}{V}, \quad (14)$$

де V – швидкість сполучення, км/год.

Час навантаження та розвантаження для бортових автомобілів розраховуємо за формулою

$$t_{np} = 2 \cdot \frac{(12 + 2 \cdot (Q - 1))}{60} \quad (15)$$

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 таку 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

$$R = \frac{n_{обсл}}{n_{\Sigma}}, \quad (17)$$

де $n_{обсл}$ – 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 являє 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 такий вигляд

$$\begin{cases} R = 0,017 + 0,128 \cdot N_d + 0,046 \cdot N_a; \\ Z_{заг} = 1314,75 + 1609,1 \cdot N_a + 2955,4 \cdot N_d. \end{cases} \quad (18)$$

Перевірка моделі на можливість її практичного застосування проводиться по критеріях точності, надійності та адекватності. Всі параметри повинні виконуватися одночасно. Невідповідність одному із критеріїв означає відсутність моделі як такої.

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 -ї заявки дорівнював регіону вантажовідправника j -ї заявки. Формуємо перший маршрут з заявки №1 та №5, оскільки регіон вантажоодержувача заявки №1 дорівнює регіону вантажовідправника заявки №5 і дорівнює 4-му регіону. Аналогічно формуємо решту маршрутів. Результати розрахунків подані на рис. 1.

Заявка	Регіон вантажовідправника	Регіон вантажоотримувача	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		43,52				10=14(34,9)
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 таблиці 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

Закінчення таблиці 2

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, оскільки 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. Vol. 17. № 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. Błaik P. Logistyka. Konceptcja zintegrowanego zarządzania 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, 2015. Vol. 501. P. 184267. <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. Nagorny Ye., Shulika O., Severyn O., Orda O.. Improving the efficiency of road transport companies by optimizing the costs of information and advertising activities. SHS Web of Conferences- EDP Sciences, 2019. Vol. 67. P. 03009.

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. Харків, ХНАДУ, 2017. 20 с.

14. Potaman N., Shulika O., Orda O. 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 дрібнопартиїних вантажів автомобільним транспортом. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту, 2009. Vol 2(9). P. 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, Ye.V., Naumov V.S., &Shulika O.O. (2013). Formuvannya variantiv tekhnologii dostavki tarно-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 - Automotive transport: a collection of scientific works. Ministry of Education and Science of Ukraine. 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 Zarzadzania*. Pwe, Warszawa. [In Polish]

5. Nefedov N.A. (2002) Otnositel'naya ehffektivnost' razvozhnykh marshrutov [Relative efficiency of distribution routes]. *Sb. nauch. tr Khar'kov - A collection of scientific works*, 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]. *Visnik skhidnoukraїns'kogo nac. un-tu im. V. Dalya - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after 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. <https://doi.org/10.1155/2015/184267>.

8. Rossolov O.V., Potaman N.V., Kiyashko D.O. (2017) Vznachennya racional'nikh rivniv kanaliv rozpodilu produkciї DP «Artemsil» [Determination of rational levels of product distribution channels of SE "Artemsil"]. *Naukovo-tekhnichnij zbirnik «Kommunal'noe khozyajstvo gorodoV» - Scientific and technical collection "Communal economy of cities"*, 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-tuim. V.Dalya: Nauk. Zhurnal - Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dalya*, 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 - Collection of scientific papers. Kyiv*, 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]. *Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk - 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. <https://doi.org/10.1051/Shscnf/20196703009>.

13 Shulika, O.O. (2017). Formuvannya procesu dostavki tarно-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]. *Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.01 - transportni systemy. Kharkiv, KhNADU - 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 «Kommunal'ne Gospodarstvo MisT»*, 164 (2021). 240-245.

15. Yakovleva, YA.S., Dudnikov, O.M, & Sokirko, V.M. (2009). Udokonalennya metodiki organizacii perevezennya shtuchnikh dribnopartijnykh vantazhiv avtomobil'nim transportom. [Improving the methodology of Organization of transportation of artificial small consignments by road]. *Visti Avtomobilno-dorozhnoho instytutu - News Of The Automobile And Road Institute: Research And Production Collection*, 2(9), 81–87. [In Ukrainian].

*Natalia Potaman*¹

¹ Assistant professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo st., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.

FORMATION OF A RATIONAL ROUTE NETWORK FOR THE DELIVERY OF CONTAINERED CARGO

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.

Halyna Holub^{1*}, Mykola Tkachuk², Viktor Melenchuk³, Yuriï Lushchai⁴

¹ Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

² Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9683-4303>

³ Department of repair and operation of automotive and special equipment, Military Academy, str. Fontanskaya road, 10, Odessa, 65009, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1236-6731>

⁴ Department of Transport Law and Logistics, National Transport University, M.Omelianovycha - Pavlenka str., 1, Kyiv, 01010, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7632-7400>

*Corresponding author: golub_gm@gsuite.duit.edu.ua

A SYSTEM MODEL OF DECISION-MAKING TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE PROJECTS

Aspects of system analysis of the process of railway transportation management are considered in the work. Each of them is analyzed in detail and the role of each in managing the transportation process is determined. It was determined that the implementation of complex automated management systems led to the definition of a typical multi-level structure of the application system, which provides a combination of various management goals, however, the use of certain tools does not affect any of the aspects of the analysis.

System models of the decision-making process in transportation process management, each level of the analytical system of transportation process management, are presented. The functions and processes of each of these levels are analyzed in detail. With the help of system models developed in the work, the hierarchical principle of management of the transportation process is considered, which is based on detailing management actions and, at the same time, narrowing the number of basic management objects.

Keywords: *information base, management system, system model, system approach, analytical system, decomposition.*

Introduction. In order to determine the properties and parameters of the analytical system, which should ensure adequate management decision-making, it is necessary to conduct a systematic analysis of the process of managing railway transportation. At the same time, each of the aspects of system analysis is relevant:

- Elemental, which reveals the set of elements that make up the system.
- Structural, which examines the internal connections and relations between the elements that make up the system. Allows you to get an idea about the internal organization of the object under investigation.
- Functional, reveals the functions for which the investigated objects are created and exist.
- Targeted, determines the need to determine the goals that the system must achieve and their interconnections.
- Resourceful, identifies resources that provide a solution to the problem.
- Integrative, defines a set of quality indicators of the system, which ensures its integrity and, at the same time, its uniqueness.
- Historical, allows you to identify the conditions at the time of the object of research, the stages passed in the development of the object, the current state and prospects for further development.

The consideration of transportation management in a historical aspect indicates, first of all, that the structure of management changed due to the distribution of functions. Management levels were formed, each of which had its own management goal and, accordingly, a source of data. That is, the current structure of levels of management of the transportation process is a consequence of

evolutionary changes. Further changes in external factors should lead to corresponding changes in the management organization.

The functional aspect determines the completeness of the performance of transportation management functions, which are supplemented over time. For example, market conditions dictate the need to analyze relationships with customers transporting goods by rail [1].

The target aspect, which is closely related to the functional aspect, determines the goal of management. For multi-level management of the transportation process, such goals are different but harmonized with respect to the fulfillment of the goals of the higher level of the structure. For a corporation, this is usually a profit.

The resource and integration aspects of the system analysis of the railway transportation management process are specific. Traditionally, the management structure of the transportation process does not directly affect the overall quantitative and qualitative composition of resources - infrastructure facilities and rolling stock - that participate in the transportation process. Management in such conditions is carried out on allocated, in other words, limited resources. The same conditions of limited resources also limit the transportation process management system in the integration aspect. Because they do not provide integrity in the management of all resources.

The integration aspect of system analysis determines the boundaries of the system – in our case, the freight transportation management system. Returning to the given example, it is necessary to decide whether or not the function of increasing resources, which are participants in the transportation process, is included in the set of transportation process management functions [2].

It should be noted that all the listed aspects of the system analysis of the freight transportation management process do not depend on the use of certain automated management tools for this management. From the point of view of system analysis, the use of computer systems is reduced only to the way of performing certain functions of the system.

The purpose and tasks of the study. The purpose of the study is to develop a system model for decision-making in the transportation process with the aim of optimizing management actions at basic facilities and improving cargo data processing through an automated management system.

Research objectives: 1. To analyze the process of managing the transport process by evaluating the work. 2. To propose models of decision-making models that will provide the necessary information support for decision-making using data in the information base. 3. Using modern Case-technologies, present a system model for managing the transportation process in railway transport, which is based on the hierarchical principle of construction, which allows to optimize the obtaining of information about the cargo by the subjects of the management of the transportation process.

Research materials and methods. The process of managing freight transportation in railway transport is impossible without the use of automated systems, therefore the use of the information environment is an integral part of automation. In particular, accounting of the work of divisions and the entire railway, calculation of quantitative and qualitative indicators of the work of divisions and the entire railway as a whole, financial and accounting reporting, technological documents, settlement documents for services rendered, etc. takes place in the information base - the only automated system for managing cargo transportation of Ukrainian railway [3].

The system, which contains a huge amount of data about all operations with management objects, is an information system. System developers and operating practitioners emphasize in work [1, 8] the need to transform the information system into a decision support system by creating analytical servers.

Decision-making regarding object management is based on the paradigm of choosing a certain strategy based on data about the state of the object and its target function [4-6].

The general technological process of preparing a decision in the management of the transportation process consists of the following actions, which can be represented using a system model in the form of a context diagram of IDEF0 process modeling in Fig. 1:

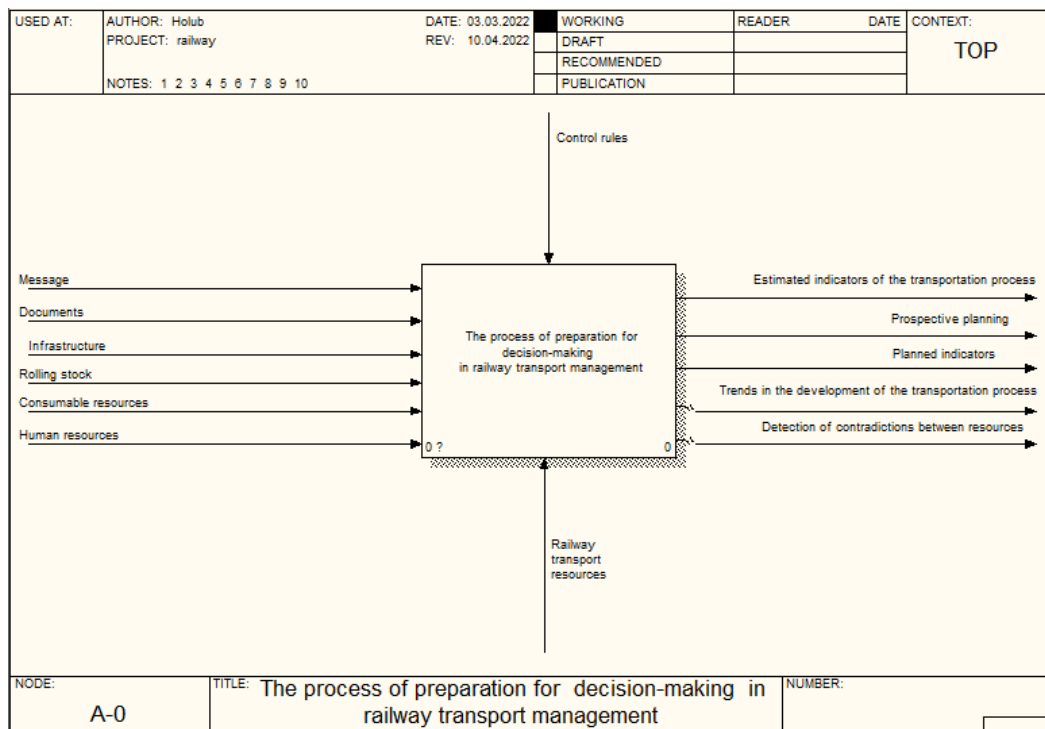


Fig. 1. A system model of the decision-making preparation process in transportation process management

The system model of the decomposition of the decision-making process in railway transport management in Fig. 2, which is depicted in the form of a decomposition diagram of the IDEF0 notation, reflects the modeling of the technological process of railway transport management, which includes:

1. Registration (measurement) of transportation process parameters.
2. Logical control of input measurement data, which consists of procedures for checking the correctness of measurement, categorization of measurement parameters, correction or rejection of incorrect measurement data.
3. Logical control of environment data. Environment data consists of the following measurement elements: infrastructure (immovable objects); objects of rolling stock (locomotives, wagons); expendable resources; human resources [7, 10].
4. Calculation of operational indicators. Such indicators are elementary events or operations of the transportation process, on the basis of which it is possible to analyze this process.
5. Storage of actual operational data in the data warehouse. The data warehouse is required to accumulate indicators of the transportation process for past periods and is a source of data for further analysis. This provides an opportunity to determine the long-term dependence of the transport process parameters on time and/or the interdependence of these parameters.
6. Access to the storage of operational data. Automatic or automated analytical calculations are performed with the data that is the content of the data warehouse. To do this, calculation programs must establish access to data storage.

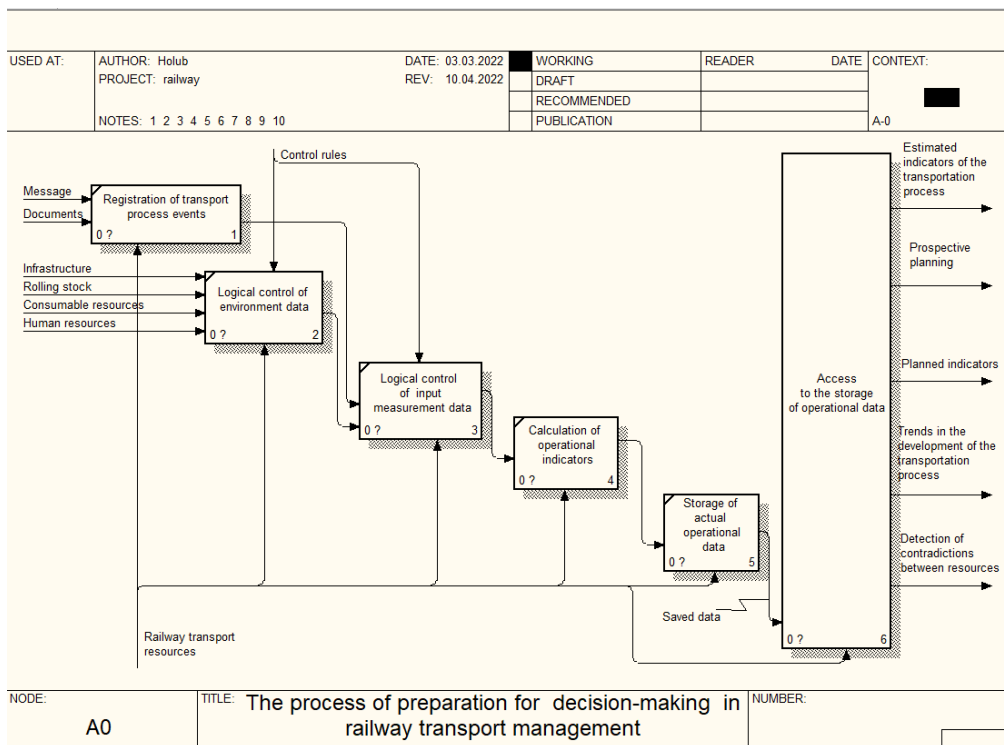


Fig. 2. A system model of the decomposition of the decision-making process in railway transport management

The next stage of modeling the processes of managing the transportation process presents a diagram describing the process of access to the storage of operational data in Fig. 3

The diagram shows the system model of the description of the process of access to the storage of operational data: assessment of the transportation process; forecasting parameters of the transport process; planning and calculation of normative values; definition of functional and correlational dependencies; simulation of critical situations.

The analytical decision-making system in the management of the transportation process aims to provide evaluation information about the completed transportation process in comparison with the planned indicators and indicators of past periods. The history of the completed transportation process allows you to determine trends for the future. Including predicting critical situations [8, 11].

The output of the decision-making preparation process is:

- Estimated indicators of the transportation process that has already taken place;
- Trends (tendencies) in the development of the transportation process;
- Modeling of critical situations – identifying contradictions between required and existing resources;
- Formation of planned (normative) indicators.

Decision-making is carried out within the system's responsibility and competence. In view of this, the main points of responsibility of the transportation service of the Ukraine railway are:

- Organization of operational work of railways of Ukraine;
- Transportation process management;
- Regulation of resources in the field of organization and provision of the transportation process.

In Fig. 4 presents the model of factors and directions of the analytical system of decision-making in the management of the transportation process, which determines the formulation of the concept of the analytical system [9, 17]. Namely, a certain way of understanding, interpretation of any phenomena,

processes, objects, a basic point of view, a guiding idea for their illumination, a leading direction, a constructive principle of various types of activity.

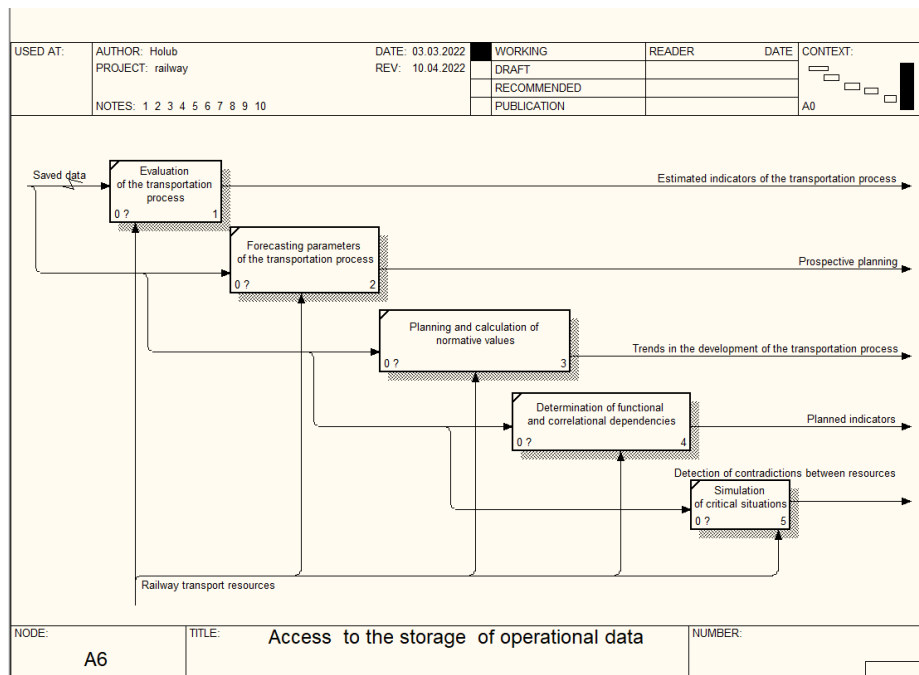


Fig. 3. System model for describing access to the operational data repository

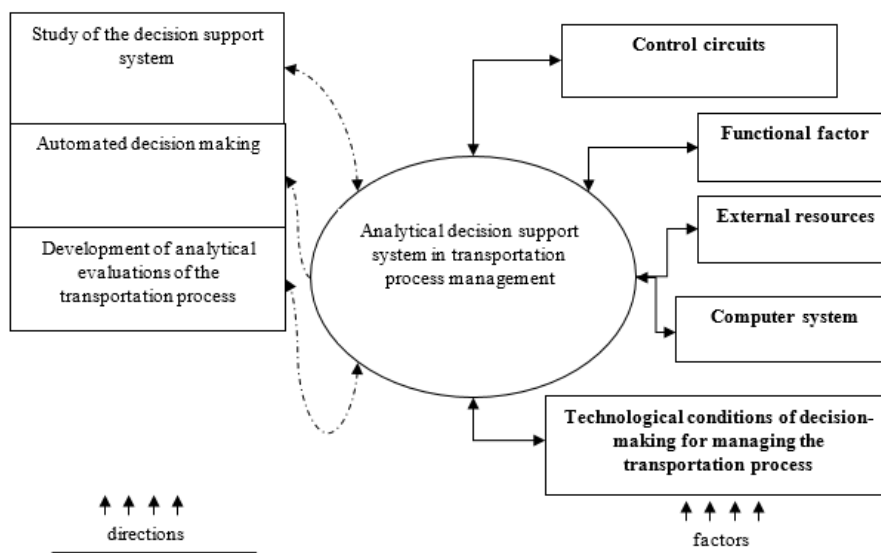


Fig. 4. Model of factors and directions of the analytical decision-making system in the management of the transportation process

The model includes the main factors and directions, which are the basis of the synthesis of the analytical decision-making system in the management of the transportation process.

The factor of technological conditions of decision-making highlights the fact that decision-making, that is, choosing the right option for further actions [12], can be equally the result of retrospective data analysis, and decision-making in real time, based on current data.

The factor of the management level (contour) correlates with the factor of technological decision-making conditions. If at the level of strategic management cargo is considered as a certain volume to be moved, then operational management considers cargo as the contents of wagons and the subject of loading and unloading operations. If the strategic level of management is based on the analysis of retrospective data and data from compatible areas, then the operational level is guided by the corresponding plan and the data of the execution of this plan, which must come in real time.

Therefore, the system analysis of the management of the transportation process defines three levels or management contours:

Strategic management –formation of standards and basic indicators of the transportation process, necessary for the creation of plans, traffic schedules, and other long-term plans.

Tactical management – creation of normative medium-term plans, traffic schedules and other plans that regulate the transportation process.

Operational management –linking normative plans to the real situation with applications for transportation, as well as short-term plans and their implementation taking into account the current state of the infrastructure [13].

Since the task of transportation is integral, the contours of strategic, tactical and operational management unite all links of management - from general to local.

The functional factor is the limitation that determines the permissible limits, rules and methods of managing the transportation process. This factor also determines the rules of interaction with suppliers of resources that provide the transportation process - track, locomotive, wagon services and a number of others. Separately, it is necessary to highlight the interaction with the commercial service, which determines the volume, points of departure and destination, the nature of the cargo to be transported. These data are the starting point for planning the transportation process.

Another limiting factor is resources - human, rolling stock, infrastructure that ensures the transportation process.

A factor such as a computer system that provides decision support includes the architecture of the computer system, the software that corresponds to the chosen architecture, and the hardware that allows the corresponding process to be provided.

The railway transport process management system includes [11, 14]:

- Transportation planning and technical standardization
- Traffic schedule and train formation plan
- Operational planning of train and freight work
- Operational regulation and dispatch control.

The management system is based on the following hierarchy of goals:

- The cargo transportation plan, which determines the entire operational activity of the railway during the year. The plan has indicators: shipment of goods in tons by the most important types of goods; average daily load in tons and wagons; the number of ton-kilometers by types of traction; reception and delivery of goods in tons at railway junctions.

- Quarterly plan. Establishes the size of cargo shipment in general by the railway network and each by month, types of cargo.

- The monthly plan includes the load volume in tons and wagons on the network, railways, stations and shippers.

- Detailed transportation plan. It is compiled on the roads according to a single form using cargo codes, cargo receivers and stations. The expanded plan contains data on the dispatch of all wagons per day and separately by the most important items of cargo [15].

Organization of train traffic. It provides for the routing of transportation from loading points, the formation of routes at technical stations in accordance with the annual train formation plan.

Operational planning of train and freight work ensures the implementation of the transportation plan, train schedule and technical standards in the specific conditions of the next day and shift.

There is a widespread scheme of interaction of applied systems to transform primary data about events on a real object into evaluation information about its functioning. Such a scheme implements the process of solving business analytics problems: converting primary data about the state of production facilities into information about the progress of the production process and its assessment.

Thus, the creation of an applied level of transportation process management is a prerequisite for determining issues of preparation for decision-making in the management of the transportation process [16]. Applications of this level should formally monitor the business process of transportation management of the Ukraine railway as a whole, consisting of elements of the processes of managing the railway, directorate, station, stations of various types. In other words, without an implemented level of resource management, no automated decision-making is possible. Analytical procedures on events are possible only in the sense of comparing current registered events with planned normative indicators. To increase the credibility of the economic justification of operating costs, it is necessary to conduct their analysis by economic sectors, types of transportation, cost elements and their connections with the production process.

Conclusion. With the help of the formed decision-making models, it is possible to select and evaluate transportation process management systems that will best meet the needs of a specific entity. with the help of the unified automated system of management of cargo transportation.

In the proposed system models of management of the transportation process, a hierarchical management principle is assumed. This principle is based on detailing management actions and, at the same time, narrowing the number of basic management objects - rolling stock objects. At the same time, all levels of management are forced to participate in operational management. This provision is confirmed both by management practice and by the probable nature of planned and normative indicators. Given a single number for a significant period of time, such an indicator presupposes a certain regulation in order to achieve it.

REFERENCES

1. Kyrychenko, H.I., Berdnychenko, & Yu, A. (2021). Skladovi informatsiyanoi modeli perezivnoho protsesu vantazhnykh perevezhen' zaliznychnoho transportu [Components of the information model of the transportation process of freight transportation of railway transport]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti - Information and control systems in railway transport*, 3(26), 12-17 [in Ukrainian].
2. Soloviova, L., Strelko, O., Isaienko, S., Soloviova, O., Berdnychenko, Y. (2020). Container Transport System as a Means of Saving Resources, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 459(5), 052070.
3. 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>.
4. Kulbovskiy, I., Bakalinsky, O., Sorochynska, O., Kharuta V., Holub, H., & Skok, P. (2019). Implementation of innovative technology for evaluating high-speed rail passenger transportation. *EUREKA, Physics and Engineering*, 6, 63–72. doi 10.21303/2461-4262.2019.001006
5. Arefieva E.V., Mirgorodskaya A.P. (2012). Analiz tendentsiy ispol'zovaniya resursnogo potentsiala predpriyatiy [Analysis of trends in the use of the resource potential of enterprises]. *Ekonomika i upravleniye - Economics and Management*, 2, 8-10 [in Russian].
6. Shcherbak, A. (2013). Informatsiynе zabezpechennya investytsiyanoi diyal'nosti na pidpryyemstvi [Information support of investment activity at the enterprise]. *Aktual'ni problemy ekonomiky - Current economic problems*, 3, 103-107 [in Ukrainian].
7. Kirichenko, G.I. (2017). Metodyka stvorenniya intelektual'noyi avtomatyzovanoyi systemy upravlinnya dostavkoyu vantazhiv na zaliznytsi [The method of creating an intelligent automated system of managing the delivery of goods by railway]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu - Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2(68), 46–56 [in Ukrainian].
8. 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].
9. Gorobchenko, O., Nevedrov, O., Nezlina, O., & Tkachenko, V. (2021). Rozrobka -metodu klasteryzatsiyi poyiznykh sytuatsiy [Development -method of clustering train situations]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 37, 187-195 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-18>.

10. Kulbovskiy, I., Holub, H., Andonova, S., Saiapina, I., & Tkachuk, M. (2021). Model and methods of management of efficiency of use of production and technological potential of rolling stock of rail transport. *Transport systems and technologies*, (38), 232-238. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-229-22>
11. Gustafsson, F. (2010). Particle filter theory and practice with positioning applications. *IEEE. Aerospace and Electronic Systems Magazin*, 25(7), 53–82.
12. Melnychenko ,O.I., Sorochynska,O.L., & Kulbovskiy, I.I. (2021). Vprovadzhennya mizhnarodnykh standartiv z bezpeky i upravlinnya ryzykamy ta shlyakhy yikh pokrashchennya na pidpryyemstvakh transportu [Implementation of international safety and risk management standards and ways to improve them at transport enterprises]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu - Bulletin of the National Transport University*, 1(48), 217-222 [in Ukrainian]. doi: 10.33744/2308-6645-2021-1-48-217-222.
13. Kulbovskiy, I.I. Agarkov, O. V., Kyiashko, V. T., Bambura, O. V. (2019). Analytical aspects of the track facilities functioning efficiency upgrading with considering processes variability. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 26-30.
14. 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].
15. Riabov, I., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Goolak, S. (2022). Otsinka tekhnichnykh parametriv lokomotyva dlya zaliznychnoho kar"vernoho transportu [Evaluation of the technical parameters of the locomotive for railway quarry transport]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 39, 83-100 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>.
16. Gorobchenko, O. (2021). Teoretychni osnovy otsinky informatyvnosti oznak poyiznoyi sytuatsiyi dlya roboty intelektual'nykh system keruvannya lokomotyvom [Theoretical bases of estimation of informativeness of signs of a train situation for work of intelligent locomotive control systems]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi - Transport systems and technologies*, 38, 223-231 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-220-21>
17. Pogromska, G.S. (2019). Modeli danykh. ER-diahramy [Data models. ER diagrams]. Retrieved from <https://www.slideshare.net/pogromskaya/er-166809727> [in Ukrainian].

Галина Голуб¹, Микола Ткачук², Віктор Меленчук³, Юрій Луцкай^{4*}

¹Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

²Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

³Кафедра ремонту та експлуатації автомобільної та спеціальної техніки, Військова академія, вул. Фонтанська дорога, 10, м. Одеса, 65009, Україна

⁴Кафедра транспортного права та логістики, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна,

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВІЗНИМ ПРОЦЕСОМ В ПРОЄКТАХ ІНФРАСТРУКТУРИ ТРАНСПОРТУ

В роботі розглянуті аспекти системного аналізу процесу управління перевезеннями на залізничному транспорті. Детально проаналізовано кожний з них і визначено роль кожного при управлінні перевізним процесом. Визначено, що впровадження комплексних автоматизованих систем управління привело до визначення типової багаторівневої структури прикладної системи, що забезпечує поєднання різних цілей управління, проте використання тих чи інших засобів не впливає на жодний з аспектів аналізу.

Представлено системні моделі, процесу підготовки прийняття рішення в управлінні перевізним процесом, кожного рівня аналітичної системи управління перевізним процесом. Детально проаналізовані функції та процеси кожного з цих рівнів. За допомогою системних моделей, які розроблені в роботі, розглядається ієрархічний принцип управління перевізним процесом, який базується на деталізації управлінських дій та, одночасно, звуження кількості базових об'єктів управління.

Ключові слова: інформаційна база, система управління, системна модель, системний підхід, аналітична система, декомпозиція.

Юлія Коскіна¹, Олексій Дрожжин^{2*}

¹ Професор, Кафедра експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3164-6504>

² Доцент, Кафедра експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9695-9296>

* Автор, відповідальний за листування: alexey.drozhzhyn@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБРОБКИ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ОДИНИЦЬ В КОНЦЕПЦІЇ «SINGLE WINDOW»

У статті розглядаються операції, які відбуваються на морському контейнерному терміналі в контексті єдиної системи обміну інформації між учасниками інтермодального перевезення вантажів. Дослідження ставить на меті формалізацію процесу обробки вантажів на контейнерному терміналі морського порту через апарат темпоральної логіки, який дозволяє розподілити процеси, необхідні для оформлення вантажних партій на терміналі морському порту, відповідно до причинно-наслідкових зв'язків в часі. Актуальність роботи пояснюється стрімким розвитком контейнеризації, загальним зростанням попиту на перевезення в інтермодальних транспортних одиницях з боку вантажовласників. Важливість дослідження також пояснюється неможливістю обробки інтермодальних одиниць спеціалізованими контейнерними терміналами внаслідок військової агресії і необхідністю транспортного забезпечення потреб країни через неспеціалізовані порти із слабкою автоматизацією процесів обробки вантажів. Доцільність впровадження систем «single window» для інтермодальних перевезень підтверджується складністю таких систем транспортування: наявністю декількох видів транспорту, вимогою високого ступеня інтеграції учасників перевезень, жорсткими обмеженнями за часом. Практичне значення представленої формалізації надає уяву про алгоритм обробки вантажів, сприяє якісній постановці завдання на проектування програмних рішень з обміну інформацією на контейнерних терміналах, які скорочують процес обробки вантажів шляхом спрощення документообігу.

Ключові слова: контейнер, інтермодальні перевезення, single window, інформаційна система обміну даними.

Вступ. За умов повномасштабного військового вторгнення агресора торговельні зв'язки України із іншими державами, як і всі підприємства окремих видів транспорту, які їх забезпечували, зазнали очевидних перешкод. Сьогодні українські порти Бердянськ, Маріуполь, Скадовськ, Херсон закриті за неможливістю здійснення обслуговування суден і проведення вантажних, транспортних та інших, пов'язаних з цим видів господарської діяльності, робіт, забезпечення належного рівня безпеки судноплавства, дотримання вимог міжнародних договорів України. З 24.02.2022 скасовані суднозаходи і судновиходи в/з усіх наявних українських контейнерних терміналів в Одесі, Чорноморську і Південному. Оператори

інтермодальних перевезень (ОІП) розробляють нові маршрути доставки контейнерів через європейські термінали: CSCT (Констанца, Румунія), VEPT (Варна, Болгарія), TMT (Трієст, Італія), Luka Koper, (Копер, Словенія), DCT Gdansk (Гданськ, Польща), KCT (Клайпеда, Литва), СТВ Гамбург (ФРН), РСТ (Пірей, Греція), термінали Туреччини. Очевидно, що запит вантажовласників на інтермодальні перевезення за маршрутами, які передбачають відвантаження з віддалених портів, пояснюється гострим дефіцитом товарів, яких вимагає економіка України в військовий час і необхідністю збуту продукції вітчизняних виробників. Такий попит на контейнерні перевезення додав навантаження українським дунайським портам, де контейнери перевозяться неспеціалізованим флотом, баржевими караванами. За станом на вересень 2022 р. було перевезено 3,3 тис. TEU. Недовикористання потенціалу дунайських портів в частині контейнерних перевезень пояснюється декількома факторами, найсуттєвіші з яких: відсутність спеціалізованих контейнерних барж, зношеність самохідного флоту, контейнерного перевантажувального обладнання. Серед іншого, автоматизація процесів загалом і необхідність у створенні інформаційної системи обміну даними (ІСОД) між учасниками перевезень з використанням концепції «single window», в таких портах постає особливо гостро. В практичній площині розробка програмного продукту для взаємодії учасників перевезення з обробки вантажів на контейнерних терміналах неможлива без формалізації процесів різного характеру: транспортно-технологічного, фінансового, документарного супроводу тощо. Практичною реалізацією таких процесів є створення окремих модулів: планування зони вивантаження, управління технікою та обладнанням на майданчику терміналу, модуль управління залізничною станцією, планування причалів, ключових показників ефективності контролю зважування контейнерів. Представлене дослідження обмежене учасниками перевезення, які беруть участь у документообігу імпортованих контейнерів на терміналі. З огляду на різноманітність самих контейнеризованих вантажів і органів, які беруть участь у документообігу кожного з них, поза межами уваги лишилися такі наглядово-контролюючі органи як: ветеринарна, санітарно-епідеміологічна служба, екологічна інспекція, служба з карантину рослин тощо.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Морські порти, які знаходяться на перетині видів транспорту, є зонами митного, прикордонного й інших видів контролю, складних транспортних, перевантажувальних, а також їх супроводжуючих процесів, є місцем, де постає ціла низка наукових проблем для найширшого кола науковців різних галузей знань.

Формалізацією процесів, які утворюються при взаємодії видів транспорту, з точки зору учасників доставки, займалися Н. Ю. Шраменко, Ю. О. Коскіна [1-2]; моделюванням елементів портової інфраструктури – О. В. Кириллова [3], інструментами імітаційного моделювання розв'язані проблеми, які виникають на терміналах, в роботах Нагорного В. С. [4], Наумова, О. В. [4-5], О. В. Кічка і О. І. Кічкиної [6]. Проблемами взаємодії на рівні «судно-порт/термінал» займалися [7-9]. Серед проблем створення середовищ інформаційного обміну для портів і терміналів належать роботи [10-12], які розв'язують задачі відповідно до конкретних портів чи у межах окремих проєктів. Автори [13-15] зазначають, що інструменти темпоральної логіки хоча є цілком прийнятними відповідно до портової індустрії, але ще досі лишаються поверхневими.

Мета і завдання дослідження. На меті дослідження поставлено пов'язати у часі основні етапи документарного супроводу інтермодальних транспортних одиниць (ІТО) морськими суднами на контейнерний термінал порту. На досягнення мети було формалізовано оформлення ІТО відповідно до логіки окремих виробничих процесів і учасників доставки. Виявити інтегровані причинно-наслідкові зв'язки виробничих процесів учасників морського перевезення.

Матеріали та методи дослідження. Національне Законодавство кожної окремої країни встановлює Правила, які є обов'язковими для виконання портовими операторами, операторами терміналу, вантажовідправниками, вантажоотримувачами, судовласниками, вантажовласниками, перевізниками, їх представниками та іншими особами, які користуються послугами,

передбаченими законодавством, та надають їх у морських портах [16]. Відповідно до Правил адміністрація порту розробляє порядок оформлення і обробки ІТО на контейнерному терміналі, який узгоджується з учасниками доставки: стивідорною компанією (СК), державною митною службою України (ДМСУ), Державною прикордонною службою України (ДПСУ), оператором терміналу (ОТ), асоціацією експедиторів.

У даній роботі переміщення ІТО просторово описується послідовними етапами: «вантаж на судні», «вантаж на терміналі», «вантаж в зоні митного оформлення», «вантаж поза межами порту». Серед учасників ІСОД виділені такі: судновий агент (в контексті контейнерних перевезень і у межах дослідження його функції збігаються з лінійним агентом), експедитор (представник інтересів вантажовласника, оператор інтермодального перевезення ОП), ДМСУ, СК, ОП (в ролі розпорядника ІСОД).

Оскільки контейнери перевозяться в лінійній формі організації перевезень за чітким розкладом, термінал має можливість заздалегідь планувати постановку судна під обробку. Інформація з підходу судна постійно уточнюється судновим агентом і подається в диспетчерську службу терміналу. Напередодні суднозаходу, на етапі «вантаж на судні», детальна інформація за усіма вантажами в вигляді документа «вантажний маніфест» з'являється в ІСОД. Інформація за всіма вантажами стає доступною усім учасникам перевезення за винятком експедитора, який має доступ до інформації відповідно до тих ІТО, які він обслуговує, за номерами коносаментів.

Оформлення судна (відкриття «вільної практики»), що передує вивантаженню, відбувається відповідно до процедури без застосування ІСОД. Оформлення і видача СК контейнерів на перевантажувальні майданчики для проведення догляду митними органами, відбору проб, зважування, рентгену й інших операцій, а також проведення даних операцій на території СК до в'їзду автотранспорту здійснюється відповідно до технологічних схем порту без використання ІСОД.

Внесення експедитором інформації, яка потрібна для формування електронного наряду для вивантаження, можливе з моменту отримання дозволу на вивантаження судна, але можливість обробки наряду з'являється тільки після фактичного вивантаження всіх ІТО-партій з судна на термінал. Внесення експедитором інформації в ІСОД стосовно наряду відбувається цілодобово. Кожному наряду ІСОД присвоюється унікальний номер. Узгодження й оформлення поданих нарядів судновим агентом і ДМСУ відбувається відповідно до графіків їх роботи. Анулювання нарядів здійснюється за ініціативи експедитора і за узгодженням всіх учасників ІСОД, віза яких вже зазначена в електронному наряді. Експедитор має зазначити причини процедури анулювання. Системою формується електронне повідомлення, яке прямує до учасників, які відкликають візи.

Лінійний агент з моменту вступу наряду до ІСОД розглядає можливість випуску контейнера (партії), ставить відповідну відмітку про випуск, яка є обмеженою в часі, і місце повернення порожнього контейнерного обладнання. Інформація про термін дії дозволу на видачу контейнера доступна агентом для коректування в будь-який час. Після візування лінійним агентом наряду всі поля наряду стають заблокованими за виключенням полів «№ транспортного засобу», «№ причепу», «ПІБ водія», «Назва автопідприємства», «Номер документа митного оформлення». Експедитор за потреби може додати електронні копії додаткових документів.

Після візи лінійного агента наряди стають доступними для відміток ДМСУ. Візуванням митний орган виконує процедури контролю ризиків і за їх результатами а) призначає в ІСОД форми контролю; б) проставляє відмітку про можливість навантаження на автотранспорт. Віза митниці інформує експедитора про відсутність зауважень до документів з боку ДМСУ. Експедитор, за необхідності, може додати в ІСОТ додаткові копії документів.

Після надання ДМСУ відмітки, інформація стає доступною для СК, окрім інформації з полів: «№ транспортного засобу», «№ причепу», «ПІБ водія», «Назва автопідприємства».

Якщо це призначено, експедитор проходить технічні засоби контролю, і інформація про результати зазначається в ІСОД. Подальше оформлення відбувається описаним вище порядком.

Якщо інформація не буда внесена експедитором на початковому етапі формування наряду, в нього додаються дані: «№ транспортного засобу», «№ причепу», «ПІБ водія», «Назва автотранспортної компанії», «серія і № паспорту водія».

Для навантаження на автотранспорт відділ обліку СК перевіряє внесену інформацію стосовно транспортного засобу і видає видатковий ордер та електронну перепустку для в'їзду в порт. Після в'їзду на територію відбувається навантаження на автотранспорт і автомобіль переміщується в зону митного оформлення. Посадова особа ДМСУ вносить в ІСОД інформацію про результати технічних засобів контролю, здійснює митні процедури відповідно до встановленого порядку з використанням інформаційних ресурсів ДСТУ, вносить реквізити документа, на базі якого відбувається митне оформлення, проставляє відмітки про дозвіл виїзду з території пункту пропуску. Співробітник ДПСУ, за відсутності зауважень, проставляє відмітку про можливість переміщення за територію пункту пропуску.

Після отримання дозволу ДПСУ транспортний засіб переміщується до контрольно-пропускного пункту (КПП) порту. Контролер КПП перевіряє відмітки митниці і прикордонної служби в системі; за відсутності зауважень вносить з пересувного терміналу відмітку про те, що транспортний засіб з навантаженим контейнером вийшли за територію порту.

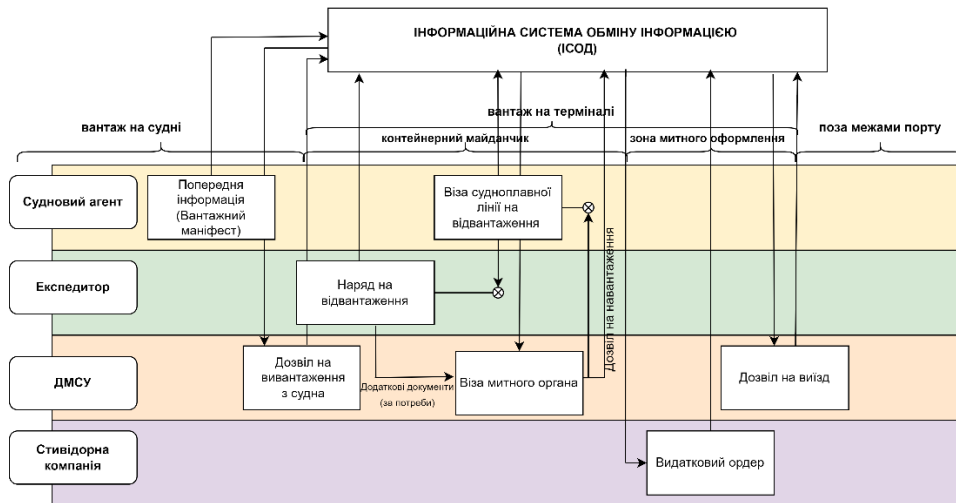


Рис. 1. Обмін інформацією на контейнерному терміналі (імпорт) за допомогою ІСОД

Розділимо процес, покладений до розгляду, на етапи, відповідно до етапів переміщення та місцезнаходження вантажу (рис. 1). В основу такого розподілу покладено зміну географічного положення вантажу і стану завершеності його документарного оформлення. Відтак, загальний процес, що досліджується, може бути поданий у вигляді окремих складових:

1. Вантаж на судні на шляху руху до порту розвантаження:

$$p_1 = [t_{BM}; t_{cn.p.}], \tag{1}$$

де p_1 – частина переходу судна із вантажем, обмежена t_{BM} – момент подання лінійним агентом вантажного маніфесту до ІСОД та $t_{cn.p.}$ – момент прибуття судна до порту розвантаження.

Зазначена складова процесу може бути описана в термінології темпоральної логіки за допомогою оператора U (UNTILL) як безперервний процес:

$$t_{BM} \mid = p_1 U p_2 \equiv \left(\exists t_{cn.p.} \geq t_{BM} \right) : \left(t_{cn.p.} \mid = p_2 \wedge \left(\forall t_{ETA} : t_{cm} \leq t_{ETA} \prec t_{cn.p.} \right) : t_{ETA} \mid = p_2 \right), \quad (2)$$

де t_{ETA} – момент подання судном нотіса про очікуваний час прибуття судна до порту розвантаження.

Прибуття судна до порту, проходження процедур та формальностей, пов'язаних із оформленням прибуття судна до порту, залишаються поза розгляду цієї роботи. За загального розуміння авторами неможливості роз'єднувати вантаж та судно, яке його перевозить, оскільки об'єктно та процесно вони є взаємопов'язаними, однак у цьому дослідженні автори акцентують увагу на процедурах, пов'язаних із імпортом вантажу, та розглядають їх з позицій вантажовласника (або, враховуючи існуючу практику імпорту вантажів у контейнерах, його представника – експедитора).

2. Розвантаження вантажу з судна у порту:

$$p_2 = \left[t_{p'}; t_{p''} \right], \quad (3)$$

де p_2 – розвантаження вантажу з судна, $t_{p'}$ – момент початку розвантаження; $t_{p''}$ – момент закінчення розвантаження.

Подамо цей процес таким чином:

$$t_{p'} \mid = p_2 U p_3 \equiv \left(\exists t_{p'} \geq t_{p''} \right) : \left(t_{p''} \mid = p_3 \wedge \left(\forall t'_2 : t_{p'} \leq t'_2 \prec t_{p''} \right) : t'_2 \mid = p_3 \right), \quad (4)$$

де t'_2 – момент, коли окрема ІГО є знятою з борту вантажно-захоплювальним засобом.

Розвантаженню вантажу з судна передуює подання лінійним агентом до ІСОД вантажного маніфесту, який саме там і має бути завізований митними органами ДМСУ. Чітка послідовність цих подій може бути виражена за допомогою оператора G (GLOBALLY) таким чином:

$$G \left(\neg t_{BM'} \Rightarrow \neg p_{p'} \right), \quad (5)$$

де $t_{BM'}$ – момент візування ДМСУ вантажного маніфесту від лінійного агента у ІСОД.

Власне розвантаження вантажів з судна є сукупністю процесів, розвантаження окремої ІГО є його частиною:

$$p_2^K \in p_2, \quad (6)$$

де p_2^K – процес розвантаження певної ІГО; враховуючи сучасні технологічні та технічні засоби відбувається достатньо швидко:

$$p_2^K \rightarrow 0. \quad (7)$$

Зрозуміло, що кожна ІТО буде розвантажена з судна:

$$\forall p_2^K \exists t_{p''}^K, \quad (8)$$

де $t_{p''}^K$ – момент закінчення розвантаження ІТО з судна, що дозволяє надалі обмежитись формалізацією процесів для ІТО, оскільки для усіх інших вони наразі будуть тими самими у процедурному відношенні. Із закінченням розвантаження експедитор має право подати до ІСОД наряд, що може бути формалізований оператором F (FUTURE):

$$G \left[t_{p''}^K \Rightarrow Ft_H^e \right], \quad (9)$$

де t_H^e – момент подання експедитором наряду.

3. Зберігання вантажу на складському контейнерному майданчику терміналу також є складовою процесу, що розглядається:

$$p_2 = \left[t_{p''}; t_{3CM} \right], \quad (10)$$

де t_{3CM} момент закінчення завантаження контейнера на суміжний вид транспорту.

У термінах темпоральної логіки зберігання вантажу на складському контейнерному майданчику може бути подано у такому вигляді:

$$t_{p''} \mid = p_3 \cup p_4 \equiv \left(\exists t_{p''} \geq t_{3CM} \right) : \left(t_{3CM} \mid = p_4 \wedge \left(\forall t_{nCM} : t_{p''} \leq t_{nCM} < t_{3CM} \right) : t_{3CM} \mid = p_4 \right), \quad (11)$$

де t_{nCM} – початок завантаження на суміжний вид транспорту.

Основний документообіг та процеси, пов'язані із оформленням дозволу на виїзд контейнера з території порту, відбуваються саме на контейнерному терміналі, який, враховуючи, що саме вантаж (контейнер) покладено одним з предметів розгляду цієї роботи, подано у двох географічних позиціях – складська площадка та зона митного оформлення. Значимо, що інфраструктурно обидва ці елементи є елементами контейнерного терміналу. Однак, враховуючи різні статуси вантажу, а також різний характер процедур та операцій, які мають бути виконані для отримання дозволу, доцільним є, на думку авторів, їх відокремлений розгляд.

Згаданому вище поданню експедитором наряду, передають процедури їх візування лінійним агентам та ДМСУ, що у термінах темпоральної логіки із використанням операторів P (PAST) та X (NEXT TIME) може бути подано як:

$$P \left(t_H^e \wedge \left(XGt_H^l \vee t_H^{ДСМУ} \right) \right), \quad (12)$$

де t_H^l – момент візування наряду експедитора лінійним агентом; – $t_H^{ДСМУ}$ момент візування наряду ДМСУ, без чого неможливим є завантаження контейнера на суміжний вид транспорту, що власне є підставами для завантаження контейнера на суміжний транспорт:

$$G\left(\neg t_{nCM} \Rightarrow \neg\left(t_n^e \wedge \left(XGt_n^L \vee t_n^{ДСМУ}\right)\right)\right) . \quad (13)$$

З позицій лінійного агента:

$$G\left(\neg t_{\phi}^e \neg t_n^L\right), \quad (14)$$

де t_{ϕ}^e – момент закінчення виконання експедитором зобов'язань зі сплати фрахту.

Момент подання експедитором наряду визначається ступенем готовності суміжного транспорту, тож знаходження судна на складському майданчику, залежно від цього, може становити як певний проміжок часу. так і бути незначним:

$$p_3 \rightarrow 0. \quad (15)$$

У будь-якому випадку, з позицій експедитора:

$$G\left(\neg t_{CM} \neg t_n^e\right), \quad (16)$$

де t_{CM} – момент готовності суміжного транспорту.

4. Вантаж перевозиться суміжним транспортом до зони митного контролю:

$$p_4 = \left[t_{3CM}; t_{3MO} \right], \quad (17)$$

де t_{3MO} – момент прибуття вантажу до зони митного контролю.

Враховуючи, що згадане вище про територіальне розташування складського майданчика та зони митного контролю, таке перевезення фактично здійснюється за лічені хвилини, покладемо:

$$p_4 \rightarrow 0 . \quad (18)$$

5. Вантаж знаходиться у зоні митного контролю:

$$p_5 = \left[t_{3MO}; t'_{3MO} \right], \quad (19)$$

де t'_{3MO} – момент виїзду вантажу з зони митного контролю поза межі порту.

Апарат темпоральної дозволяє подати цю складову загального процесу як:

$$t_{3MO} \mid = p_5 \cup p^* \equiv (\exists t'_{3MO} \geq t_{3MO}) : \left(t'_{3MO} \mid = p^* \wedge \left(\forall t^M : t_{3MO} \leq t^M \prec t'_{3MO} \right) : t^M \mid = p^* \right), \quad (20)$$

де p^* – процес переміщення вантажу суміжним видом транспорту; t^M – візування ДМСУ

митної декларації із дозволом «випущено для вільного обігу», що власне і є дозволом для вивозу вантажу з порту.

Висновки. Скоординовані дії та операції учасників документного забезпечення процесу обслуговування ІТО структуровано у часі відповідно до причинно-наслідкових зв'язків між ними, що дозволяє визначити логіку процесу у цілому та виконання окремих операцій. Важливим є взаємопов'язаність та взаємна обумовленість таких дій та операцій – адже жодна наступна складова переміщення не може бути реалізована без відповідних дій тих учасників загального процесу, які залучені до попереднього етапу, та мають бути реалізовані ними своєчасно. Фактично такі затримки у виконанні функцій призводять до затримок у часі реалізації загального процесу. Отримані результати дозволяють як використовувати їх у вигляді складової формалізації процесу організації оператором інтермодального перевезення взагалі, так і для визначення та усунення окремих «вузьких місць» у тій її частині, що була розглянута. Формалізований опис процесу обробки ІТО може бути покладений у основу розробки рішень щодо їх моделювання та оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шраменко Н. Ю., Орда О. О. Формалізація процесу взаємодії суб'єктів транспортного ринку при інтермодальних контейнерних перевезеннях. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2016. № 2. С. 167-174.
2. Коскіна Ю. О. Формалізований опис процесу залучення судна для перевезення вантажу. Транспортні системи і технології, 2019. № 34. С. 267-279. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2>.
3. Kirillova Y., Malaksiano M. Substantiation of structure of the port handling equipment fleet based on a multicriteria approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. 5(3(89)), P. 52–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111971>.
4. Нагорний С. В., Наумов В. С., Літвінова Я. В. Імітаційна модель процесу функціонування мультимодального транспортного вузла. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, 2016. Вип. 9. С. 80-89.
5. Naumov V., Nagornyi Ie. Litvinova Ya. (2015). Model of multimodal transport node functioning. Archives of Transport, 2015. Vol. 36. P. 43-54. <https://doi.org/10.5604/08669546.1185202>.
6. Кічкін А. В., Кічкіна О. І. Імітаційне моделювання та аналітичне дослідження експортного зернового терміналу морського порту. Транспортні системи і технології, 2021. Вип. 36. С. 94-103. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-10>.
7. Voorde E. V. D., Vanelslander T. (2009). Market power and vertical and horizontal integration in the maritime shipping and port industry. OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Papers, 2009. Vol. 2. P. 5-28. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.010>.
8. Tan Z., Meng Q., Wang F., Kuang H. Strategic integration of the inland port and shipping service for the ocean carrier, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018. Vol. 110. P. 90-109 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.010>.
9. Gekara V. O., Nguyen, X. V. T. Challenges of implementing container terminal operating system: The case of the port of Mombasa from the Belt and Road Initiative (BRI) perspective. Journal of International Logistics and Trade, 2020. Vol. 18(1). P. 49-60.
10. Torlak I., Tijan E., Aksentijević S., Oblak R. Analysis of Port Community System Introduction in Croatian Seaports-Case Study Split. Transactions on Maritime Science, 2020. Vol. 9(02). P. 331-341.
11. Long A. (2009). Port community systems. World customs journal, 2009. Vol. 3(1). P. 63-67.
12. Wang, F. Interagency coordination in the implementation of single window: Lessons and good practice from Korea. World Customs Journal, 2018. P. 49.
13. Peters, H. J. Developments in global searade and container shipping markets: their effects on the port industry and private sector involvement. International Journal of Maritime Economics, 2001. Vol. 3(1). P. 3-26. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ijme.9100003>.
14. Olivier D., Parola F., Slack B., Wang J. J. The time scale of internationalisation: the case of the container port industry. Maritime economics & logistics, 2007. Vol. 9(1). P. 1-34. <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100169>.
15. Satta G., Parola F., Persico L. (2014). Temporal and spatial constructs in service firms' internationalization patterns: the determinants of the accelerated growth of emerging MNEs. Journal of International Management, 2014. Vol. 20(4). P. 421-435. <https://doi.org/10.1016/j.intman.2014.05.001>
16. Наказ Міністерства інфраструктури України Про затвердження Правил надання послуг у морських портах України: прийнятий 05 черв. 2013 року № 348. Офіційний вісник України, 2013. № 65. 21 с.

REFERENCES

1. Shramenko, N. Yu., & Orda, O. O. (2016). Formalizatsiia protsesu vzaiemodii subiektiv transportnoho rynku pry intermodalnykh konteynernykh perevezenniakh [Formalization of the process of interaction of transport market subjects in

intermodal container transportation]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti - Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 2, 167-174. [in Ukrainian].

2. Koskina, Y. (2019). Formalizovanyi opys protsesu zaluchennia sudna dlia perevezennia vantazhu [A formalized description of the process of engaging a vessel for cargo transportation]. *Transportni systemy i tekhnologii - Transport systems and technologies*, 34, 267-279. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-9> [in Ukrainian].

3. Kirillova, Y., & Malaksiano, M. (2017). Substantiation of structure of the port handling equipment fleet based on a multicriteria approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(89)), 52-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111971>.

4. Nahorni, Ye. V., Naumov, V. S., & Litvinova, Ya. V. (2016). Imitatsiina model protsesu funktsionuvannia multimodalnoho transportnoho vuzla [Simulation model of the multimodal transport hub operation process]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii - Car and electronics. Modern technology*, 9, 80-89. [in Ukrainian].

5. Naumov, V. Nagorni, Ie. & Litvinova, Ya. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36, 43-54. <https://doi.org/110.5604/08669546.1185202>.

6. Kichkin, O., & Kichkina, O. (2021). Imitatsiine modeliuвання ta analitychne doslidzhennia eksportnoho zernovoho terminalu morskoho portu [Simulation modeling and analytical study of a seaport export grain terminal]. *Transportni systemy i tekhnologii - Transport systems and technologies*, 36, 94-103. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-10> [in Ukrainian].

7. Voorde, E. V. D., & Vanelslander, T. (2009). Market power and vertical and horizontal integration in the maritime shipping and port industry. *OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Papers*, 2, 5-28. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.010>.

8. Tan, Z., Meng, Q., Wang, F., & Kuang, H. (2018). Strategic integration of the inland port and shipping service for the ocean carrier. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 110, 90-109. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.010>.

9. Gekara, V. O., & Nguyen, X. V. T. (2020). Challenges of implementing container terminal operating system: The case of the port of Mombasa from the Belt and Road Initiative (BRI) perspective. *Journal of International Logistics and Trade*, 18(1), 49-60.

10. Torlak, I., Tijan, E., Aksentijević, S., & Oblak, R. (2020). Analysis of Port Community System Introduction in Croatian Seaports-Case Study Split. *Transactions on Maritime Science*, 9(02), 331-341.

11. Long, A. (2009). Port community systems. *World customs journal*, 3(1), 63-67.

12. Wang, F. (2018). Interagency coordination in the implementation of single window: Lessons and good practice from Korea. *World Customs Journal*, 49.

13. Peters, H. J. (2001). Developments in global searade and container shipping markets: their effects on the port industry and private sector involvement. *International Journal of Maritime Economics*, 3(1), 3-26. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ijme.9100003>.

14. Olivier, D., Parola, F., Slack, B., & Wang, J. J. (2007). The time scale of internationalisation: the case of the container port industry. *Maritime economics & logistics*, 9(1), 1-34. <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100169>.

15. Satta, G., Parola, F., & Persico, L. (2014). Temporal and spatial constructs in service firms' internationalization patterns: the determinants of the accelerated growth of emerging MNEs. *Journal of International Management*, 20(4), 421-435. <https://doi.org/10.1016/j.intman.2014.05.001>

16. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukrainy Pro zatverdzhennia Pravyl nadannia posluh u morskikh portakh Ukrainy: pryiniaty 05 cherv. 2013 roku № 348. [Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine on the approval of the Rules for the provision of services in seaports of Ukraine]. (2013, June). *Ofitsiyni visnyk Ukrainy – Official Herald of Ukraine*, 65. [in Ukrainian].

Yuliia Koskina¹, Oleksii Drozhzhyn²

¹ Professor, "Fleet Operation and Sea Technology Transportation" department, Odesa National Maritime University, 34, Mechnykova str., Odesa, 65029, Ukraine

² Assistant Professor, "Fleet Operation and Sea Technology Transportation" department, Odesa National Maritime University, 34, Mechnykova str., Odesa, 65029, Ukraine

RESEARCH OF PROCESSING INTERMODAL TRANSPORT UNITS AT THE TERMINAL IN THE "SINGLE WINDOW" CONCEPT

The paper examines operations that take place at the sea container terminal in the context of a unified system of information exchange between participants in intermodal cargo transportation. The study aims to formalize the cargo handling process at the sea container terminal through the temporal logic

apparatus, which allows for the distribution of the processes necessary for the cargo lots forwarding formalities at the seaport terminal, according to causal relationships in time. The urgency of the work is explained by the rapid development of containerization and the growing demand for transportation in intermodal transport units from the side of cargo owners. The feasibility of implementing "single window" systems for intermodal transportation is confirmed by the complexity of such transportation systems: the presence of several types of transportation, the requirement of a high degree of integration of transportation participants, and strict time constraints. The practical significance of the presented formalization provides an idea of the cargo handling algorithm, contributes to the qualitative formulation of the task of designing software solutions for information exchange at container terminals that shorten the cargo handling process by simplifying the document flow.

Keywords: *container terminal, intermodal transportation, single window, information system of data exchange.*

Олексій Куроп'ятник¹, Олександр Краснощок^{2*}

¹ Доцент, Кафедра прикладної механіки та матеріалознавство, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5581-3883>

² Аспірант, Кафедра прикладної механіки та матеріалознавство, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0140-5179>

* Автор, відповідальний за листування: akrasnoshchok1996@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ КАНАТНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Основною метою даної статті є огляд і аналіз можливостей інтеграції канатного транспорту в міське середовище для розвантаження та перерозподілу пасажиропотоків великих міст з урахуванням актуальних питань енергоефективності та ресурсозбереження. **Методика.** Визначено, що успішне функціонування держави залежить від транспортного процесу. При цьому автомобільні перевезення набувають більшого значення. Використано статистичні дані за 2020 та 2021 роки щодо вантажо- та пасажироперевезень. Статистика дорожньо-транспортних пригод збільшується за останні роки. Питання безпеки пасажирів та вантажоперевезень є актуальними. При проектуванні сучасного альтернативного виду транспорту важливо прорахувати можливі інноваційні рішення. Одним з таких підходів є позиція щодо енергетичної ефективності та ресурсозбереження. При цьому енергоефективність стосується не тільки процесів машинобудування даних транспортних систем, але й роботи канатного транспорту. Інноваційним рішенням можуть бути канатні системи, в яких кабіни рухаються по несучому канату й обладнані власним приводом. **Результати.** Розглянуто основні функції та значення транспортної системи країни, основні види транспорту, у тому числі і пасажирські. Визначено транспортну проблему великих міст через перевантаженість автомобільних шляхів. Виконано огляд і аналіз можливостей інтеграції канатного транспорту в міське середовище для розвантаження та перерозподілу пасажиропотоків великих міст з урахуванням актуальних питань енергоефективності та ресурсозбереження. Розглянуті перспективи впровадження канатного транспорту. **Наукова новизна.** Визначені проблеми транспорту України. Використані статистичні дані по дорожньо-транспортних пригодах, обсягах вантажних та пасажирських перевезень. Запропоноване рішення щодо розвантаження автомобільних доріг великих міст з метою підвищення безпеки пасажироперевезень та екологічності на транспорті. Розроблена схема самохідного вагона канатного транспорту з індивідуальним приводом. **Практична значимість.** Питання енергоефективності торкається раціонального використання енергетичних ресурсів, а з цим означає, що використання меншої кількості енергетичних ресурсів приведе до зниження витрат на процес транспортування. Використання енергоефективних технологій дозволить менш згубно впливати на екологію, що має колосальне значення в умовах крупного міста.

Ключові слова: пасажирські перевезення; канатна дорога; канатний транспорт; енергоефективність; самохідні вагони; альтернативний транспорт.

Вступ. Канатні дороги є універсальним альтернативним видом транспортом, який має значні переваги над іншими видами міського транспорту, що забезпечують перевезення людей [11, 15].

Транспортна стратегія України в умовах європейської інтеграції складається з п'яти пріоритетних напрямів для транспорту:

- 1) Ефективність державного управління.
- 2) Надання якісних та ефективних послуг.
- 3) Забезпечення сталого фінансування.
- 4) Підвищення безпеки та надійності.
- 5) Покращення міської мобільності та регіональної інтеграції України.

Для реалізації цілей та завдань енергетичної політики держави щодо скорочення питомої енергоємності транспортних систем формуються програми енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності.

Згідно із Законом України «Про енергетичну ефективність» [7], сфера забезпечення енергетичної ефективності охоплює енергоефективні заходи, що здійснюються під час виробництва, транспортування, передачі, розподілу та споживання енергії.

При виборі типу альтернативного транспорту вирішальними є такі параметри, як пропускна здатність, швидкість руху, місткість транспортного засобу, тип шляху, наявність можливостей впровадження в міській забудові. Енергоефективність також вважають одним з ключових моментів для порівняння транспортних систем, схожих за призначенням.

Основними типами міського пасажирського транспорту є автомобільний та громадський транспорт (автобуси, тролейбуси тощо). Проте обидва варіанти використовують автотранспортні шляхи. Канатний транспорт має ряд переваг відносно автомобільного транспорту при інтеграції в пасажирську транспортну систему міста:

- 1) наявність власних канатних шляхів, що розташовуються на певній відстані від землі та не перетинаються з існуючими автошляхами й прилеглою інфраструктурою;
- 2) менший час подолання відстаней;
- 3) менша кількість дорожньо-транспортних пригод, у тому числі за участю пішоходів;
- 4) мала залежність від погодних умов;
- 5) низький рівень шуму і вібрацій міста.

Крім цього канатний транспорт є більш екологічно чистим за рахунок використання електроприводу, вирішує проблему паркувальних місць, зменшує кількість персоналу громадського транспорту через автоматизацію перевізного процесу. Виходячи із вищевказаних переваг, можна стверджувати, що канатний транспорт є перспективним альтернативним видом пасажирського транспорту.

Основними видами наземного пасажирського транспорту у великих містах є приватний автомобільний, автобусний, тролейбусний, трамвайний та залізничний. Проте переважна більшість видів транспорту мають проблему через завантаженість автомобільних доріг. Важливим є впровадження транспортних систем, які інтегруються у міське середовище через власні шляхи. При цьому для канатних доріг ці шляхи можуть оминати будь-яку місцевість з мінімальними площадками для опор. До того ж пропускна здатність пасажиропотоку канатних доріг може досягати до 6 000 чол./год. Швидкість вагонів до 8 м/с, а максимальна місткість вагонів – до 60 чол.

При виборі нового альтернативного транспорту вирішальними є питання екологічності, енергоефективності, зручності, швидкості перевезень і безпеки пасажирів і багажу. Вище зазначені переваги мають підвісні канатні дороги. При цьому можлива повна автоматизація перевізного процесу.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Транспорт повинен забезпечувати потреби економіки та населення у перевезеннях. Транспортні системи забезпечують економічну цілісність країни, успішне функціонування підприємств у різних її сферах. Транспортні перевезення поділяють на вантажні та пасажирські [2].

Сучасні пасажирські перевезення можуть виконуватись різними видами пасажирського транспорту: автомобільним, залізничним, повітряним, водним. Окремо виділяють також

міський пасажирський транспорт, куди відносять автомобілі, трамваї, тролейбуси, метро, легкове таксі, різні види альтернативного транспорту.

Існує гостра проблема в сфері міського транспорту через перевантаженість існуючих автомобільних шляхів, а також відносно дороговизну і значний час на зведення ліній метрополітену. Через нерегульовану автомобілізацію та значну перевантаженість міського транспорту виникає необхідність впровадження інноваційних рішень, які спроможні розвантажити пасажиропотоки великих міст. Одним з можливих рішень розвантаження автомобільних шляхів, з одночасним вирішенням питання перерозподілу пасажиропотоку, може виступати канатний транспорт.

Наукова новизна даної роботи полягає в обґрунтуванні доцільності використання канатного транспорту для вирішення транспортної проблеми, що дозволило виділити пріоритетні напрями розвитку транспортної системи великих міст.

Практичне значення роботи: запропоновано використання канатного транспорту, зокрема, канатних систем із самохідними вагонами, що дозволить скоротити кількість дорожньо-транспортних пригод та перерозподілити вантажопотоки й пасажиропотоки для розвантаження автомобільних шляхів.

Мета і завдання дослідження. Основною метою даної роботи є огляд і аналіз можливостей інтеграції канатного транспорту в міське середовище для розвантаження та перерозподілу пасажиропотоків великих міст з урахуванням актуальних питань енергоефективності та ресурсозбереження.

Розглянути основні функції та значення транспортної системи країни, основні види транспорту, у тому числі й пасажирського. Окреслити транспортну проблему великих міст, зумовлену перевантаженістю автомобільних шляхів.

Виконати огляд можливостей інтеграції канатного транспорту в міське середовище для розвантаження та перерозподілу пасажиропотоків великих міст з урахуванням актуальних питань енергоефективності та ресурсозбереження.

Розглянути перспективи впровадження канатного транспорту. Навести статистичні дані щодо дорожньо-транспортних пригод за останні три роки, об'єму вантажних і пасажирських перевезень. Навести основні показники ефективності канатного транспорту.

Матеріали та методи дослідження. Успішне функціонування транспорту є необхідною умовою для всіх сфер життя людей. При цьому автомобільний транспорт в розвинених країнах займає значну частку у загальному перевізному процесі. Він набуває дедалі більшого значення й в Україні. Це найбільш маневрений і ефективний вид транспорту для перевезення вантажів дрібними партіями на близьку відстань [3, 14].

Основним недоліком існуючих методів обґрунтування та вибору типу перевезень є те, що вони виходять з ідеї витратної ефективності рухомого складу і не враховують важливу особливість майбутніх транспортних технологій – зміну параметрів системи для забезпечення найбільшої енергоефективності.

Аналіз статистичних даних. Протягом останніх років спостерігається велике скорочення кількості транспортних засобів у споживчій кооперації. Найбільш скорочено вантажні автомобілі, це призвело до зменшення вантажних перевезень. Простежується також тенденція до скорочення кількості пікапів, автобусів, спеціальних автомобілів [6].

Загальну кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП) автомобільного транспорту, з потерпілими та травмованими в Україні за останні 3 роки наведено в табл. 1 [12].

Сумна статистика вказує на те, що питання безпеки людей, які використовують автомобільний транспорт, є актуальним та потребує змін. Статистичні дані об'єму вантажних перевезень в Україні у 2020 році наведені в табл. 2 [13]

Таблиця 1. Статистика дорожньо-транспортних пригод в Україні за останні 3 роки

Рік	Загальна кількість ДТП	ДТП з потерпілими	Кількість травмованих в ДТП
2019	160 675	26 052	32 736
2020	168 107	26 140	31 974
2021	170 972	22 456	27 296

Таблиця 2. Статистика об'єму вантажних перевезень в Україні у 2020 році

Вид транспорту	Вантажоперевезення, млн. т	Доля у загальному вантажоперевезенні	Вантажообіг, млрд. т-км
Залізничний	278,8	51%	159,9
Водний	5,2	0,95%	2,6
Автомобільний	174,6	31,94%	38,6
Трубопровідний	87,9	16,08%	62,3
Авіаційний	0,1	0,03%	–

Частка виду транспорту у загальному вантажоперевезенні за статистичними даними на 2020 рік в Україні зображено на об'ємній круговій гістограмі рис. 1.

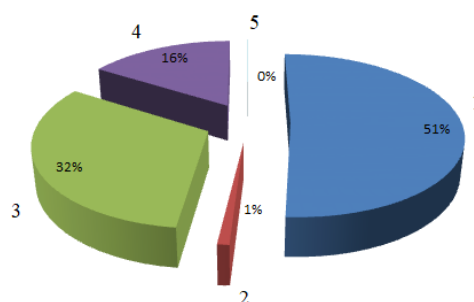


Рис. 1. Частка виду транспорту у загальному вантажоперевезенні у 2020 році в Україні: 1 – залізничний (51%); 2 – водний (0,95%); 3 – автомобільний (31,94%); 4 – трубопровідний (16,08%); 5 – авіаційний (0,03%)

Об'єм пасажирських перевезень в Україні у 2021 році наведені в табл. 3[5].

Таблиця 3. Об'єм пасажирських перевезень в Україні у 2021 році

Вид транспорту	Перевезено пасажирів, тис	Частка у загальному пасажироперевезенні	Пасажирообіг, млн.пас. км
Залізничний	14 781,5	4,75%	1853
Автомобільний	52 277,3	16,8%	798,7
Тролейбусний	45 271,8	14,55%	348,6
Трамвайний	40 193,0	12,92%	277,3
Метрополітен	158 585,6	50,98%	1 030,8

Автомобільний транспорт є також ключовим у процесах пасажироперевезень. Враховуючи перевантаженість автомобільних шляхів, щільність міської забудови та обмежену кількість паркувальних місць для транспорту, також актуальними є питання розвантаження автодоріг.

Частка виду транспорту у загальному пасажироперевезенні за статистичними даними на 2021 рік в Україні зображено на об'ємній круговій гістограмі рис. 2.

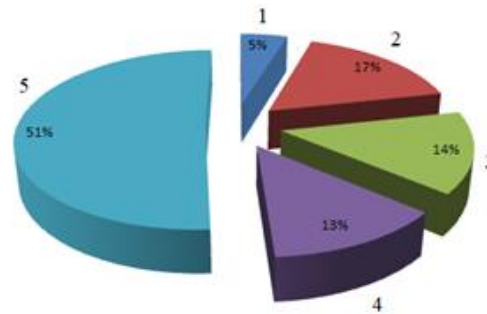


Рис. 2. Частка виду транспорту у загальних пасажироперевезеннях у 2021 році в Україні:

1 – залізничний (4,75%); 2 – автомобільний (16,8%); 3 – тролейбусний (14,55%);
4 – трамвайний (12,92%); 5 – метрополітенівський (50,98%)

Незважаючи на всі переваги автомобільного транспорту, існує ряд проблем, які важко усунути в межах щільної забудови великих міст. Серед них:

- старіння автопарку;
- руйнування доріг;
- висока аварійність, завантаженість та затори;
- низька екологічність та велика кількість викиду парникових газів;
- високий рівень шуму та вібрацій;
- значні капітальні затрати на ремонти та техогляд;
- низька перевізна спроможність;
- залежність від рельєфу та місцевості.

Виходячи із статистичних даних, можна зробити висновок, що у вантажних перевезеннях провідне значення мають залізничний, автомобільний та трубопровідний транспорт, а серед пасажирських перевезень – метрополітенівський, автомобільний і тролейбусний. В умовах міст важливе значення мають власне автомобільний та громадський транспорт.

Енергоефективність транспорту. Питання енергетичної ефективності не є новим і пов'язане з цілою низкою підходів, що дозволяють максимально зберегти природні ресурси.

Питання обґрунтування оптимальних значень параметрів приводу, за яких зведені енерговитрати на транспортування вантажу набувають найменшого значення, є актуальним [8].

Енергоефективність – це ефективне використання енергетичних ресурсів (енергії). Для порівняння транспортних засобів за енергоефективністю вводять певні показники, за якими оцінюють ефективність споживання (використання) енергетичних ресурсів.

Для оцінки ефективності впровадження нових технологій, схем компонування приводу, використання високопродуктивних машин і агрегатів, необхідно виконати порівняльну оцінку за певними критеріями, що будуть відображатися у відсотках та величинах, які можна буде перевести в грошовий еквівалент [11].

Міський канатний транспорт. Транспортний процес є невід'ємною складовою як соціальної, так і виробничої інфраструктури міст. Основа розвитку транспортної інфраструктури міста – забезпечення вчасного перевезення пасажирів та вантажів з одночасним високим рівнем безпеки цього процесу, а також зберегання стану навколишнього середовища.

Канатний транспорт – це системи, в яких переміщення пасажирів і вантажу відбувається у спеціальних вагонах з використанням тягового, несуче-тягового канату або децентралізованої тяги, при цьому вагони не торкаються землі. До таких систем належать й канатні дороги [1].

Прикладами впровадження пасажирських канатних доріг в міське середовище є: Хон Том та Vinpearl у В'єтнамі, Гентінгська в Малайзії, Гульмарг в Індії, Peak Gondola в Канаді, Мі Teleferico в Болівії, Чжанцзяцзе у Китаї, Телеферико-де-Мерида у Венесуелі, Cabrio у Швейцарії та ін. [9].

Через те, що канатний транспорт є відносно новим (принаймні, для України), виникає необхідність детального вивчення процесів утворення, перерозподілу та витрачання енергії, яка необхідна для його функціонування.

Пасажирські підвісні канатні дороги бувають маятникового та кільцевого типу. Кількість канатів може варіюватися від одного до двох. Канати за функціями, що виконують – тягові та несучі, або несуче-тягові. За класифікацією канатних доріг Беркманом М. Б. [1] визначено можливість створення канатних доріг із децентралізованою тягою.

Інтеграція канатного транспорту у міську забудову (рис. 3) [4] значно розвантажує автомобільні дороги, вирішує питання переміщення людей за гнучким графіком.



Рис. 3. Приклад інтеграції канатної дороги у міську забудову

Канатні дороги з самохідними вагами. Інноваційним рішенням можуть бути канатні системи, вагони яких оснащено індивідуальними приводами; такі вагони рухаються по несучому канату без додаткової канатної тяги і зветься самохідними. При проектуванні цього виду транспорту використовуються сучасні технологічні рішення у поєднанні з більшістю переваг канатних доріг у традиційному розумінні. Принципову схему самохідного вагона зображено на рис. 4.

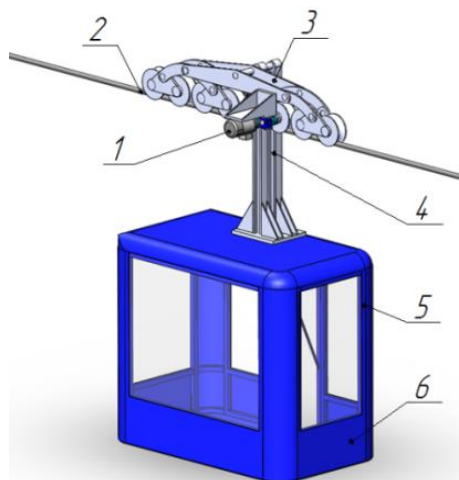


Рис. 4. Схема самохідного вагона канатного транспорту:

1 – привід; 2 – несучий канат; 3 – візок; 4 – підвіс; 5 – кабіна; 6 – акумуляторна секція

Конструкція канатних доріг з тяговим канатом, забезпечує рух вагонів постійно за робочим графіком канатного транспорту [10]. При використанні канатних доріг з самохідними вагонами проблема із постійним переміщенням незаповнених вагонів зникає.

У розробці проект канатного транспорту із самохідними вагонами. Кількість вагонів на станції може варіюватися залежно від середньої завантаженості у годину пік. Тому енергоефективність перевізного процесу буде залежати безпосередньо від завантаженості.

Самохідний вагон канатного транспорту (рис. 4) складається з приводу, несучого канату, візка, підвісу, кабіни, акумуляторної секції.

При цьому, очікуваним результатом є підвищення енергоефективності за рахунок використання індивідуального приводу на кожному вагоні канатної дороги. Привід самохідний вагона використовує несучий канат замість тягового, що значно знижує затрати на споруду канатних шляхів, поліпшує автономність та підвищує надійність роботи підвісної канатної дороги.

Привід за такою конструктивною схемою розподілений на дві частини, що синхронізуються між собою. Кінематична схема самохідного вагона канатного транспорту зображена на рис. 5, та включає в себе мотор-редуктор, муфту, гальмо, ходове колесо, підшипникові вузли.

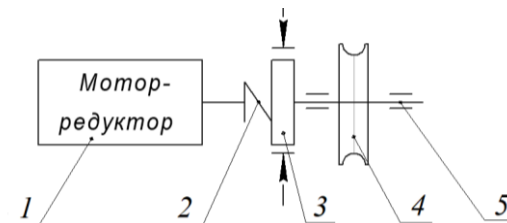


Рис. 5. Схема самохідного вагона канатного транспорту:

1 – привід; 2 – несучий канат; 3 – візок; 4 – підвіс; 5 – кабіна; 6 – акумуляторна секція

Показники оцінки ефективності канатного транспорту. Вихідні значення показників якості канатного транспорту зумовлені призначенням, а ступінь відповідності їх фактичних значень свідчить про досягнуту якість. За це відповідають такі параметри, як пропускна здатність, потужність, рівень шуму, показники безпеки, ергономічності, якості надання транспортних послуг, надійності, довговічності, зручності керування тощо. Серед економічних показників канатного транспорту впливають такі показники, як собівартість, вартість наданої послуги, витрати енергії, вартість виробничої площі, вартість землі, що використовується для монтажу опор, тощо.

До нових конструкцій канатного транспорту висуваються особливі вимоги за такими критеріями: матеріаломісткість, рівні технологічності, уніфікації, взаємозамінності конструкцій, технологічність виготовлення, ступінь безпеки та показники енергоефективності.

Висновки. Більшість існуючих транспортних комплексів використовують автошляхи, які перевантажені та не у повному обсязі спроможні забезпечувати пасажироперевезення в умовах щільної забудови міст.

Через використання автомобільного транспорту виник ряд суттєвих проблем, таких як дорожньо-транспортні пригоди з потерпілими, підвищений рівень забруднення навколишнього середовища, у тому числі викидів шкідливих газів, нестача паркувальних місць тощо.

Канатні дороги дозволяють зменшити транспортне навантаження на автомобільні шляхи та вирішують проблеми із викидом шкідливих газів, оскільки є екологічно чистим видом транспорту, а також вирішують питання проблем із переміщенням людей.

Однак, використання застарілих конструкцій, не дозволяє доцільно розподіляти та споживати енергію і такий перевізний процес не є енергоефективним.

Тому створено проект канатного транспорту із самохідними вагонами. Розроблена конструкція використовує несучий канат, замість тягового. Це рішення має ряд переваг:

по-перше, за рахунок використання потужностей невеликих електродвигунів, по-друге, не використовується тяговий канат, що також має втрати за рахунок демпфуючих властивостей, по-третє, підвищена безпека перевезень через страхувальний канат, а також можливостей самохідних вагонів.

Також індивідуальний привід на кожному вагоні споживає та може заощаджувати енергію за рахунок автономних акумуляторних секцій за прогресивними технологіями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беркман М. Б., Бовский Г. И., Куйбида Г. Г., Леонтьев Ю. С. Подвесные канатные дороги. Підручник. М. : Машиностроение, 1984. 264 с.
2. Василюк А. Я. Стан та проблеми розвитку автомобільного транспорту України. Буковинська державна фінансова академія. URL: http://rusnauka.com/16_ADEN_2010/Economics/68383.doc.htm (дата звернення 15.11.2022).
3. Галена И. И., Пицый М. Г. Метод эксплуатационного управления транспортной энергоэффективностью автомобиля малой грузоподъемности. World Science, 2021. № 1(62). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7407.
4. Джунгли над рекой и призрак машинной станции: какие тайны хранит «канатка» в Днестре. Сайт «Новини Дніпра». URL: <https://opentv.media/dzhungli-nad-rekoj-i-prizrak-mashinnoj-stantsii-kakie-tajny-hranit-kanatka-v-dnepre> (дата звернення 15.11.2022).
5. Статистика Внутреннего транспорта. Сайт «ЕЭК ООН», 2020. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-05/2016106_WEB-Light.pdf (дата звернення 15.11.2022).
6. Жук А. О., Когут В. И., Салавор О. М. Заходи, спрямовані на розвиток автотранспортної системи України. Матеріали IV-ої міжнародної науково-практичної інтернетконференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 15-16 квітня 2016 року: збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2016. С 41-45.
7. Закон України «Про енергетичну ефективність». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення 15.11.2022).
8. Куроп'ятник О. С. Параметрична оптимізація стрічкових конвеєрів за критерієм енергоефективності. Наука та прогрес транспорту. 2021. № 3(93). С.50–58. <https://doi.org/10.15802/stp2021/242036>.
9. От длиннейшей к высочайшей: 10 «самых» канатных дорог в мире. Сайт «KUKU.TRAVEL». URL: <https://kuku.travel/article/ot-dlinnejshoj-k-vysochajshej-10-samyx-kanatnyx-dorog-v-mire/> (дата звернення 15.11.2022).
10. М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, Г. Ю. Землянхуна, Д. В. Руднев. Аналіз режимів роботи електропривода підвісної канатної дороги при використанні системи вектора керування. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, 2021. Вип. 58. С. 039. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.039>.
11. Ракша С. В., Куроп'ятник О. С., Красношук О. Л. Обґрунтування показників енергоефективності канатних доріг. Наука та прогрес транспорту, 2019. № 6 (84). URL: <http://stp.diit.edu.ua/article/view/195601/199667>.
12. Статистика дорожно-транспортних пригод в Україні. Сайт «Волинські новини». URL: <https://www.volynnews.com/news/all/cherez-vyynu-kilkist-dtp-zmenschylasia-na-50-statystyka-avtopryhod-na/> (дата звернення 15.11.2022).
13. Сайт «Пасажирський транспорт». Статистика показала падіння загального обсягу вантажних перевезень в Україні. URL: <https://traffic.od.ua/news/fleet/1232055> (дата звернення 15.11.2022).
14. Яцківський Л.Ю., Зеркалов Д.В. Загальний курс транспорту. Книга 2. Навчальний посібник – К., Арістей, 2007, 504 с.
15. Krasnoshchok O. L. Prospects for the introduction of passenger rope transport. Modern ways of solving the latest problems in science. Proceedings of the XXXVII International Scientific and Practical Conference. Varna, Bulgaria, 2022. P. 57-59. <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.37>.

REFERENCES

1. Berkman, M.B., Bovsky G.I., Kuibida G.G., & Leontiev Yu.S. (1984). Podvesnyie kanatnyie dorogi [Suspension cable cars]. M: *Mashinostroenie - Mechanical engineering* [in Russian].
2. Vasilynyuk, A.Y. Stan ta problemi rozvutku avtomobilnogo transportu Ukraini [State and problems of road transport development in Ukraine]. *Bukovynska derzhavna finansova akademiya - Bukovyna State Financial Academy*. <http://rusnauka.com>. [in Ukrainian]. Retrieved from http://rusnauka.com/16_ADEN_2010/Economics/68383.doc.htm.
3. Galena, I. I., & Pitsyk, M. G. (2021) Metod ekspluatatsionnogo upravleniya transportnoy energoeffektivnostyu avtomobilya maloy gruzopod'emnosti [Operational management method for light vehicle transport energy efficiency]. *World Science*, 1(62). [in Russian]: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7407.
4. Dzhungli nad rekoj i prizrak mashinnoj stantsii: kakie tajny hranit «kanatka» v Dnepre [Jungle over the river and the ghost of the machine station: what secrets does the “cable car” in the Dnieper keep]. *Sait «Novini Dnipra» - Website "News*

of Dnipro". Retrieved from <https://opentv.media/dzhungli-nad-rekoj-i-prizrak-mashinnoj-stantsii-kakie-tajny-hranit-kanatka-v-dnepre> [in Russian].

5. Statistika Vnutrennego transporta [Statystyka Vnutrenneho transporta]. (2020). *Sait «UNECE» - UNECE website*. <https://unece.org>. Retrieved from https://unece.org/sites/default/files/2021-05/2016106_WEB-Light.pdf [in Russian].

6. Zhuk, A.A., Kogut, V.I., & Salavor, O.M. (2016, April). Zahodi, spryamovani na rozvitok avtotransportnoyi sistemi Ukrainy [Measures aimed at the development of the motor transport system of Ukraine.]. *Materiali IV-oyi mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi Internetkonferentsiyi «Poblemi ta perspektivi rozvitku avtomobilnogo transportu», 15-16 kvitnya 2016 roku: zbirnik naukovih prats. Ministerstvo osviti i nauki Ukrainy, Vinnitskiy natsionalniy tehichniy universitet [ta insh.]. VNTU - Materials of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects of Road Transport Development", April 15-16, 2016: collection of scientific works / Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia National Technical University [etc.]*, 41-45. [in Ukrainian].

7. Zakon Ukrainy «Pro energetichnu efekktivnist» [The Law of Ukraine «On energy efficiency»]. (n.d.) zakon.rada.dov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> [in Ukrainian].

8. Kuropyatnyk, O. S. (2011). Parametrichna optimizatsiya strichkovih konveeriv za kriteriem energoefektivnosti [Parametric optimization of belt conveyors according to the criterion of energy efficiency]. *Nauka ta progres transport - Science and progress of transport*, 3(93), 50–58. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15802/stp2021/242036>.

9. Ot dlinneyshey k vyisochayshey: 10 «samyih» kanatnyh dorog v mire [From the longest to the highest: 10 "most" cable cars in the world]. *Sait «KUKU.TRAVEL» - "KUKU.TRAVEL" website*. Retrieved from <https://kuku.travel/article/ot-dlinneyshey-k-vyisochayshey-10-samyh-kanatnyx-dorog-v-mire/> [in Russian].

10. Pechenik M.V., Burian, S.O., Zemlyanukhina G.Y., & Rudnev D.V. (2021). Analiz rezhimiv roboti elektroprivoda pidvisnoyi kanatnoyi dorogi pri vikoristanni sistemi vektora keruvannya []. *Pratsi Institutu elektrodinamiki Natsionalnoi akademiyi nauk Ukrainy*, 58, 039. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.039>.

11. Raksha, S. V., Kuropyatnyk, O. S., & Krasnoshchok, O. L. (2019). Obgruntuvannya pokaznikov energoefektivnosti kanatnih dorog [Justification of the energy efficiency indicators of cable cars]. *Nauka ta progress transport - Science and progress of transport*, 6(84), 039. [in Ukrainian]. <http://stp.diit.edu.ua/article/view/195601/199667>

12. Statistika dorozhno-transportnih prigod v Ukrainy [Statistics of traffic accidents in Ukraine]. *Sait «Volynnews» - «Volyn News» website*. Retrieved from <https://www.volynnews.com/news/all/chez-viynu-kilkist-dtp-zmenshylasia-na-50-statystyka-avtopryhod-na/> [in Ukrainian].

13. Statistika pokazala padenie obshego ob'ema gruzovyih perevozok v Ukraine [Statistics showed a drop in the total volume of cargo transportation in Ukraine]. *Sait «Traffic» - «Passenger Transport» website*. [in Russian]. Retrieved from <https://traffic.od.ua/news/fleet/1232055>

14. Yatskiivsky, L.Y., & Zerkalov, D.V. (2007). Zagalniy kurs transport [General course of transport]. *Kniga 2. Navchalniy posibnik. Kyiv: Aristei - Book 2. Study guide - K., Aristeus* [in Ukrainian].

15. Krasnoshchok, O.L. (2022). Prospects for the introduction of passenger rope transport. Modern ways of solving the latest problems in science. Proceedings of the XXXVII International Scientific and Practical Conference. Varna, Bulgaria. (pp. 57-59). <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.37>.

Oleksii Kuropiatnyk ¹, Oleksandr Krasnoshchok ²

¹ Assistant professor, Applied Mechanics and Materials Science Department, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana str., Dnipro, 49010, Ukraine

² Postgraduate student, Applied Mechanics and Materials Science Department, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana str., Dnipro, 49010, Ukraine

PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF CABLE CAR TRANSPORT

Objective. The main purpose of this article is to review and analyze the possibilities of integrating cableway transport into the urban environment for unloading and redistribution of passenger flows in large cities, taking into account current issues of energy efficiency and resource conservation.

Methods. It is determined that the successful functioning of the state depends on the transport process. At the same time, road transportation is becoming increasingly important. Statistical data for 2020 and 2021 on freight and passenger transportation were used. Statistics on road accidents have been increasing in recent years. The issues of passenger and freight safety are relevant. When designing a modern alternative mode of transport, it is important to consider possible innovative solutions. One of such approaches is the position on energy efficiency and resource conservation. At the same time, energy efficiency concerns not only the engineering processes of these transport systems, but also the

operation of cable cars. An innovative solution can be rope systems in which cabins move along the carrier rope and are equipped with their own drive. **Results.** The main functions and significance of the transport system of the country, the main modes of transport, including passenger, are considered. The transport problem of large cities due to congestion of roads is determined. A review and analysis of the possibilities of integrating ropeway transport into the urban environment for unloading and redistribution of passenger flows in large cities, taking into account current issues of energy efficiency and resource conservation. The prospects for the introduction of cable transport are considered. **Scientific novelty.** The problems of transport of Ukraine are determined. Statistical data on road accidents, volumes of freight and passenger traffic are used. The proposed solution to unload the roads of large cities, in order to improve the safety of passenger traffic and environmental friendliness in transport. The scheme of self-propelled cable car with individual drive is developed. **Practical significance.** The issue of energy efficiency concerns the rational use of energy resources, which means that the use of less energy resources will reduce the cost of transportation. The use of energy efficient technologies will allow less detrimental impact on the environment, which is of great importance in a large city.

Keywords: passenger transportation; cable car; cable transport; energy efficiency; self-propelled cars; alternative transport.

Вадим Литвин,¹ Ігор Таран,² Юрій Монастирський,³ Ірина Клименко⁴

¹ Доцент, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1572-9000>.

² Професор, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3679-2519>.

³ Професор, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8282-3929>.

⁴ Доцент, Кафедра управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6263-0951>

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

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ МІСТА ПРИ ЗАПРОВАДЖЕННІ ЕКСПРЕСНОГО РЕЖИМУ РУХУ

Робота присвячена розв'язанню актуального наукового завдання щодо обґрунтування раціональних параметрів експресного режиму руху на міських автобусних маршрутах. Цей захід дозволяє скоротити витрати часу пасажирів на пересування, підвищити ступінь використання транспортних засобів, сприяє суттєвому скороченню витрат на паливо та зниженню кількості шкідливих викидів в атмосферу міста. Аналіз існуючих методів та підходів до організації експресного режиму руху автобусів у міському сполученні дозволив встановити, що вони не повною мірою враховують зацікавленості усіх учасників перевізного процесу або мають вузьку область застосування. Саме ці факти суттєво обмежують широке впровадження експресного режиму, незважаючи на його значний потенціал щодо підвищення ефективності міських пасажирських перевезень.

Встановлено умови доцільності впровадження експресного режиму руху автобусів на міських маршрутах, виходячи з параметрів пасажиропотоку. Розроблений метод формування переліку зупинних пунктів, що мають обслуговуватись автобусами, які працюють у експресному режимі руху, враховує нерівномірність пасажиропотоку та відповідно інтервалів руху автобусів протягом доби. Розроблений метод визначення раціональних параметрів експресного режиму руху на міських автобусних маршрутах, виходячи з економічних, соціальних та екологічних показників ефективності перевізного процесу враховує динамічний розподіл пасажирських кореспонденцій між звичайним та експресним маршрутом залежно від кількості автобусів і переліку зупинних пунктів експресного маршруту. Була виконана техніко-експлуатаційна оцінка запровадження експресного режиму руху автобусів на міському маршруті №70 м. Дніпро.

Ключові слова: експресний режим, пасажиропотік, маршрут, наповнення автобусів, швидкість сполучення, транспортні витрати.

Вступ. У сучасних умовах більшість значних та найважливіших міст України відчувають істотні проблеми, які пов'язані з ростом транспортних витрат населення внаслідок військової агресії російської федерації проти нашої країни. Незважаючи на певну бюджетну підтримку,

війна, що триває в країні, призводить до постійного зростання витрат на паливно-мастильні матеріали, ремонт та обслуговування транспортних засобів. Внаслідок цього ефективність роботи міського автобусного пасажирського транспорту залишається недостатньою та призводить до збитковості або низької рентабельності більшості автотранспортних підприємств. У цих складних економічних умовах основним завданням автотранспортних підприємств є виявлення таких варіантів організації перевезень на маршрутах, які призводили б до мінімальних витрат, максимальної продуктивності транспортних засобів, але разом з тим враховували б можливість перевезення пасажирів із заданими показниками якості. Одним із ефективних способів вирішення наведених вище завдань є організація на міських автобусних маршрутах експресного режиму руху. Цей захід дозволяє скоротити витрати часу пасажирів на пересування, підвищити ступінь використання автобусів і рівень транспортного обслуговування населення. Оскільки експресні автобуси мають меншу кількість зупинок на шляху прямування, вони менше здійснюють гальмувань і розгонів, що сприяє суттєвому скороченню витрат на паливно-мастильні матеріали, поточний ремонт і технічне обслуговування, а також знижує кількість шкідливих викидів в атмосферу міста [1].

Слід зауважити, що запровадження експресного режиму руху автобусів на міських маршрутах дозволяє досягти значного економічного та соціального ефекту без збільшення кількості автобусів на маршруті. Навпаки, з'являється можливість зняти з маршруту частину автобусів без погіршення якості транспортного обслуговування пасажирів [2]. Незважаючи на зазначені переваги експресний режим руху не набув широкого застосування у містах України (на відміну від країн Європейського Союзу [3-6]) в першу чергу через відсутність єдиної методології за допомогою якої можна визначити його раціональні параметри [7]. Слід також зазначити, що реорганізація режимів руху із використанням експресного сполучення визначено як невідкладний захід у Концепції розвитку наземного пасажирського транспорту м. Дніпро на 2017-2020 рр [8].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Відповідно до Закону України «Про автомобільний транспорт» перевезення пасажирів на автобусному маршруті загального користування може здійснюватися у трьох режимах руху: звичайному, експресному і режимі маршрутного таксі [9]. Нормативне визначення експресного режиму руху за [9] на завжди може врахувати всі варіанти нерівномірності пасажиропотоків на міських автобусних маршрутах. Тому багато дослідників [10-12] використовують поняття технологічного режиму руху, розподіляючи експресний режим за [9] на: експресний, напівекспресний, швидкісний та скорочений (рис. 1).

Одночасне застосування на одному маршруті декількох режимів руху автобусів утворює комбінований режим руху. Найбільш ефективним комбінованим режимом є режим руху із використанням звичайного (позупинкового) та експресного сполучення, який дозволяє збільшити швидкість сполучення, скоротити витрати часу пасажирів на пересування, підвищити ступінь використання транспортних засобів. Останній ефект призводить до зменшення собівартості перевезень та підвищення рентабельності роботи АТП.

В останні десятиріччя питанням організації раціональних режимів руху на автобусних маршрутах присвячені праці таких вітчизняних науковців Гульчак О.Д. [13], Ламбуцький М.М., Лежнева О.І. [14], Вакуленко К.Є. [15], Шпильований І.Ф., Вдовиченко В.О. [16], Біліченко В.В. [17], Яцківський Л.Ю., Кристочук М.Є та ін. Аналіз їх наукових робіт дозволив встановити, що існуючі розробки або не повною мірою враховують зацікавленості всіх учасників процесу перевезень, або мають вузьку сферу застосування. Саме ці чинники суттєво обмежують широке впровадження експресного режиму, незважаючи на його значний потенціал щодо підвищення ефективності міських пасажирських перевезень. На основі виконаного аналізу встановлена потреба у розробці методу визначення раціональних параметрів експресного режиму руху на міських автобусних маршрутах, який дозволить підвищити

енергоресурсну ефективність роботи міських автобусів, ступінь використання транспортних засобів, підвищити швидкість сполучення та скоротити витрати часу пасажирів на пересування.

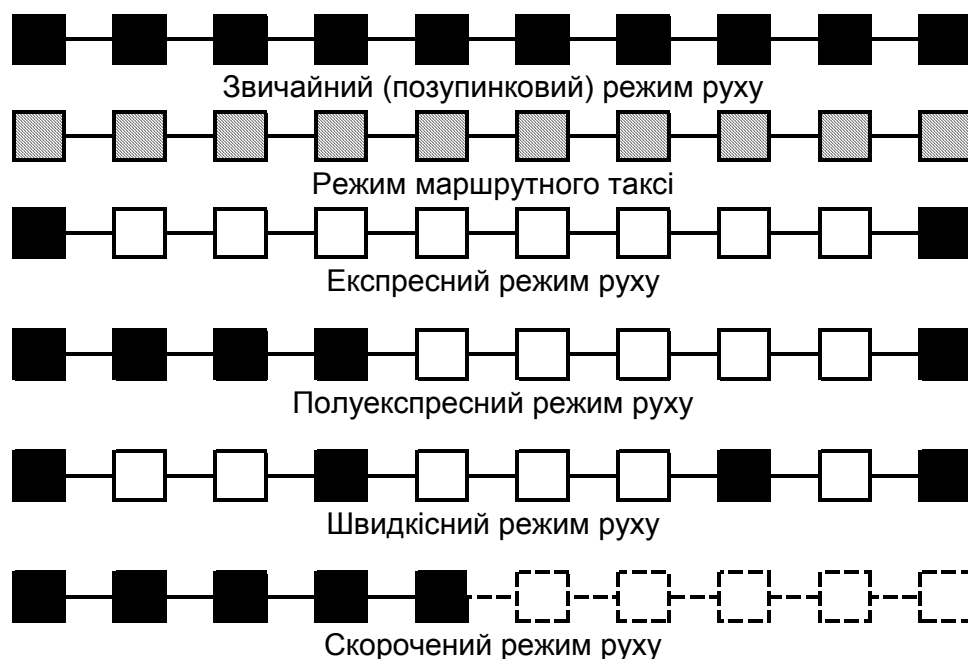


Рис. 1. Можливі технологічні режими руху на міських маршрутах [10]

У роботі [7] розроблено метод визначення раціональних параметрів експресного режиму руху на міських автобусних маршрутах, виходячи з економічних, соціальних та екологічних показників ефективності перевізного процесу, який враховує динамічний розподіл пасажирських кореспонденцій між звичайним та експресним маршрутом залежно від кількості автобусів і переліку зупинних пунктів експресного маршруту. Також була запропонована структура комплексного показника оцінки ефективності застосування експресного режиму руху, що враховує величину транспортної роботи, рівень заповнення автобусів та витрати часу пасажирів на пересування.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є отримання кількісної техніко-експлуатаційної оцінки впливу запровадження експресного режиму руху автобусів на обраному міському маршруті м. Дніпро. Для реалізації мети дослідження необхідно провести обстеження пасажиропотоків на маршруті; розрахувати техніко-експлуатаційні показники процесу перевезення пасажирів; обґрунтувати доцільність впровадження експресного режиму руху; визначити переліки зупинних пунктів, які повинні увійти до складу експресного маршруту, визначити раціональні параметри експресного маршруту; виконати техніко-експлуатаційну оцінку впливу від запровадження експресного режиму руху автобусів.

Матеріали та методи дослідження. Яко об'єкт дослідження був обраний міський маршрут №70 (ж/м Придніпровськ – пл. Старомостова). На маршруті експлуатуються 25 автобусів Богдан А092 місткістю $q_n = 46$ пасажирів у звичайному режимі. Основні характеристики маршруту №70 наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Основні характеристики маршруту №70

Найменування показника	Значення
Довжина маршруту L_m , км	20,4
Тривалість рейсу t_p , хв.	63
Швидкість сполучення V_c , км/год.	21,1
Експлуатаційна швидкість V_e , км/год.	19,4
Кількість зупинок $n_{зуп}$, од.	27
Інтервал руху автобусів I (ранкова година «пік»), хв.	5
Надана місткість на маршруті $Q_{надана}$ (ранкова година «пік»), пас.	552

Обстеження пасажиропотоків на маршруті №70 були проведені за допомогою табличного методу (із використанням програмного продукту «TransitWand» [18]) у ранкову годину «пік» для прямого (найбільш завантаженого) напрямку ж/м Придніпровськ → пл. Старомостова. На рис. 2 наведено сумісний аналіз епюри пасажиропотоків за перегонами маршруту $H_{j,j+1}$ та пасажирообміну на зупинних пунктах Q_j , який свідчить, що надана місткість на маршруті $Q_{надана}$ є достатньою для освоєння пасажиропотоків на найбільш завантаженій ділянці маршруту $Q_{надана} > H_{max}$, а пасажирообмін зупинних пунктів характеризується значною нерівномірністю.

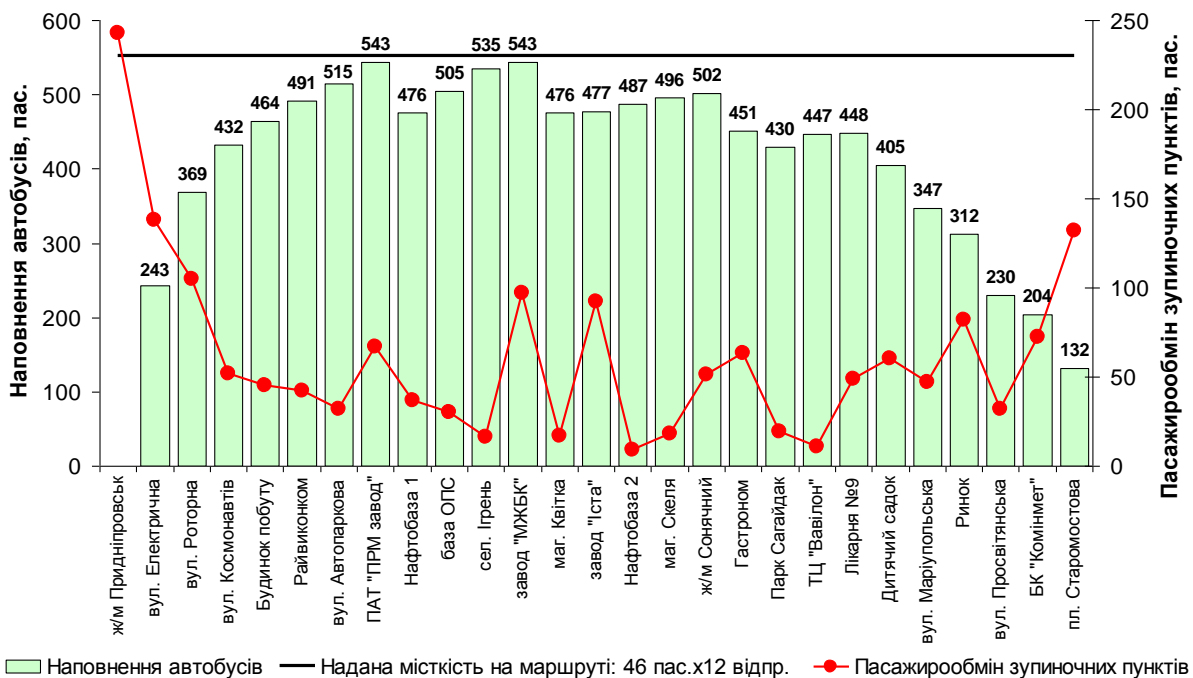


Рис. 2. Сумісний аналіз епюри пасажиропотоків та пасажирообміну на зупинних пунктах

З іншого боку випуск на маршрут такої кількості автобусів, яка забезпечує освоєння максимального пасажиропотоку лише на найбільш завантаженому перегоні маршруту, призводить до їх недовикористання на інших перегонах маршруту, що призводить до зниження коефіцієнта використання місткості автобусів, а відповідно збільшує собівартість перевезень. Структура розподілу транспортної роботи на маршруті наведена на рис. 3, аналіз якого свідчить, що на переважній більшості перегонів маршруту питома вага непродуктивної

транспортної роботи W_N (1) становить від 10 до 70%. Взагалі на маршруті потенційна транспортна робота $P_{потенційна}$ становить 11 260,8 пас·км (2), а фактична $P_{фактична}$ (за результатами обстеження) – 8 789,6 пас·км. Таким чином, W_N дорівнює 2 471,2 пас·км., що становить 23% від $P_{потенційна}$, що суттєво знижує ефективність роботи автобусів.

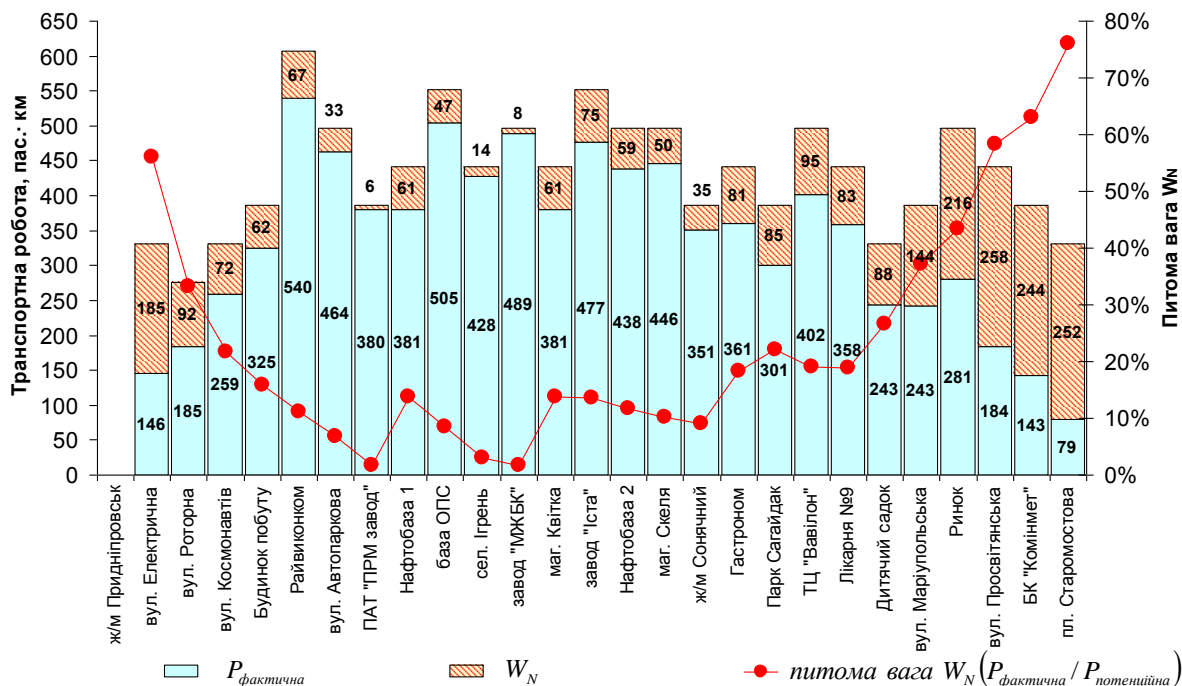


Рис. 3. Структура розподілу транспортної роботи на маршруті №70

$$W_N = P_{потенційна} - P_{фактична}, \tag{1}$$

$$P_{потенційна} = q_n \cdot L_m \cdot \psi; \tag{2}$$

Але, зменшення кількості автобусів на маршруті призведе до понад нормованого наповнення транспортних засобів і навіть до відмови пасажирів у посадці, що призведе до зниження якості транспортного обслуговування. Таким чином виникає потреба у запровадженні на маршруті №70 комбінованого режиму руху із експресним сполученням, який дозволить вивільнити частину транспортних засобів (за рахунок збільшення їх провізної здатності) та зменшити загальні витрати пасажирів на поїздку (за рахунок збільшення швидкості сполучення автобусів).

Також за результатами проведеного обстеження було встановлено, що: величина максимального пасажиропотоку на маршруті становить $H_{max} = 543$ пас.; середнього пасажиропотоку – $H_{сер} = 421,5$ пас.; середня довжина поїздки пасажирів – $l_{сер} = 10,6$ км; коефіцієнт змінюваності пасажирів – $\eta_{зм} = 1,92$. Розраховані за (3-4) значення нормованих коефіцієнтів змінності $k_{зм}$ та нерівномірності пасажиропотоків на ділянках маршруту $k_{дil}$ (які визначають умови організації відповідних режимів руху на автобусних маршрутах [2]) становлять 0,52 та 0,77 відповідно, що підтверджує доцільність запровадження на маршруті №70 комбінованого режиму із експресним сполученням (рис. 4).

$$k_{зм} = \frac{1}{\eta_{зм}} = \frac{1}{1,92} = 0,52; \quad (3)$$

$$k_{оіі} = \frac{1}{\eta_{оіі}} = \frac{H_{сер}}{H_{max}} = \frac{421,5}{543} = 0,78. \quad (4)$$



Рис. 4. Умови доцільності організації режимів руху на автобусних маршрутах [2]

На підставі запропонованого у роботі [1] методу визначення зупинних пунктів, що мають обслуговуватись автобусами з експресним режимом руху, який, на відміну від існуючих, враховує зміну інтервалів руху автобусів протягом доби (5-7) було сформовано три варіанти експресного маршруту, який складається із $Z_1 = 8$, $Z_2 = 13$ та $Z_3 = 16$ зупинок (рис. 5):

- $Z_1(F_j/Q_j < I)$ – 8 зупинних пунктів:
 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 12 \rightarrow 14 \rightarrow 24 \rightarrow 26 \rightarrow 27;$
- $Z_2(F_j/Q_j < 1,5I)$ – 13 зупинних пунктів:
 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 14 \rightarrow 18 \rightarrow 22 \rightarrow 24 \rightarrow 23 \rightarrow 25 \rightarrow 26 \rightarrow 27;$
- $Z_3(F_j/Q_j < 2I)$ – 16 зупинних пунктів:
 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 12 \rightarrow 14 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 21 \rightarrow 22 \rightarrow 24 \rightarrow 23 \rightarrow 25 \rightarrow 26 \rightarrow 27.$

$$Z_1 \in \left(\frac{F_j}{Q_j} < I \right); \quad (5)$$

$$Z_2 \in \left(\frac{F_j}{Q_j} < 1,5I \right); \quad (6)$$

$$Z_3 \in \left(\frac{F_j}{Q_j} < 2I \right), \quad (7)$$

де F_j – кількість пасажирів, які проїжджають повз j -ї зупинки, пас.:

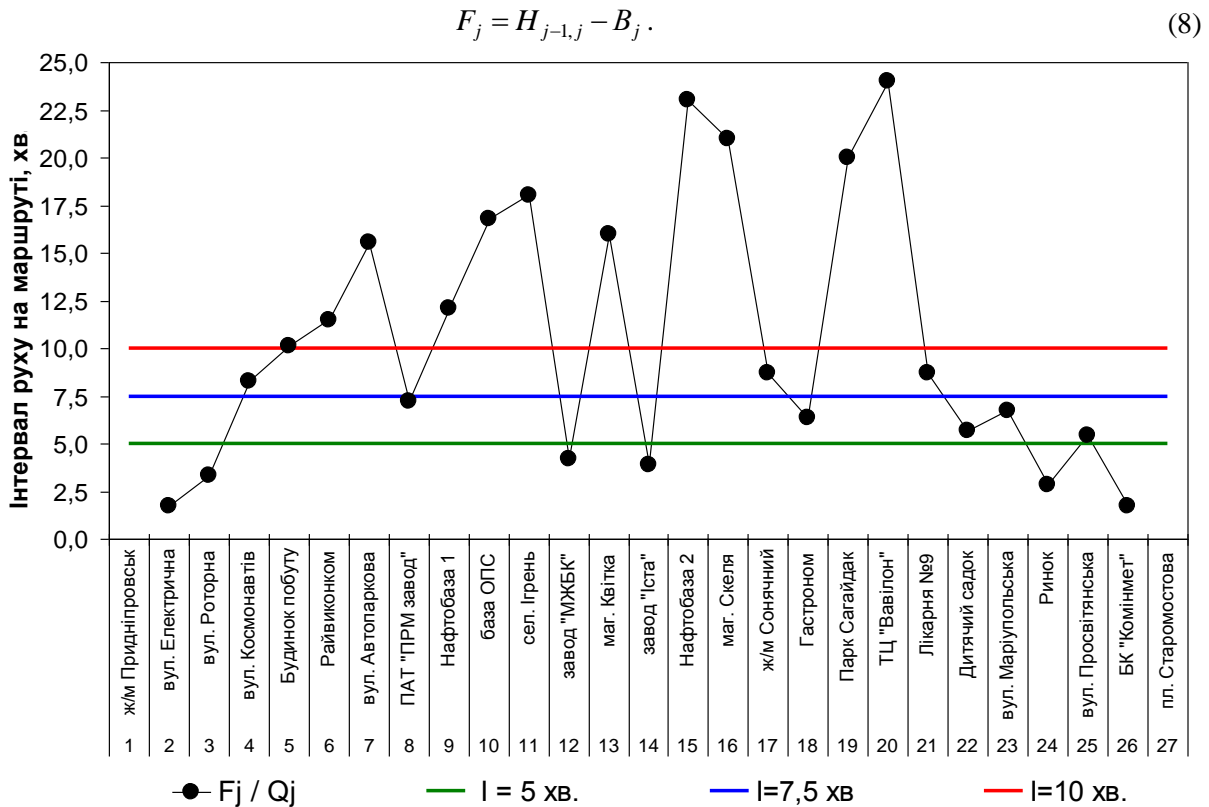


Рис. 5. Визначення варіантів експресного маршруту

У роботі [7] був запропонований метод визначення раціональних параметрів експресного режиму руху на міських автобусних маршрутах, що враховує динамічний розподіл пасажирських кореспонденцій між звичайним та експресним маршрутом залежно від кількості автобусів і переліку зупинних пунктів експресного маршруту. Сутність визначення раціональних параметрів такого режиму полягає в математичному моделюванні процесу перевезень на маршруті, у результаті якого розраховуються складові моделі (9) та (10) для визначених за (5-7) комбінацій зупинних пунктів експресного маршруту і кількості автобусів, які працюють у звичайному (A^{3B}) та експресному режимах (A^E). Надалі на підставі сформованого критерію обираються такі параметри роботи маршруту, які характеризуються максимальною ефективністю та якістю перевезень.

$$W_N \rightarrow \min; W_N \geq 0; A_{нісля} < A_{до} = \sum A_i; \gamma_i \in [\gamma_{\min} \dots \gamma_{\max}]. \quad (9)$$

$$\sum T \rightarrow \min; A_{до} = A_{нісля} = \sum A_i; A_{\min}^{3B} = t_{об}^{3B} / I_{\max}^{доп}. \quad (10)$$

де $A_{до}$, $A_{нісля}$ – загальна кількість автобусів на маршруті, що працюють до та після впровадження експресного режиму руху відповідно;

A_i – кількість автобусів, які працюють у i -му режимі руху;

$\sum T$ – сумарні витрати часу пасажирів на пересування по маршруту, год.;

A_{\min}^{3B} – мінімально допустима кількість автобусів, які працюють у звичайному режимі за умови не перевищення максимально допустимого інтервалу руху;

$t_{об}^{3B}$ – тривалість оберту автобусів, які працюють у звичайному режимі, хв.;

$I_{max}^{дон}$ – максимально допустимий інтервал руху автобусів, хв.; γ_i – коефіцієнт використання місткості автобусів, які працюють у i -му режимі руху, а $[\gamma_{min} \dots \gamma_{max}]$ його мінімальне та максимальне значення відповідно до умов економічної доцільності та базових вимог щодо якості перевезень пасажирів.

Відповідно до обмеження стосовно неперевищення максимально допустимого інтервалу руху звичайними автобусами, моделювання необхідно здійснювати для декількох груп даних, у кожній з яких:

$$\begin{cases} A^{3B} = const \in [A_{min}^{3B}; A-1]; \\ A^E \in var[1; A-A^{3B}]. \end{cases} \quad (11)$$

Змінюючи комбінацію зупинних пунктів експресного маршруту Z_i та кількість автобусів, які працюють у звичайному A^{3B} та експресному A^E режимах, можна отримати множини значень W_N , яка була обрана як головний критерій ефективності перевезень:

$$\left| \begin{array}{l} W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B}, A^E = 1), \dots W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B}, A^E = A - A^{3B}) \\ W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B} + 1, A^E = 1), \dots W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B} + 1, A^E = A - A^{3B}) \\ W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B} + 2, A^E = 1), \dots W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B} + 2, A^E = A - A^{3B}) \\ W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B} + 3, A^E = 1), \dots W_N^{Z_i}(A^{3B} = A_{min}^{3B} + 3, A^E = A - A^{3B}) \\ \dots \\ W_N^{Z_i}(A^{3B} = A - 1, A^E = 1), \dots W_N^{Z_i}(A^{3B} = A - 1, A^E = A - A^{3B}) \end{array} \right|. \quad (12)$$

Враховуючи, що на маршруті №70 експлуатується 25 автобусів, а $A_{min}^{3B} = 6$, то за прийнятими умовами моделювання було розраховано по 190 варіантів організації комбінованого режиму для кожного Z_i , а загальна їх кількість (з урахуванням Z_1, Z_2 та Z_3) становила 570 варіантів.

Надалі з множини $W_N = f(Z_i, A_i^{3B}, A_i^E)$ за умов $A_i^{3B} = const$ та $Z_i = const$ для подальшого дослідження обирається один варіант, який забезпечує $W_N \rightarrow \min$ при $W_N \geq 0$. Для комплексної оцінки отриманих i -х варіантів комбінованого режиму з експресним сполученням запропоновано використовувати критерій, який додатково враховує якість перевезення: $\gamma_i^E < 1,5$; $\gamma_i^{3B} < 1,5$; $\sum T \rightarrow \min$; та додатковий економічний ефект, який буде спостерігатися у випадку мінімальної різниці в умовах роботи обох режимів і прагнення коефіцієнтів використання місткості автобусів до $\gamma^{3B} \rightarrow 1$ та $\gamma^E \rightarrow 1$:

$$K_i^{компл} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } K_i(\gamma) = 0 \\ K_i(W_N) + K_i(\gamma) + K_i(\sum T), & \text{якщо } K_i(\gamma) > 0 \end{cases} \rightarrow \min, \quad (13)$$

де $K_i(W_N)$ – показник, який враховує зменшення W_N ;

$K_i(\gamma)$ – показник, який враховує наповнення автобусів;

$K_i(\sum T)$ – показник, який враховує зменшення загальних витрат часу пасажирів на пересування.

Розрахункові залежності складових критерію (13) наведені у роботах [1-2, 7]. Розроблений алгоритм методу визначення раціональних параметрів експресного режиму руху наведений на рис. 6.

За результатами виконаного математичного моделювання було встановлено, що максимальна ефективність процесу перевезення пасажирів на маршруті №70 може бути досягнута при таких двох варіантах комбінованого режиму з експресним сполученням: $(Z_1 = 8, A^{3B} = 12, A^E = 6)$ та $(Z_2 = 13, A^{3B} = 8, A^E = 10)$. Це дозволить вивільнити 7 автобусів, на 89% скоротити W_N , зменшити загальні витрати пасажирів на пересування на 6%, підвищити швидкість сполучення та коефіцієнт використання місткості автобусів сполучення на 15 і 24% відповідно. Комплексна оцінка параметрів експресного режиму руху автобусів на маршруті №70 з позиції технологічної ефективності перевезень наведена у таблиці 2. Враховуючи, що комбіновані режими, які досліджувалися, утворюються поєднанням звичайного та експресного сполучення, загальні ТЕП по маршруту були розраховані, як середньозважені значення відповідно до кількості звичайних та експресних рейсів:

$$TEП = \frac{TEП^{3B} \cdot \psi^{3B} + TEП^E \cdot \psi^E}{\psi^{3B} + \psi^E} \quad (14)$$

Аналіз інформації, яка наведена у таблиці 2 свідчить, що обидва запропонованих варіанти дозволяють суттєво підвищити ефективність процесу перевезень на маршруті №70 (рис. 7).

Таким чином, до основних переваг від впровадження комбінованого режиму із експресним сполученням на маршруті №70 слід віднести: можливість вивільнення 7 одиниць автобусів (28%), підвищення швидкості сполучення на 15%, коефіцієнту використання місткості автобусів на 24% та їх годинної продуктивності на 35%; зменшення тривалості рейсу на 10%, загального пробігу на 17%, що дозволить (з урахуванням менших витрат палива автобусів, які працюють у експресному режимі) скоротити загальні експлуатаційні витрати палива на 25%.

Але, вивільнення частини автобусів на маршруті № 70 призведе і до певних негативних явищ, а саме: збільшення інтервалу руху на 20% та зменшення наданої місткості на 17%, що вплине на якість перевезення пасажирів. Надамо оцінку таких наслідків. До впровадження комбінованих режимів інтервал руху на маршруті становив 5 хвилин, а після – 6 хвилин, що можна вважати припустимим та типовим для більшості міських автобусних маршрутів.

Щодо дослідження ймовірності відмови пасажирам у посадці через понаднормативне наповнення транспортних засобів в роботі [7] були побудовані епюри пасажиропотоків за перегонами маршруту для звичайних та експресних автобусів на обох комбінованих режимах, що аналізуються. Аналіз виконаних розрахунків свідчить, на деяких перегонах маршруту спостерігається перевищення номінальної місткості автобусів (переважно на тих, які працюють у звичайному режимі) на 10-25%. Таке понаднормативне наповнення транспортних засобів не перевищує прийнятий норматив у 8 пасажирів на 1 м² вільної площі салону і, відповідно, не призведе до відмов пасажирам у посадці на зупинних пунктах маршруту та вважається припустимим з точки якості перевезень у ранкову годину «пік» [10, 12].

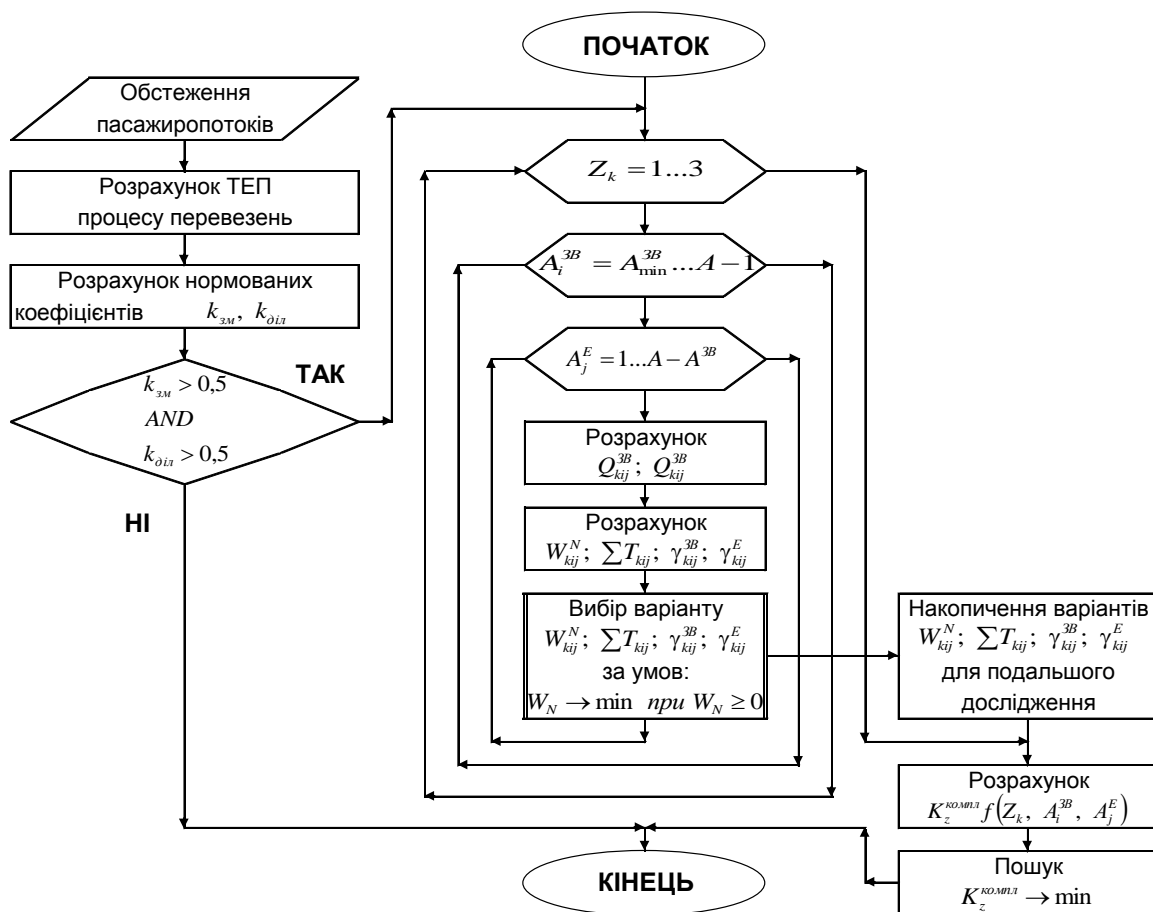


Рис. 6. Алгоритм методу визначення раціональних параметрів експресного режиму руху

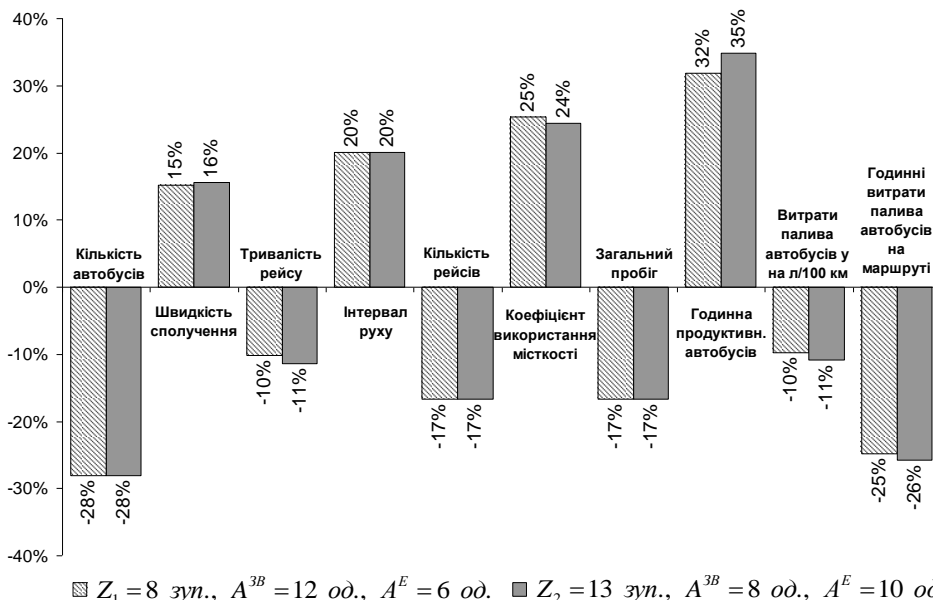


Рис. 7. Аналіз ефективності варіантів комбінованого режиму на маршруті

Таблиця 2. Оцінка параметрів експресного режиму руху автобусів на маршруті з позиції технологічної ефективності перевезень

Назва показника	Діюча технологія	Комбінований режим №1		Відносне відхилення	Комбінований режим №2		Відносне відхилення
		$Z_1 = 8, A^{3B} = 12, A^E = 6$			$Z_2 = 13, A^{3B} = 8, A^E = 10$		
	Режим руху	ЗВ	Е	Режим руху	ЗВ	Е	
Довжина маршруту, км	20,4	20,4	20,4	0,0%	20,4	20,4	0,0%
Кількість автобусів, од.	25	12	6	-28,0%	8	10	-28,0%
Кількість зупинок, од.	27	27	8	-28,1%	27	13	-31,1%
Середня довжина перегону, км	0,78	0,78	2,91	109,2%	0,78	1,70	70,8%
Швидкість сполучення, км/год.	21,1	21,1	29,1	15,2%	21,1	26,6	15,6%
Експлуатаційна швидкість, км/год.	19,4	19,4	26,0	13,6%	19,4	24,0	14,2%
Тривалість рейсу, хв.	63	63	47	-10,2%	63	51	-11,4%
Тривалість обороту, хв.	126	126	94	-10,2%	126	102	-11,4%
Інтервал руху, хв.	5	10	15	20,0%	15	10	20,0%
Кількість відправлень, од.	12	6	4	-16,7%	4	6	-16,7%
Надана місткість, пас.	552	276	184	-16,7%	184	276	-16,7%
Кількість перевезених пасажирів, пас.	829	585	244	0,0%	386	443	0,0%
Непродуктивна транспортна робота, пас.·км	2 471,2	62,6	154,1	-91,2%	1,3	244,0	-90,1%
Коефіцієнт використання місткості автобусів	0,78	0,99	0,96	25,4%	1,00	0,95	24,4%
Загальний пробіг автобусів, км	244,8	122,4	81,6	-16,7%	81,6	122,4	-16,7%
Годинна продуктивність автобусів, пас./год.	66	93	78	31,8%	92	87	34,8%
Витрати палива, л/100 км	26,24	26,24	19,83	-9,8%	26,24	21,5	-10,8%
Годинні витрати палива, л/год.	64,24	32,12	16,18	-24,8%	21,41	26,32	-25,7%

Висновки. Одним із ефективних способів підвищення ефективності роботи транспортних засобів та якості обслуговування пасажирів є організація на міських автобусних маршрутах експресного режиму руху. Цей захід дозволяє скоротити витрати часу пасажирів на пересування, підвищити ступінь використання автобусів і рівень транспортного обслуговування населення без збільшення кількості автобусів. Метою роботи є отримання кількісної техніко-експлуатаційної оцінки впливу запровадження експресного режиму руху автобусів на обраному міському маршруті м. Дніпро.

Як об'єкт дослідження був обраний міський маршрут №70 (ж/м Придніпровськ – пл. Старомостова), на якому експлуатуються у звичайному режимі 25 автобусів Богдан А092 місткістю 46 пасажирів. За результатами обстеження пасажиропотоків було встановлено, що на переважній більшості перегонів маршруту питома вага непродуктивної транспортної роботи становить від 10 до 70% (в середньому по маршруту 23%), що суттєво знижує ефективність роботи автобусів. Розраховані значення нормованих коефіцієнтів змінності та нерівномірності пасажиропотоків на ділянках маршруту (які визначають умови організації відповідних режимів руху на автобусних маршрутах) становлять 0,52 та 0,77 відповідно, що підтверджує доцільність запровадження на маршруті №70 комбінованого режиму із експресним сполученням.

Було сформовано три варіанти експресного маршруту, який складається із $Z_1=8$, $Z_1=13$ та $Z_1=16$ зупинок. За результатами виконаного математичного моделювання було встановлено, що максимальна ефективність процесу перевезення пасажирів на маршруті №70 може бути досягнута при таких двох варіантах комбінованого режиму з експресним сполученням: ($Z_1=8$, $A^{3B}=12$, $A^E=6$) та ($Z_2=13$, $A^{3B}=8$, $A^E=10$). Це дозволить вивільнити 7 одиниць автобусів (28%), підвищити швидкість сполучення на 15%, коефіцієнт використання місткості автобусів на 24% та їх годинної продуктивності на 35%; зменшити тривалість рейсу на 10%; загальний пробіг автобусів на 17%, що дозволить (з урахуванням менших витрат палива автобусів, які працюють у експресному режимі) скоротити загальні експлуатаційні витрати палива на 25%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Таран І.О., Литвин В.В. Методика розрахунку та оцінка ефективності комбінованого режиму руху на міському автобусному маршруті. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2019. Вип. 85. С. 93–106.
2. Taran I., Lytvyn V. Determination of rational parameters for urban bus route with combined operating mode. *Transport Problems*, 2018. Vol. 13(4). P. 157–171.
3. Bus Rapid Transit. Vol. 1: Case Studies in Bus Rapid Transit: Transportation research board. Washington, 2003. 62 p.
4. Buses with High Level of Service. Fundamental characteristics and recommendations for decision-making and research. Results from European cities. European cooperation in science and technology, 2011. 180 p.
5. Mesjasz-Lech A. Development of public transport in the city – a challenge for urban logistics in terms of sustainable development. *Forum Scientiae Economic*, 2014. Vol. 2, № 4. P. 63–75.
6. Paulley N. The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Transport Policy*, 2006. Vol. 13. No. 4. P. 295–306.
7. Литвин В.В. Обґрунтування раціональних параметрів експресного режиму руху на міських автобусних маршрутах: дис. канд. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2021. 247 с.
8. Концепція розвитку наземного пасажирського транспорту м. Дніпро на 2017-2020 роки. URL: <https://www.dropbox.com/s/qbhbgepusn9v151/SolutDocument72677.pdf?dl=0>.
9. Про автомобільний транспорт: Закон України від 23.02.2006 р. № 3492-IV. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3492-15#Text>.
10. Вакуленко К. С., Доля К. В. Управління міським пасажирським транспортом: навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 257 с.
11. Доля В. К. Пасажирські перевезення: підручник. Харків: Форт, 2011. 504 с.
12. Організація та управління пасажирськими перевезеннями: підручник / Маруніч В. С. та ін.; за ред. Л. Г. Шморгуна. Київ.: Міленіум, 2017. 528 с.
13. Гульчак О. Д. Підвищення ефективності міських пасажирських перевезень на основі удосконалення організації руху автобусів: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2005. 19 с.
14. Лежнева О. І. Рациональна організація руху на маршрутах міського пасажирського транспорту. *Вісник ХПІ*. Харків, 2014. Вип. 17. С. 37–42.
15. Вакуленко К. С., Фалецька Г. І. Вибір режиму руху автобусів у міському сполученні. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, 2014. №. 148(1). С. 176–181.
16. Вдовиченко В. О., Воликов В. В. Оцінка доцільності впровадження швидкісного пасажирського сполучення другого рівня у місті Харків. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*, 2018. Вип. 140. С. 69–75.
17. Біліченко В. В., Цимбал С. В., Мирниція А. В. Вдосконалення міських пасажирських перевезень шляхом застосування експресного режиму руху. *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. Луцьк, 2014. Вип. 46. С. 38–42.
18. Литвин В. В., Сердюк К. С. Застосування програмного продукту «TransitWand» для зниження трудомісткості проведення та автоматизації обробки результатів обстеження пасажиропотоків. *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2017: збірник наукових трудів конференції*, м. Дніпро 13–14 квітня 2017 р. Дніпро, 2017. С. 199–209.

REFERENCES

1. Taran, I. O., & Lytvyn V. V. (2019). Metodyka rozrakhunku ta otsinka efektyvnosti kombinovanoho rezhymu rukhu na miskomu avtobusnomu marshruti. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universytetu*, 85, 93–106.
2. Taran I., & Lytvyn V. (2018). Determination of rational parameters for urban bus route with combined operating mode. *Transport Problems*, 13(4), 157–171.
3. Bus Rapid Transit.(2003). Vol. 1: Case Studies in Bus Rapid Transit: Transportation research board. Washington.
4. Buses with High Level of Service. (2011). Fundamental characteristics and recommendations for decision-making and research. Results from European cities. European cooperation in science and technology.
5. Mesjasz-Lech, A. (2014). Development of public transport in the city – a challenge for urban logistics in terms of sustainable development. *Forum Scientiae Economic*, 2(4), 63–75.
6. Paulley, N. (2006). The demand for public transport: The effects of fares, quality of service, income and car ownership. *Transport Policy*, 13(4), 295-306.
7. Lytvyn ,V.V. (2021). Obgruntuvannya ratsionalnykh parametriv ekspresnogo rezhymu rukhu na miskykh avtobusnykh marshrutakh [Justification of the rational parameters of the express traffic mode on city bus routes]. *Candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
8. Kontsepsiia rozvytku nazemnogo pasazhyrskoho transportu m. Dnipro na 2017-2020 roky [The concept of the development of ground passenger transport in the city of Dnipro for 2017-2020] [in Ukrainian]. URL: <https://www.dropbox.com/s/qbhbgepusn9yl5l/SolutDocument72677.pdf?dl=0>.
9. Pro avtomobilnyi transport [About road transport]. (2006). *Zakon Ukrainy vid 23.02.2006 r. № 3492-IV - Law of Ukraine dated February 23, 2006 No. 3492-IV* [in Ukrainian]. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3492-15#Text>.
10. Vakulenko K. Ye., & Dolia K. V. (2015). Upravlinnia miskym pasazhyrskym transportom. Navch. posibnyk. [Management of urban passenger transport. Training manual]. Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova - Kharkiv: KhNUMH named after O. M. Beketova [in Ukrainian].
11. Dolia, V. K. (2011). Pasazhyrski perevezennia: pidruchnyk [Passenger transportation: textbook]. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
12. Orhanizatsiia ta upravlinnia pasazhyrskymy perevezenniamy: pidruchnyk / Marunych V. S. ta in.; za red. L. H. Shmorhuna [Organization and management of passenger transportation: textbook / V. S. Marunych et al.; under the editorship L. G. Shmorgun] Kyiv. Milenium [in Ukrainian].
13. Hulchak, O. D. (2005). Pidvyshchennia efektyvnosti miskykh pasazhyrskykh perevezen na osnovi udoskonalennia orhanizatsii rukhu avtobusiv [Increasing the efficiency of urban passenger transportation based on improving the organization of bus traffic]: *Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
14. Lezhneva, O. I. (2014). Ratsionalna orhanizatsiia rukhu na marshrutakh miskoho pasazhyrskoho transport [Rational organization of traffic on urban passenger transport routes]. *Visnyk KhPI - KhPI Bulletin*. Kharkiv, 17, 37–42.
15. Vakulenko, K. Ye., & Faletska H. I. (2014). Vybir rezhymu rukhu avtobusiv u miskomu spoluchenni [The choice of the mode of operation of buses in city traffic]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu - Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 148 (1), 176–181 [in Ukrainian].
16. Vdovychenko V. O., & Volikov V. V. (2018). Otsinka dotsilnosti vprovadzhennia shvydkisnogo pasazhyrskoho spoluchennia druhoho rivnia u misti Kharkiv [Evaluation of the feasibility of implementing high-speed passenger transport of the second level in the city of Kharkiv]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriya: Tekhnichni nauky ta arkhitektura - Communal management of cities. Series: Technical sciences and architecture*, 140, 69–75 [in Ukrainian].
17. Bilichenko V. V., Tsymbal S. V., & Myrnytsia A. V. (2014). Vdoskonalennia miskykh pasazhyrskykh perevezen shliakhom zastosuvannia ekspresnogo rezhymu rukhu [Вдосконалення міських пасажирських перевезень шляхом застосування експресного режиму руху]. *Mizhvuzivnyi zbirnyk «NAUKOVI NOTATKY» - Interuniversity collection «SCIENTIFIC NOTES»*. Lutsk, 46, 38–42 [in Ukrainian].
18. Lytvyn V. V., & Serdiuk K. S. (2017, April). Zastosuvannia prohramnogo produktu «TransitWand» dlia znyzhennia trudomistkosti provedennia ta avtomatyzatsii obrobky rezultativ obstezhennia pasazhyropotokiv [The application of the software product "TransitWand" to reduce the complexity of conducting and automating the processing of the results of passenger flow surveys]. *Suchasni innovatsiini tekhnologii pidhotovky inzhenernykh kadriv dlia hirnychoi promyslovosti i transportu 2017: zbirnyk naukovykh trudiv konferentsii, Dnipro 13–14 kvitnia 2017 - Modern innovative technologies for training engineering personnel for the mining industry and transport 2017: collection of scientific papers of the conference, Dnipro*. (April 13–14, 2017). (pp. 199–209). Dnipro [in Ukrainian].

*Vadim Litvin*¹, *Igor Taran*², *Yuriy Monastyrskiy*³, *Iryna Klymenko*^{4*}

¹Associate professor, Transport Management Department, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine

²Professor, Transport Management Department, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine

³Professor, Transport Management Department, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine

⁴Associate professor, Transport Management Department, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49005, Ukraine

ASSESSMENT THE EFFICIENCY OF CITY'S LOGISTICS SYSTEM BY TRAFFIC EXPRESS MODE IMPLEMENTATION

The paper deals with the topical scientific task concerning substantiation of rational parameters of express mode of transportation in terms of city bus routes. That helps reduce passengers' time spent for travelling, increase a degree of use of transportation modes as well as favour significant cost reduction for fuel and decrease the amount of harmful emissions in the urban atmosphere. Analysis of the available methods and approaches to the organization of express mode of bus traffic in terms of local routes has helped identified that they do not consider to the full extent the interests of all the traffic participants or have narrow range of application. Those are the facts that limit considerably wide implementation of express mode irrespective of its great potential as for increasing the efficiency of local passenger transportation. Conditions of expedient implementation of express mode of transportation for buses on local routes have been identified basing on the parameters of passenger flow. The developed method of the formation of a list of stops to be serviced by buses operating in the express mode, takes into consideration the irregular nature of passenger flow and intervals of daily bus traffic respectively. Basing on the economic, social, and environmental indices of efficiency of a transportation process, the developed method of identifying rational parameters of express mode of traffic on local bus routes considers dynamic distribution of passenger correspondences between the standard and express route depending on the number of buses and a list of express route stops. A technical and operational assessment of the implementation of the express mode of bus traffic on city route #70 in Dnipro was performed.

Keywords: *express mode, passenger flow, route, bus capacity, connection speed, transportation costs.*

¹ Доцент кафедри «Програмне забезпечення комп'ютерних систем», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

* Автор, відповідальний за листування: inna.saiapina@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ РЕЛЯЦІЙНОЇ БАЗИ ДАНИХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Інформатизація суспільства ставить нові виклики та вимоги перед інформаційними системами на транспорті, що відповідають за обробку та зберігання даних. Значна кількість проблем продуктивності розроблених додатків пов'язана з базами даних, бо часто низька продуктивність бази даних безпосередньо впливає на уповільнення роботи програми. Для нормального функціонування процесів діагностики рухомого складу та систем автоматизації, прийняття рішень, формування звітів у транспортній галузі постає задача оптимізації управління базами даних та забезпечення їх продуктивності за умови одночасного багатокористувацького доступу. У статті розглянуті етапи виконання запиту та підходи щодо підвищення ефективності роботи оптимізатора запитів. Проаналізовані основні фактори, від яких залежить продуктивність виконання запитів у інформаційних системах на основі реляційних баз даних. До критеріїв оптимізації можна віднести такі оцінки продуктивності, як час, необхідний на генерацію звіту, час виконання запитів, швидкість знаходження даних у полях без індексування, максимальна кількість одночасних звернень до даних при багатокористувацькому режимі, швидкість індексування, а також операції оновлення, видалення та додавання.

Ключові слова: реляційні бази даних, інформаційні системи, оптимізація запитів, системи управління базами даних, SQL.

Вступ. Щороку кількість інформації, яку виробляє людство, невпинно зростає. Це ставить нові виклики та вимоги перед системами, що відповідають за обробку та зберігання інформації. Транспортна галузь не є винятком і потребує оптимізації систем зберігання та обробки різних видів даних відповідно до викликів, що постають із ростом інформатизації суспільства. Як приклад можна навести інформаційні системи, що відповідають за продаж білетів, автоматизацію обліку пасажирських перевезень чи вантажів, які функціонують на основі відповідних баз даних.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. База даних – це колекція логічно пов'язаних даних та їх описів, призначених для задоволення інформаційних потреб організації (БД). Програмна система, яка дозволяє користувачам визначати, створювати, підтримувати дані та керувати доступом до бази даних, називається системою управління базами даних (СУБД) [1]. Відповідно до даних статистики, станом на 2020 рік 70% ринку займають продукти реляційних СУБД, у той час як на нереляційні СУБД відводиться 30%.

Популярність реляційних СУБД значною мірою викликана їх надійністю та підтримкою принципів ACID. Але слід зазначити, що через те, що вони віддають перевагу підтримці узгодженості, а не доступності та продуктивності, це ускладнює горизонтальне масштабування

таких систем [2]. У результаті були розроблені нові СУБД, де послаблені деякі обмеження щодо узгодженості задля забезпечення кращої масштабованості і продуктивності. Було запроваджено багато нових технологій, включаючи сховища з широким стовпчиком, наприклад Google Bigtable, Apache Cassandra [3], Apache HBase; сховища ключ-значення Amazon DynamoDB [4], LevelDB і RocksDB; документоорієнтовані сховища AsterixDB [5], ArangoDB і MongoDB [6, 7, 8]; колонкоорієнтовані сховища, наприклад, Apache Druid і ClickHouse [9]; графові сховища, наприклад Neo4j.

У роботі [10] наведений приклад проектування бази даних опрацювання параметрів пасажиропотоків громадського транспорту для вдосконалення транспортної системи міста. У дослідженні [11] автори наводять приклад бази даних міського транспорту Китаю для обробки даних міського транспорту, управління та оцінки ефективності його роботи.

Великі і складні міжнародні проекти з розробки, проектування та будування транспортних систем, транспортних засобів та їх частин проходять стадії комп'ютерного моделювання, що ставить необхідність зберігання великих обсягів даних. При цьому застосовуються нові перспективні технології, що вимагають обробки та зберігання об'ємних даних. Наприклад, технологія цифрового двійника, що представляє собою цифрову модель фізичного об'єкта чи процесу та динамічно відображає його характеристики протягом певного обсягу часу [12].

У роботах [13, 14] наведено, як створення бази даних параметрів засобів транспорту та проведений на її основі інтелектуальний аналіз дозволяє вдосконалити характеристики роботи транспортної системи.

У статті [15] наводиться аналіз, що 71% проблем продуктивності додатків пов'язані з базами даних, бо часто низька продуктивність бази даних безпосередньо впливає на уповільнення роботи програми. Оптимізацію баз даних пропонується розділити на дві основні категорії: оптимізацію на основі фізичної реалізації та оптимізацію на основі параметрів конфігурації.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз засобів підвищення продуктивності роботи реляційних баз даних та способів оптимізації запитів.

Матеріали та методи дослідження. Основна взаємодія користувача з реляційними СУБД відбувається за допомогою SQL (Structured Query Language) – мови структурованих запитів. Запит – це мовний вираз, що описує дані, які підлягають вибірці із бази даних. Процес виконання запитів складається з декількох етапів (рис. 1).

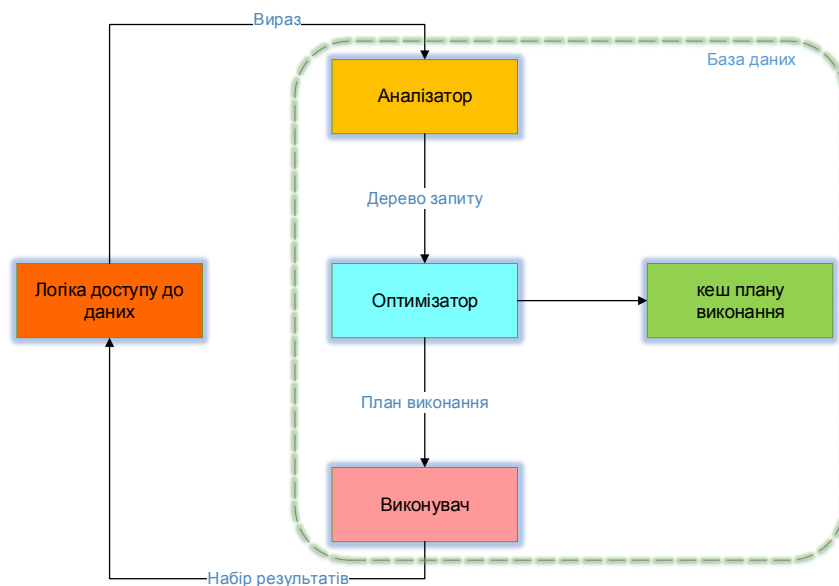


Рис. 1. Схема виконання запиту SQL

При виконанні запиту, СУБД повинна виконати такі кроки:

1. СУБД аналізує (синтаксично перевіряє) код SQL запиту. Далі зв'язує таблиці та стовпці, до яких звертається запит, у попередню конструкцію (дерево) перед виконанням.

2. Зв'язання таблиць та стовпців у дерево. Ця зв'язана конструкція передається компілятору, який перетворює SQL-код на виконавчий машинний код.

3. Створюється виконавчий файл, що передається оптимізатору. Код ще повинен пройти через оптимізатор. Оптимізатор – це шар програмного забезпечення у складі СУБД. Він аналізує, що у результаті запиту потрібно отримати, та розраховує оптимальний план виконання.

4. Обчислення оптимізатором плану виконання. При цьому оптимізатор аналізує, які таблиці та колонки потрібні та як їх найефективніше дістати. Оптимізатор призначений для пошуку найшвидшого та найефективнішого вирішення виконання запиту.

5. СУБД реалізує план виконання.

Завдання оптимізації полягає у забезпеченні максимальної пропускної спроможності при заданій кількості ресурсів, або забезпеченні мінімального споживання ресурсів при цій пропускній спроможності. Вартість, що підлягає мінімізації, складається з таких складових: час використання ресурсів процесора, вартість використання центрального процесора та доступу до вторинної пам'яті, вартість зберігання та вартість комунікацій, що включає у себе вартість затримок у обробці. До критеріїв оптимізації можна віднести такі оцінки продуктивності, як час, необхідний на генерацію звіту, час виконання запитів, швидкість знаходження даних у полях без індексування, максимальна кількість одночасних звернень до даних при багатокористувацькому режимі, швидкість індексування, а також операцій оновлення, видалення та додавання.

Слід зазначити, що у централізованих БД переважає вартісний компонент часу доступу до вторинної пам'яті та використання центрального процесора у разі складних запитів. Для географічно розподілених СУБД зростає вартісний компонент комунікаційних затримок. У локально-розподілених СУБД всі компоненти мають рівний вплив, що ускладнює розрахування оціночної функції при оптимізації.

Ключовим завданням оптимізації запитів є пошук оптимального порядку виконання операцій з'єднання на основі витрат. Через існування великої кількості можливих дерев об'єднання для певного запиту, витрати на алгоритм перерахування об'єднань для кожного дійсного дерева об'єднань мають бути мінімальними.

На продуктивність виконання запитів значною мірою впливає нестача допоміжних індексів. У цьому випадку СУБД доводиться проводити повне сканування таблиці, що вимагає додаткового процесорного часу, тому є менш ефективним. Ще однією проблемою є неузгодженість типів даних, що об'єднуються. У цьому випадку оптимізатор втрачає можливість ефективно приєднувати стовпці та таблиці через необхідність попереднього перетворення всіх значень.

Оптимізатор обчислює вартості запропонованих планів, генерує їх та обирає план з найменшою вартістю, тобто який найшвидше виконуватиметься при використанні найменшої кількості ресурсів.

Авторами роботи [16] експериментально досліджено, що оптимізація запитів є важливою для ефективної для обробки запитів і що із збільшенням кількості приєднань (JOIN) помилки оцінювання вартості планів виконання запитів у системах реляційних баз даних швидко зростають.

Також слід зазначити, що у виконанні запиту беруть участь різні структури пам'яті комп'ютера, які мають дуже різну швидкість звернення процесора до даних (рис. 2). Для порівняння відносні швидкості звернення до регістрів процесору вимірюються у наносекундах, до пам'яті – у мікросекундах, а до диску – у мілісекундах. Тобто, сервер може виконати мільйон циклів процесора за час, потрібний для виконання одного дискового введення-виведення.

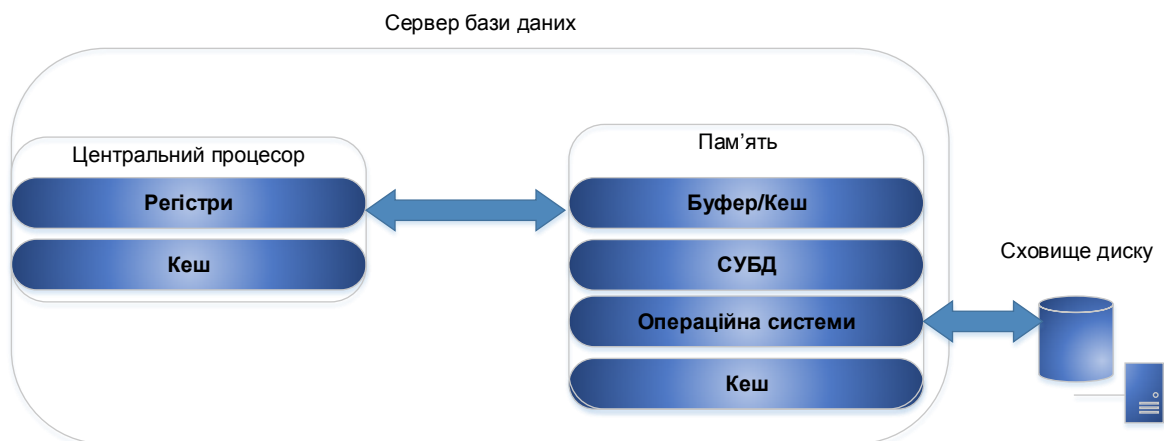


Рис. 2. Зберігання даних у інформаційній системі

За результатами проведеного аналізу для оптимізації виконання запитів БД пропонуються такі рекомендації:

1. Мінімізація процесів дискового введення-виведення для підвищення швидкості виконання запитів;
2. Створення індексації параметрів, що підлягають частим запитам;
3. Зазначення у запиті конкретних полів SELECT, замість SELECT * для уникнення залучення додаткових ресурсів БД;
4. Для фільтрації даних надання переваги оператору WHERE замість HAVING, який виконується пізніше відповідно до порядку виконання та не використовує переваги індексації у разі їх наявності, як це робить WHERE;
5. Обмеження необхідної кількості рядків результатів запиту за допомогою LIMIT, що дозволить зменшити обчислювальну потужність, необхідну для виконання;
6. Заміна підзапитів об'єднанням, що потребує менше процесорного часу на виконання;
7. Оптимізація порядку прямування операцій JOIN при мультиоб'єднаннях, наприклад, завдяки застосуванню існуючих бенчмарків [16].

Висновки. У зв'язку з суттєвим збільшенням інформації все більш актуальним стає питання зберігання та обробки великих масивів даних. Для нормального функціонування процесів діагностики рухомого складу та систем автоматизації, прийняття рішень, формування звітів у транспортній галузі постає задача оптимізації управління базами даних та забезпечення їх продуктивності за умови одночасного багатокористувацького доступу. У статті проведено аналіз основних факторів, що впливають на продуктивність, швидкість та ефективність роботи реляційних баз даних. Розглянуто процес оптимізації виконання запитів, особлива увага при цьому приділена можливості зменшення необхідної обчислювальної потужності. Запропоновані відповідні рекомендації для користувачів інформаційної системи з метою оптимізації та пришвидшення роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. B. Shah, P. M. Jat, and K. Sashidhar. Performance Study of Time Series Databases. arXiv preprint arXiv:2208.13982.2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.13982>.
2. Mostafa J., Wehbi S., Chilingaryan S., Kopmann A. SciTS: A Benchmark for Time-Series Database in Scientific Experiments and Industrial Internet of Things. 34th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM 2022), July 6–8, 2022, Copenhagen, Denmark. ACM, New York, NY, USA, 2022. 1-11 pages. <https://doi.org/10.1145/3538712.3538723>.
3. Chebotko A., Kashlev A., Lu S. A big data modeling methodology for Apache Cassandra. 2015 IEEE International Congress on Big Data. IEEE, New York, NY, USA, 2015. P. 238–245. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2015.41>.

4. Sivasubramanian S. (2012, May). Amazon dynamoDB: a seamlessly scalable non-relational database service. *Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (Scottsdale, Arizona, USA) (SIGMOD'12)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2012. P. 729–730. <https://doi.org/10.1145/2213836.2213945>.
5. Alsubaiee S., Altowim Y., Altwaijry H., Behm A., Borkar V., Bu Y., Carey M., Cetindil I., Cheelangi M., Faraaz K., Gabrielova E., Grover R., Heilbron Z., Kim Y.-S., Li C., Li G., Ok J. M., Onose N., Pirzadeh P., Tsostras V., Vernica R., Wen J., Westmann, T. *Proc. VLDB Endow*, 2014. P. 1905–1916. <https://doi.org/10.14778/2733085.2733096>.
6. Chickerur S., Goudar A., & Kinnerkar A. Comparison of Relational Database with Document-Oriented Database (MongoDB) for Big Data Applications. 2015 8th International Conference on Advanced Software Engineering and Its Applications (ASEA). IEEE, New York, NY, USA, 2015. P. 41–47. <https://doi.org/10.1109/ASEA.2015.19>.
7. Chickerur S., Goudar A., Kinnerkar A. Comparison of relational database with document-oriented database (mongodb) for big data applications. 2015 8th International Conference on Database Theory and Application (DTA). IEEE, New York, NY, USA, 2015. P. 14–17. <https://doi.org/10.1109/DTA.2015.14>.
8. Kang Y. S., Park I. H., Rhee J., Lee Y. H. MongoDBBased Repository Design for IoT-Generated RFID/Sensor Big Data. *IEEE Sensors Journal*, 2016. Vol. 16(2). P. 485–497. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2483499>.
9. Imasheva B., Azamat N., Sidelkovskiy A., Sidelkovskaya A. The practice of moving to big data on the case of the nosql database, clickhouse. Springer, Cham./Editors - Hoai An Le Thi, Hoai Minh Le, & Tao Pham Dinh. Springer International Publishing, Cham, 2020. P. 820–828. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4_113.
10. Борейко О. Ю. Розроблення бази даних для автоматизованої системи опрацювання параметрів пасажиропотоків громадського транспорту. Моделювання та інформаційні технології, 2018. Вип. 82. С. 177-184. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtit_2018_82_26.
11. Jiang T., Wu Z., Song Y., Liu X., Liu H., Zhang H. (2013). Sustainable transport data collection and application: china urban transport database. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. Vol. 2013. P. 1-10. <https://doi.org/10.1155/2013/879752>
12. Liu M., Fang S., Dong H., Xu C. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021. Vol 58. P. 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>.
13. Саяпіна І.О., Горобченко О.М., Демченко В.О., Штомпель Ю.М. Моделювання та інтелектуальний аналіз параметрів тонального рейкового кола. Збірник наукових праць ДУІТ серія «Транспортні системи і технології». К.: ДУІТ, 2022, Вип. 39. С. 167-174. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-16>
14. Саяпіна І.О. Застосування методу класифікації даних та нейронних мереж для підвищення завадостійкості рейкового кола. Збірник наукових праць ДУІТ серія «Транспортні системи і технології». К.: ДУІТ, 2022. Вип. 39, С. 266-277. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-26>
15. Samson S., Aponso A. An Analysis on Automatic Performance Optimization in Database Management Systems. 2020 World Conference on Computing and Communication Technologies (WCCCT), 2020. P. 6-9. <https://doi.org/10.1109/WCCCT49810.2020.9169995>.
16. V Leis, V., Gubichev, A., Mirchev, A., Boncz, P., Kemper, A., & Neumann, T. How good are query optimizers, really? *Proc. VLDB Endow*, 2015, Vol. 9(3). P. 204–215. <https://doi.org/10.14778/2850583.2850594>.

REFERENCES

1. Shah, B., Jat, P. M., & Sashidhar, K. (2022). Performance Study of Time Series Databases. *arXiv preprint arXiv:2208.13982*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.13982>.
2. Mostafa, J., Wehbi, S., Chilingaryan, S., & Kopmann, A. (2022, July) SciTS: A Benchmark for Time-Series Databases in Scientific Experiments and Industrial Internet of Things. *34th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM 2022)*. (6–8 July, 2022). (pp. 1-11). Copenhagen, Denmark. ACM, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3538712.3538723>.
3. Chebotko A., Kashlev A., & Lu, S. (2015, June). A big data modeling methodology for Apache Cassandra. In *2015 IEEE International Congress on Big Data*. (pp. 238-245). IEEE., New York, NY, USA, 2015. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2015.41>
4. Sivasubramanian, S. (2012, May). Amazon dynamoDB: a seamlessly scalable non-relational database service. In *Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. (pp. 729-730). <https://doi.org/10.1145/2213836.2213945>.
5. Alsubaiee, S., Altowim, Y., Altwaijry, H., Behm, A., Borkar, V., Bu, Y., Carey, M., Cetindil, I., Cheelangi, M., Faraaz, K., Gabrielova, E., Grover, R., Heilbron, Z., Kim, Y.-S., Li, C., Li, G., Ok, J. M., Onose, N., Pirzadeh, P., Tsostras, V., Vernica, R., Wen, J., & Westmann, T. (2014). AsterixDB: A Scalable, Open Source BDMS. *Proc. VLDB Endow*, 1905–1916. <https://doi.org/10.14778/2733085.2733096>.
6. Chickerur, S., Goudar, A., & Kinnerkar, A. (2015, November). Comparison of relational database with document-oriented database (mongodb) for big data applications. In *2015 8th International Conference on Advanced Software Engineering & Its Applications (ASEA)*. (pp. 41-47). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ASEA.2015.19>

7. Jung, M. G., Youn, S. A., Bae, J., & Choi, Y. L. (2015, November). A study on data input and output performance comparison of mongodb and postgresql in the big data environment. In *2015 8th international conference on database theory and application (DTA)*. (pp. 14-17). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DTA.2015.14>.
8. Kang, Y. S., Park, I. H., Rhee, J., & Lee, Y. H. (2015). MongoDB-based repository design for IoT-generated RFID/sensor big data. *IEEE Sensors Journal*, 16(2), 485-497. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2483499>
9. Imasheva, B., Azamat, N., Sidelkovskiy, A., & Sidelkovskaya, A. (2019, July). The practice of moving to big data on the case of the nosql database, clickhouse. In *World Congress on Global Optimization* (pp. 820-828). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21803-4_113.
10. Борејко О. Ю. (2018) Rozroblennia bazy danykh dlia avtomatyzovanoi systemy opratsiuvannia parametriv pasazhyropotokiv hromadskoho transportu [Modeling and information technologies]. *Modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii - Modeling and information technologies*, 82, 177-184. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtit_2018_82_26.
11. Jiang, T., Wu, Z., Song, Y., Liu, X., Liu, H., & Zhang, H. (2013). Sustainable transport data collection and application: china urban transport database. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2013/879752>
12. Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>.
13. Саяпіна І.О., Горобченко О.М., Демченко В.О., Штомпель Ю.М. (2022) Modeliuvannia ta intelektualnyi analiz parametriv tonalnoho reikovooho kola [Modeling and intellectual analysis of the parameters of the tonal rail circuit]. // Zbirnyk naukovykh prats DUIT serii «Transportni systemy i tekhnolohii». K.: DUIT - Collection of scientific works DUIT series «Transport systems and technologies». K.: DUIT, 2022, 39, 167-174 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-16>.
14. Саяпіна І.О. (2022) Zastosuvannia metodu klasyfikatsii danykh ta neironnykh merezh dlia pidvyshchennia zavodostiikosti reikovooho kola [Application of the method of data classification and neural networks to increase the interference resistance of the rail circuit]// Zbirnyk naukovykh prats DUIT serii «Transportni systemy i tekhnolohii». K.: DUIT - Collection of scientific works DUIT series «Transport systems and technologies». K.: DUIT, 2022, 39, 266-277 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-26>.
15. Samson, S., & Aponso, A. (2020, May). An Analysis on Automatic Performance Optimization in Database Management Systems. In *2020 World Conference on Computing and Communication Technologies (WCCCT)* (pp. 6-9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCCCT49810.2020.9169995>.
16. Leis, V., Gubichev, A., Mirchev, A., Boncz, P., Kemper, A., & Neumann, T. (2015). How good are query optimizers, really?. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 9(3), 204-215. <https://doi.org/10.14778/2850583.2850594>.

Inna Saiapina¹

¹ Associate Professor, Department of Computer Systems Software, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

RELATIONAL DATABASE WORK OPTIMIZATION OF THE TRANSPORT INFORMATION SYSTEM

Informatization of society poses new challenges and requirements for information systems in transport, which are responsible for data processing and storage. A significant number of performance problems in developed applications are related to databases, because often poor database performance directly affects the application's slowdown. For the normal functioning of the processes of diagnostics of rolling stock and automation systems, decision-making, and the formation of reports in the transport industry, the task of optimizing the management of databases and ensuring their productivity under the condition of simultaneous multi-user access arises. The article discusses the stages of query execution and approaches to increasing the efficiency of the query optimizer. The main factors that depend on the performance of queries in information systems based on relational databases are analyzed. Optimization criteria can include such performance estimates as time required to generate a report, query execution time, speed of finding data in non-indexed fields, maximum number of simultaneous accesses to data in multi-user mode, speed of indexing, as well as update, delete and add operations.

Keywords: relational databases, information systems, query optimization, database management systems, SQL.

ЗМІСТ

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Фолін О.В., Ловська А.О.</i> Дослідження навантаженості несучої конструкції вагона-хопера двосекційного при перевезенні залізничним поромом	5
<i>Дорошенко О. Ю.</i> Розробка принципів модифікації базальтового волокна з метою підвищення його ефективності	14
<i>Сулим А. О., Сафронов О. М., Хозя П. О., Стринжа А.М.</i> Обґрунтування необхідності створення спеціалізованого вагона для перевезення залізничних окатишів	23
<i>Калабухін Ю. Є., Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Мартинов С. І.</i> До питання визначення ефективності модернізації електропоїздів	35
<i>Рябов Є. С., Овер'янова Л. В., Яқунін Д. І., Білоконь І. М., Гулак С.О.</i> Застосування маневрових електровозів для передатної та вивізної роботи	47
<i>Зуб Є.П., Сапронова С.Ю.</i> Вплив відхилень положення колісних пар вантажного вагона на спрямовуючі зусилля	63
<i>Лаврич Ю.М., Плаксін С.В., Погоріла Л.М.</i> Концептуальні основи побудови вантажної магнітолевітаційної транспортної системи	78
<i>Dmytrychenko M., Kulbovskyi I., Tkachenko V., Holub H.</i> Metrological aspects of ensuring measurements in railway rolling stock projects	94
<i>Ловська А. О., Равлюк В. Г.</i> Виявлення причин утворення поверхневих дефектів коліс вагонів, обладнаних композиційними колодками	102
<i>Демченко В.О., Демченко О.В.</i> Аналіз досліджень впливу параметрів поверхні колеса та значення твердості на взаємодію з колією	121
<i>Радкевич М.М.</i> Вплив навколишнього середовища на несучі конструкції пасажирських вагонів	131
<i>Сулим А. О., Орлов О. В.</i> Дослідження міцності довгобазного вагона-платформи шляхом проведення вібраційних випробувань	139

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<i>Тараненко С. В., Голубєва С.М.</i> Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів	149
<i>Голота О. О., Плаксін С. В., Шкіль Ю. В.</i> Визначення координат просторової орієнтації магнітоплану відносно колійної структури	159
<i>Кириллова О. В., Кириллова В.Ю.</i> Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів	170
<i>Kovalchuk V.</i> Analytical and numerical simulation for the force of adhesion of reinforcing rod with concrete	190

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

<i>Nesterenko H., Muzykin M., Strelko O., Shcherbyna R., Pavlenko O.</i> Ways to increase railway competitiveness	198
<i>Потман Н.В.</i> Формування раціональної маршрутної мережі доставки тарно-штучних вантажів	209
<i>Нолуб Н., Tkachuk M., Melenchuk V., Lushchai Yu.</i> A system model of decision-making transportation process management in transport infrastructure projects	219
<i>Коскіна Ю. О., Дрожжин О. Л.</i> Дослідження обробки інтермодальних транспортних одиниць в концепції «SINGLE WINDOW»	227
<i>Куроп'ятник О. С., Краснощок О. Л.</i> Перспективи впровадження канатного транспорту	237
<i>Литвин В.В., Таран І.О., Монастирський Ю.А., Клименко І.Ю.</i> Техніка ефективності логістичної системи міста при запровадженні експресного режиму руху	247

ІНФОРМАЦІЙНІ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Саяпіна І.О.</i> Оптимізація роботи реляційної бази даних інформаційної системи на транспорті	261
--	------------

Наукове видання
Scientific 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 40

Issue 40

Відповідальний за випуск *I. О. Саяніна*

Підписано до видання: 30.12.2022.
Ум. друк. арк. 20,01. Обл.-вид. арк. 15,7.
Наклад 50 прим. Зам. № 2211-09/22.

Надруковано в друкарні редакційно-видавничого відділу
Державного університету інфраструктури та технологій.
Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 6148 від 18.04.2018.
03049, м. Київ-49, вул. І. Огієнка, 19.
<https://tst.duit.in.ua/>