

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

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

СЕРІЯ

**«ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ
І ТЕХНОЛОГІЇ»**

ВИПУСК 37

Київ·ДУІТ·2021

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

**STATE UNIVERSITY OF INFRASTRUCTURE
AND TECHNOLOGIES**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
PAPERS**

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

SERIES

«TRANSPORT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES»

ISSUE 37

Kyiv·SUIT·2021

УДК 656:62

Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 37. К.: ДУІТ, 2021. 206 с. DOI:10.32703/2617-9040-2021-37

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". № 37. K.: SUIT, 2021. 206 p. DOI:10.32703/2617-9040-2021-37

ISSN 2617-9040

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

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

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

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

Редакційна колегія:

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

Н.С. Брайковська, кандидат технічних наук, професор, ректор Державного університету інфраструктури та технологій (заступник головного редактора);

В.М. Твердомед, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Залізнична колія та колійне господарство» (заступник головного редактора);

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

П. О. Скок, кандидат наук з державного управління, доцент, проректор з наукової роботи Державного університету інфраструктури та технологій;

Е.І. Даніленко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», 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», 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», академік ТAU, академік Міжнародної академії життєдіяльності;

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

Л.І. Тимченко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Телекомунікаційні технології та автоматика»;

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

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

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

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

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

О.Г. Стрелко, доктор історичних наук, професор, професор кафедри «Управління процесами перевезень»;

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

В.І. Мацюк, кандидат технічних наук, професор, доцент кафедри «Управління процесами перевезень»;

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

А.І. Кириченко, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Управління процесами перевезень»;

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

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

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

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

А.В. Прохорченко, доктор технічних наук, доцент, 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;

М.І. Горбунов, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля;

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

С. Андонова (S. Andonova), Assoc. Prof. Eng., PhD, завідувач кафедри «Машинобудівна техніка і технології», Південно-Західний університет "Неофіт Рилські" (Болгарія);

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

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

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

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

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

І.О. Саяніна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Телекомунікаційні технології та автоматика» (технічний секретар).

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою ДУІТ (протокол № 10 від 27 травня 2021 р.).

Recommended for publication by the Academic Council of DUIT (Minutes № 10 of May 27, 2021).

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

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

Збірник внесено до Переліку наукових фахових видань України,
в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора 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.

Фомін Олексій Вікторович^{1*}, Кара Сергій Віталійович², Прокопенко Павло Миколайович³, Туровець Дмитро Андрійович⁴

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>

²Начальник управління інжинірингу, філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця», вул. І. Федорова 39, м. Київ, 03038, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0401-6547>

³Аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-6590>

⁴Інженер 1 категорії науково-дослідного відділу динаміки і міцності, філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця», вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2405-4065>

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

ВИПРОБУВАННЯ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Безпека руху є найважливішою вимогою до роботи залізниць. З метою забезпечення безперебійних перевезень пасажирів і вантажів залізницями підприємством АТ «Українська залізниця», актуальною залишається завдання щодо забезпечення експлуатації рухомого складу поза призначеного строку служби. Виходячи з цього, впливає необхідність проведення випробувань, спрямованих на створення умов по експлуатації рухомого складу зі збереженням динамічних і міцнісних характеристик. В даній статті наведені порядок, обсяг і отримані результати випробувань на міцність та опір втомі рухомого складу після тривалої експлуатації на прикладі спеціального рухомого складу, а саме автодрезини типу АС1а. Отримано результати максимальних рівнів напруг, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнти запасу опору втомі, залежність рівня напружень від швидкості руху. За результатами досліджень розроблено технічне рішення, що дозволяє методами технічного діагностування проводити продовження терміну служби автодрезин типу АС1а після завершення призначеного терміну служби.

Ключові слова: рухомий склад, несучі конструкції, автодрезини, випробування, міцність, опір втомі, термін служби.

Вступ. З метою забезпечення виконання підприємствами АТ «Українська залізниця» вантажних і пасажирських перевезень, актуальним завданням є продовження строку служби та забезпечення безпечної експлуатації рухомого складу, в тому числі спеціального рухомого складу.

Об'єктом досліджень обрана автодрезина типу АС1а, яка використовується Ніжинською дистанцією сигналізації і зв'язку (ШЧ-11) регіональної філії «Південно-Західна залізниця» АТ «Українська залізниця» (рис. 1), з вичерпаним призначеним строком служби.



Рис. 1. Об'єкт випробувань – автодрезина АС1а

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. На сьогоднішній день проблеми безпеки руху та визначення ресурсу несучих конструкцій рухомого складу, в тому числі спеціального рухомого складу, присвячена значна кількість наукових робіт.

Дослідження, викладені в матеріалі [1] описують сучасний стан, проблеми та їх вирішення, а також способи та методи продовження терміну служби рухомого складу. В роботі [2] проведено дослідження несучих конструкцій від роботи з вантажами, як основного чинника навантажень для кранів на залізничному ході. В роботі [3] дослідження спеціальних вагонів розширені ударними випробуваннями для обліку навантажень при роботі в складі поїздів. У роботах [4, 5] проведено дослідження найбільш близьких по особливостям експлуатації до АС1а автомотрис, але недостатньо уваги приділено статичним напруженням від власної ваги.

З урахуванням вищезазначеного можна зробити висновок, що результати аналізу інформаційних джерел з досліджуваного питання свідчать про недостатню кількість методичних та практичних матеріалів для визначення всіх необхідних показників для подальшого продовження терміну служби несучих металевих конструкцій автомотрис типу АС1а.

В даній статті проведено теоретичні та практичні дослідження з оцінки та аналізу міцності автомотрис АС1а, визначення коефіцієнта запасу опору втомі, що в свою чергу дасть можливість подальшого продовження терміну служби несучих металевих конструкцій автомотрис АС1а, визначити безпечні швидкості руху.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – опис практичних методів проведення випробувань на міцність і дослідження напружено-деформованого стану. В рамках даного дослідження встановлюються показники міцності і опору втомі. При цьому основними факторами, які впливають на коефіцієнт запасу опору втомі, є:

вертикальні і поздовжні зусилля, які залежать від власної ваги і корисного вантажу рухомого складу, динамічних якостей, особливостей конструкції, інтенсивності експлуатації;

матеріал, з якого виготовлена рама, з урахуванням його деградації після тривалої експлуатації;

технічний стан рухомого складу.

Для досягнення поставленої мети були визначені і вирішені наступні завдання:

аналіз раніше проведених досліджень в області випробувань рухомого складу, в т.ч. спеціального;

аналіз нормативної бази з випробувань рухомого складу;
розробка, узгодження програми та методики проведення випробувань;
проведення випробувань і оцінка результатів;
розробка технічного рішення для подальшого технічного діагностування і продовження терміну служби випробуваного типу рухомого складу.

Матеріали і методи дослідження. Ходові міцнісні випробування проводять шляхом реєстрації процесів в контрольних точках деталей рами кузова під час дослідницьких поїздок в діапазоні експлуатаційних швидкостей, якщо це не загрожує безпеці руху. За результатами вимірювань виконують розрахунки, оцінюють коефіцієнт запасу опору втомі.

Реєстрація вимірюваних процесів ходових випробувань на міцність проводиться на прямих і кривих ділянках колії, стрілочних переводах у всьому діапазоні допустимих експлуатаційних швидкостей.

Ходові міцнісні випробування проводять під час поїздок в реальних умовах експлуатації з реєстрацією динамічних процесів і деформацій в контрольних точках.

В процесі ходових випробувань на міцність автотрис АС1а вимірюються, аналізуються та оцінюються такі величини і показники:

напруги в поздовжньому напрямку на нижній полиці балки рами кузова між кронштейном кріплення ресорного підвішування і щелепою буксового вузла;

напруги в поздовжньому напрямку на нижній полиці балки по центру рами кузова;

напруги в поздовжньому напрямку на нижній полиці балки рами кузова біля кронштейна кріплення ресорного підвішування;

швидкість руху.

Місця установки тензодатчиків при ходових випробуваннях наведені на рис. 2.

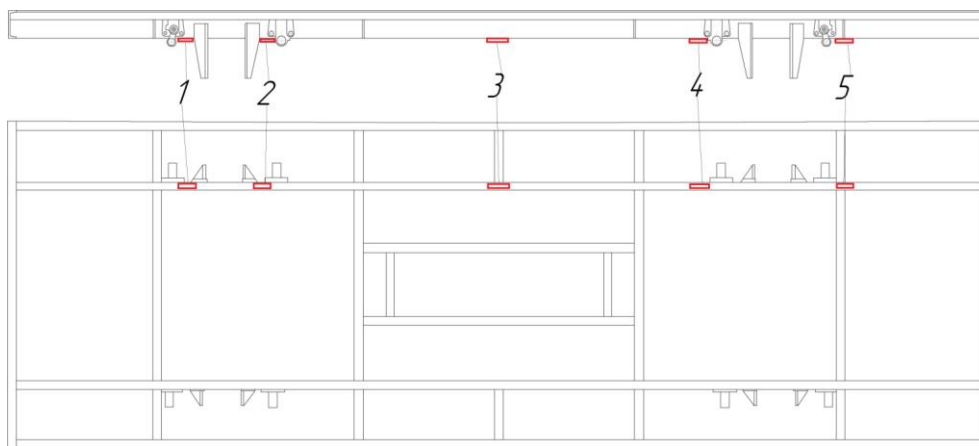


Рис. 2. Схематичне позначення місць установки тензорезисторів на несучих конструкціях рами кузова автодрезини АС1а

Результати досліджень. Обробка даних ходових випробувань на міцність автотриси передбачає розшифровку, ідентифікацію та систематизацію параметрів зареєстрованих процесів що викликають динамічні напруги. Частота опитування тензорезисторів при знятті показань становить 400 Гц.

Дослідні дані групуються за діапазонами швидкостей руху (10-20 км/год.) і по ділянках шляху (пряма, крива, стрілки й ін.). Результати визначення напружень в несучих конструкціях під час проведення ходових міцнісних випробувань, наведені в таблиці 1, де СКО – середньоквадратичне відхилення.

Допустимі напруження матеріалу несучих конструкцій автотрис АС1а прийнято $0,9\sigma_T = 221$ МПа.

Приймаючи максимальний коефіцієнт динаміки для дослідних місць $K_D = 0,4$, статичні навантаження оцінені і приведені в таблиці 2. Максимальні експлуатаційні навантаження в місцях установки тензорезисторів оцінено як суму статичних і динамічних напружень.

Таблиця 1. Результати визначення рівнів напруг за результатами ходових міцнісних випробувань

Ка-нал	Діапазон швидкостей, км/год													
	10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70		70-80	
	Макс	СКО	Макс	СКО	Макс	СКО	Макс	СКО	Макс	СКО	Макс	СКО	Макс	СКО
	Напруження, МПа													
1	12,05	2,54	13,28	3,20	12,84	3,73	12,13	3,96	10,61	3,77	12,32	4,35	16,79	5,31
2	22,69	3,66	18,87	4,25	17,21	4,83	17,67	5,08	16,01	4,99	19,20	5,78	26,79	7,39
3	8,40	1,05	7,26	1,05	6,82	1,10	7,74	1,19	7,96	1,19	6,82	1,28	6,06	1,66
4	5,86	1,17	5,80	1,26	6,04	1,35	5,62	1,47	5,23	1,44	6,65	1,85	8,57	2,61
5	5,45	1,31	7,95	1,68	7,80	1,75	7,93	1,84	7,38	1,89	8,33	2,16	10,82	2,91

Таблиця 2. Результати визначення напружень несучих конструкцій автотрис АС1а

№ каналу	Максимальні динамічні напруження, МПа	Максимальні статичні напруження, МПа	Максимальні сумарні напруження, МПа
1	16,79	41,975	58,765
2	26,79	66,975	93,765
3	8,4	21	29,4
4	8,57	21,425	29,995
5	10,82	27,05	37,87

За результатами досліджень напружено-деформованого стану встановлено, що напруження в несучих металевих конструкціях автодрезин типу АС1А не перевищують допустимих. При цьому встановлено значне підвищення рівня напружень в рамі автодрезини АС1а на швидкостях 70-80 км/год в порівнянні з рівнем напружень на швидкостях до 70 км/год.

На основі отриманих значень напружень (таблиця 2), проведено розрахунок опору втомі несучих конструкцій автотрис.

Оцінку опору втомі розраховано за формулою:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma} \sigma_V + \psi \sigma_m} > [n] \quad (1)$$

де σ_{-1} – середнє значення границі витривалості стандартного зразка при симетричному циклі навантажені, приймаємо $\sigma_{-1} = 190$ МПа;

K_{σ} – коефіцієнт, що характеризує пониження границі витривалості конструкції по відношенню до границі витривалості стандартного зразка;

σ_V – амплітуда напружень циклу;

σ_m – середнє напруження циклу;

ψ – коефіцієнт, що характеризує вплив асиметрії циклу, $\psi = 0,3$;

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомі.

Значення коефіцієнта, що характеризує пониження границі витривалості визначається за формулою:

$$K_{\sigma} = \frac{K_1 \cdot K_2}{\gamma \cdot m} \cdot \beta_K \quad (2)$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує вплив неоднорідності матеріалу деталі, для прокату $K_1 = 1,1$;

K_2 – коефіцієнт, що враховує вплив внутрішніх напружень в деталі, $K_2 = 1$;

m – коефіцієнт, що враховує стан поверхні деталі, $m = 0,9$;

γ – коефіцієнт, що враховує вплив розмірного фактору, $\gamma = 0,5$;

β_K – ефективний коефіцієнт концентрації напружень у вузлах складної форми.

Значення коефіцієнтів опору втомі для зон 1 – 5 автомотриси АС1а, приведено в таблиці 3.

Допустиме значення коефіцієнта запасу опору втомі $[n] = 1,4$.

По результатам роботи, враховуючи [7-10] розроблено Технічне рішення [11].

Таблиця 3. Значення коефіцієнтів запасу опору втомі досліджуваних зон автодрезини АС1а

№ каналу	Параметри оцінки опору втомі					[n]
	K_{σ}	σ_v	ψ	σ_m	n	
1	5,62	15,93	0,3	41,975	1,66	1,4
2	5,62	22,17	0,3	66,975	1,2	
2*	5,62	17,34	0,3	66,975	1,44*	
3	5,62	4,98	0,3	21	>2	
4	5,62	7,83	0,3	21,425	>2	
5	5,62	8,73	0,3	27,05	>2	

*при обмеженні швидкості на рівні 70 км/год.

Дана публікація зроблена в рамках проекту: "Розробка концептуальних основ для відновлення ефективного функціонування застарілих вантажних вагонів (Development of conceptual frameworks for restoring the efficient operation of obsolete freight cars)" (реєстраційний номер проекту: 2020.02 / 0122), фінансування якого здійснюється Національним фондом досліджень Україна за кошти державного бюджету.

Висновки. На основі аналізу досліджень в області випробувань рухомого складу, нормативної бази з випробувань рухомого складу розроблений підхід до проведення випробувань спеціального рухомого складу на прикладі автодрезини АС1а. В рамках даного підходу розроблено та погоджено програму випробувань.

За результатами ходових міцнісних випробувань і досліджень напружено-деформованого стану встановлено, що напруження в несучих конструкціях автомотрис типу АС1а не перевищують допустимих. Додатково встановлено підвищення на 40% рівня напружень в межах допустимих значень в рамі автомотриси АС1а на швидкостях 70-80 км/год, в порівнянні з рівнем напружень на швидкостях до 70 км/год.

Відповідність допустимого значення коефіцієнта запасу опору втомі виконується на швидкостях до 70 км/год включно.

За результатами проведеної роботи встановлено можливість подальшого продовження терміну служби несучих металевих конструкцій автомотрис АС1а під час проведення контролю технічного стану на термін до 60 років з дати побудови.

ЛІТЕРАТУРА

1. Третьяков А.В. Продления срока службы подвижного состава. Санкт-Петербург, 2011-301 с.
2. Технічне рішення щодо продовження терміну служби кранів на за лізничному ходу до 60 років. ТРНДКТИ/НВЦ.КР.01-2018. Київ НДКТИ, 2018. 16 с.

3. Дослідження залишкового ресурсу з метою продовження терміну служби спеціальних вагонів для перевезень спецконтингенту. Київ НДКТИ, 2019 - 52 с.
4. Технічне рішення щодо забезпечення експлуатації автоматрис типу АДМ поза продовженим терміном служби. ТР.НДКТИ/ІІ.АДМ.01–2019. Київ НДКТИ, 2019. 14с.
5. Технічне рішення щодо забезпечення експлуатації автоматрис типа АГВ поза продовженим терміном служби. ТР.НДКТИ/ІІ.АГВ.01–2019. Київ НДКТИ, 2019. 14с.
6. Контрольні випробування несучих конструкцій спеціалізованого рухомого складу типів АГМу, АС-1А з метою продовження терміну служби. Програма випробувань НДКТИ/НВЦ УІ 006-20. Київ НДКТИ, 2020. 18с.
7. S.M. Turpak, I.O. Taran, O.V. Fomin, O.O. Tretiak Logistic technology to deliver raw material for metallurgical production. Scientific Bulletin of National Mining University, Issue 1, 2018. P. 162-169.
8. Фомін О.В. Теоретичні основи програмного комплексу визначення та використання математичних моделей складових вантажних вагонів. Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». Кременчук. 2013. Вип. 6(83). С. 87-91.
9. Fomin O.V. Theoretical foundations of the software complex for the determination and use of mathematical models of freight wagons. Naukovyy zhurnal «Visnyk Kremenchuts'kohonatsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho». 6(83). P. 87-91.
10. Fomin, Oleksij, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Anna Fomina, and Vladimir Hauser. "Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry." Communications-Scientific letters of the University of Zilina 21, no. 1. 2019. p. 28-34.
11. Технічне рішення щодо забезпечення експлуатації автодрезин типа АС-1А поза продовженим терміном служби. ТР.НДКТИ/ІІ.АС-1А.01–2020. Київ НДКТИ, 2020 – 13с.
12. O. Fomin, A. Lovska, V. Masliyev, A. Tsymbaliuk, O. Burlutski. Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 7, Issue 1 (97)., 2019. P. 33–40..
13. Fomin Oleksij, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Anna Fomina, Vladimir Hauser. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. Communications-Scientific letters of the University of Zilina 21, no. 1, 2019. P. 28-34.
14. Gorbunov M., Kara S., Nozhenko O., Fomin O., Vaiciunas G., Petrenko V. Creation of the image of the new generation freight car bogie. Transport Means - Proceedings of the International Conference 2018-October, p. 1277-1283.
15. M. Gorbunov, J. Gerlici, S. Kara, O. Nozhenko, G. Chernyak, K. Kravchenko, T. Lack. New principle schemes of freight cars bogies. «Manufacturing Technology». Volume 18, Issue 2, 1 April 2018, P. 233-238.

REFERENCES

1. Tretyakov A.V. (2011) Extending the service life of rolling stock. St. Petersburg. P. 301
2. NDKTI (2018) A technical solution for extending the service life of railway cranes up to 60 years. TR.NDKTI/NVC.KR.01-2018. Kiev. P. 16
3. NDKTI (2019) Study of the residual life in order to extend the service life of special cars for the transportation of special contingents. Kiev. P. 52
4. NDKTI (2019) Technical solution to ensure the operation of railcars of type ADM outside the extended service life. TR.NDKTI/UI.ADM. 01–2019. Kiev. P. 14p
5. NDKTI (2019) Technical solution to ensure the operation of AGV railcars outside the extended service life. TR.NDKTI / UI.AGV. 01–2019. Kiev. P. 14
6. NDKTI (2020) Control tests of supporting structures of specialized rolling stock of AGMu, AS-1A types in order to extend the service life. Test program NDKTI/NVC UI 006-20. Kiev. P. 18
7. S.M. Turpak, I.O. Taran, O.V. Fomin, O.O. (2018). Tretiak Logistic technology to deliver raw material for metallurgical production. Scientific Bulletin of National Mining University, Issue 1. 162-169 DOI: 10.29202/nvngu/2018-1/3.
8. Fomin O. (2013). Theoretical bases of the software complex of definition and use of mathematical models of components of freight cars. Scientific journal "Bulletin of Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky". Kremenchuk. №. 6 (83). 87-91.
9. Fomin O.V. (2013). Teoretychni osnovy prohramnoho kompleksu vyznachennya ta vykorystannya matematychnykh modeley skladovykh vantazhnykh vahoniv. Naukovyy zhurnal «Visnyk Kremenchuts'kohonatsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho». 6(83). 87-91.
10. Fomin, Oleksij, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Anna Fomina, and Vladimir Hauser. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. Communications-Scientific letters of the University of Zilina 21, no. 1. 28-34.
11. NDKTI (2020) Technical solution to ensure the operation of auto-rail cars of the AS-1A type outside the extended service life. TR.NDKTI / UI.AS-1A.01–2020. Kiev. P. 13
12. O. Fomin, A. Lovska, V. Masliyev, A. Tsymbaliuk, O. Burlutski. (2019). Determining strength indicators for the bearing structure of a covered wagon's body made from round pipes when transported by a railroad ferry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 7, Issue 1 (97). P. 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154282.
13. Fomin Oleksij, Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Kateryna Kravchenko, Pavlo Prokopenko, Anna Fomina, Vladimir Hauser. (2020). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its

Transportation on the Railway Ferry. Communications-Scientific letters of the University of Zilina 21, № 1. P. 28-34.

14. Gorbunov M., Kara S., Nozhenko O., Fomin O., Vaiciūnas G., Petrenko V. (2018). Creation of the image of the new generation freight car bogie. Transport Means - Proceedings of the International Conference 2018-October, p. 1277-1283.

15. M. Gorbunov, J. Gerlici, S. Kara, O. Nozhenko, G. Chernyak, K. Kravchenko, T. Lack. (2018). New principle schemes of freight cars bogies. «Manufacturing Technology». Volume 18, Issue 2, 1. P. 233-238.

Fomin Oleksij¹, Kara Serhii², Prokopenko Pavlo³, Turovets Dmytro⁴

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

²Head of the Engineering Department, Branch "Scientific Research and Design Technological Institute of Railway Transport" JSC "Ukrainian Railway", 39, I. Fedorova str., Kyiv 03038, Ukraine

³Post-graduate student of the department "Cars and carriage facilities", State University of Infrastructure and Technologies, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

⁴Engineer of the 1st category of the research department of dynamics and strength, the branch "Research and design-technological institute of railway transport" JSC "Ukrainian Railway", 39, I. Fedorova str., Kyiv 03038, Ukraine

TESTS OF LOADING STRUCTURES OF A SPECIAL ROLLING STOCK AFTER LONG OPERATION

Traffic safety is an essential requirement for railways. In order to ensure uninterrupted transportation of passengers and goods by rail by the enterprise of JSC "Ukrainian Railways", the task of ensuring the operation of rolling stock outside the assigned line of service remains urgent. Proceeding from this, it follows that it is necessary to carry out tests aimed at creating conditions for the operation of rolling stock while maintaining dynamic and strength characteristics. This article presents the order, scope and results of strength tests of rolling stock after long-term operation on the example of an AS1a-type railroad car. The results of the maximum stress levels, standard deviation, fatigue safety factors, the dependence of the stress level on the speed of movement are obtained. Based on the research results, a technical solution has been developed that allows using technical diagnostics methods to extend the service life of the AS1a type railroad cars after the end of the assigned service life.

Keywords: rolling stock, supporting structures, auto-rail, tests, strength, fatigue resistance, service life.

Artem Mironovich^{1*}, Georgy Eitutis^{2*}

¹ Executive Director, Regional Branch "South-Western Railway", 6, Lysenko Street, Kyiv, 01601, Ukraine.

² Professor, Department of Economics, Marketing and Business Administration, State University of Infrastructure and Technology, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: 0000-0002-3833-6875

*Corresponding author: eitutis.g@ukr.net

CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE CRUSHED STONE PRODUCTION IN UKRAINE AND COMPETITION ON THE TRANSPORT MARKET

The article describes the production and use of crushed stone in Ukraine. The price factor of production and sale of crushed stone in the foreign countries is given and the comparative analysis with the Ukrainian producers is carried out. The dynamics of capacity and production of crushed stone products in Ukraine taking into account export and import components is given. It is established that the most capacious market is located in Zhytomyr region. It is noted that the share of crushed stone production of the enterprises located on the territory of the Regional Branch "South-Western Railway" is 44. It was found that only fruitful cooperation between two parties will get positive results, which will certainly increase railway traffic.

Keywords: *crushed stone, production technology, crushed stone fraction, price factor, market capacity, market segmentation, transport component, and competition.*

Introduction. The modern market of transport services is characterized by increased competition between the enterprises of different modes of transport. This problem is especially acute in the field of freight transport. In order to withstand this competition and ensure the effective development of the industry, the railway transport companies are faced with the task – to prevent the outflow of goods to other modes of transport, including motor transport.

The low rate of renewal of the main means of production of the domestic railway transport in the field of innovation and investment activities, led to the fact that the operation is almost 78%. And as a result, the railway transport carries out transportation by means of obsolete and imperfect rolling stock, which is repaired by technological equipment that does not ensure the safety of trains.

The evolution of the needs of the Ukrainian economy and the changing role of road, air and river transport require qualitative changes in the company by defining a development strategy in the medium term.

The purpose of adopting a new strategy for the development of the Joint-Stock Company "Ukrainian Railways" for 2019-2023 (hereinafter - the Strategy) is to define the corporate goals of the Company, which will be understood and accepted by the stakeholders, to focus efforts on achieving them through strategic initiatives.

The Company's development strategy envisages the achievement of the following main goals:

meeting the needs of Ukraine in railway transportation and logistics in accordance with the plans of economic development of the country and population mobility;

achieving and maintaining a strong financial position of the company, including by intensifying the necessary investments in the main activities of UZ;

ensuring the safety of the railway transport for the customers, employees and third parties;

increasing the company's attractiveness to consumers and employees; and

introduction of the modern and effective management practices and principles.

And most important, to review the attitude of carriers to their partners – shippers and to direct the vector of the operational and commercial activities in a customer-oriented direction.

The analysis of the recent research and problem statement. Ukraine has a high potential for the production and export of crushed stone. Subject to the further state and international support for the road construction and repair, the crushed stone market will continue to develop more intensively.

It should be noted that the transport component in the total volume of marketable products of the manufacturer of the construction goods has a significant share, which is about 10 - 50%. Therefore, such factors as the tariff for transportation of 1 ton and term of delivery of cargo that creates preconditions of the transport market with the corresponding competition have essential value for the manufacturer.

Five years ago, the proportion of crushed stone was 20% to 80% in favour of the railway. Every year road transport increases by 3-5%.

If effective measures are not urgently introduced to improve the conditions of transportation by railway, the volume of transportation of crushed stone by railway and road will be adequate.

Among domestic scientists, the solution of the specified problems is devoted to the scientific researches and publications: G.M. Kirpa, Yu. F. Kulaeva, G.D. Eitutis, V.K. Myronenko, V.V. Chorny, V.I. Pasichnyk, O.V. Sobkevych, L.V. Kushnir and others.

In the works of these authors, the presented materials require further research in the current conditions of the railways, which are constantly changing, the issues of freight transportation need a new research.

The purpose and objectives of the research. The purpose of the article is to cover the problems of production and transportation of crushed stone by different modes of transport, which requires increasing the efficiency of industrial enterprises and carriers and creating a competitive environment in the field of logistics services.

Materials and methods of the research. Crushed stone is the most popular product, its output is usually 85-95 percent of the total marketable products of the enterprise. Crushed stone is produced divided into fractions (mm): 5 (3) –10; 10–20; 20–40; 40–70 (70–140). In recent years, due to the use of the Western technologies in road and housing construction, crushed stone companies produce up to 11 fractions. Crushed stone is used: as the main filler of (heavy) concrete in all concrete and reinforced concrete building structures; as a large filler of asphalt (and cement) concrete and ballast layer of pavements of roads and airfields; for the upper embankment of the railway tracks; for all kinds of dumping, paving, and planning works [1].

For lightweight concrete, crushed stone obtained from porous rocks is used, as well as artificial porous fillers, especially vermiculite and perlite, which are the best material for sound and heat insulation.

Today, the vast majority of domestic crushed stone plants do not use optimal technologies, their equipment is not only physically worn out, but also morally obsolete. Many companies

have exhausted the allocated reserves of raw materials. The industry is on the verge of reconstruction and restructuring. This requires new approaches to the evaluation of raw materials, technologies and equipment of plants, so as not to repeat their own mistakes in the organization of production of non-metallic building materials [2,3].

The technological scheme of the enterprise should be optimal according to two criteria:

maximum output of cubic crushed stone;

flexible technology that allows you to respond quickly to changes in demand and avoid overstocking with one or more fractions;

layout of the technological equipment, which allows to minimize the amount of transport equipment (crushers over screens, roars over bunkers, etc.);

use of specialized equipment;

unification of the equipment (use of conveyors with one belt width, but with different speed, etc.);

uniformity of loading of the equipment and stability of characteristics of initial material; and high efficiency of working time, etc.

Technological schemes developed taking into account these rules are not only highly efficient, but also the simplest [4].

Currently, the work is underway to improve the crushing equipment. Taking into account the physics of the solid body and the theory of oscillations, vibrating buccal and conical crushers were created. However, the scope of their application is limited by the physical and mechanical properties of rocks, high yields (up to 25-30 percent?) significant wear of working equipment. Additional tests are required to determine the rational scope of the crushers of this design.

The introduction of new technologies for the production of crushed stone requires an increase in the cost of its production. The cost of producing cubic crushed stone is 15-20% higher than usual. Up to 40% of screenings are formed. Therefore, the main task is the scientific and economic justification of the need for crushed stone in quantitative and qualitative terms. The analysis shows that the selling price of crushed stone in the United States, Europe and Russia is almost the same and averages about \$ 5 per ton.

Although in general the transportation of construction cargo occupies about 10 - 50% in the total volume of marketable products [5,6].

The ratio between the prices of production and consumption on average in Ukraine is estimated as two to one, which is due to transport, supply – marketing, tax and other costs. At the same time, consumption prices differ significantly in some regions.

The increasing demand for crushed stone leads to an intensive increase in its production. In 2015, there was a significant reduction in the production of crushed stone, but since 2016 the demand for crushed stone began to increase, which is due to the development of the construction industry in Ukraine and the need for crushed stone as a filler. In 2018, the production of crushed stone amounted to 81.9 million tons, which is 9.2% more than in 2014 [7].

Today in Ukraine there are many companies that produce crushed stone products. After the crisis in the country, which was observed in 2014-2016, enterprises for the production (extraction) of crushed stone are gradually updating the technological equipment, increasing the quality of crushed stone (cubic). In recent years, the construction market is growing. The largest growth of the building market is observed in Kyiv and Kyiv region, as well as in Lviv and Odessa regions; the construction of commercial buildings decreased in the market of non-residential buildings. The construction market is a significant consumer of crushed stone products, which makes it possible to increase the volume of crushed stone production and, accordingly, increase the company's revenues [7].

The greatest demand in the market of Ukraine and neighbouring countries is crushed stone fractions of 5-20 mm, less often – 5-10 mm, which is used for the production of asphalt, concrete and reinforced concrete structures. Crushed stone of granite fractions 20–40 mm, 40–70 mm is also in stable demand and is used in construction and repair of railway embankments, tramlines, foundations of highways, when laying foundations of buildings and structures, as well as for crushing into smaller fractions of crushed stone [8].

Ukraine has a high potential for the production and export of crushed stone. Subject to the further state and international support for road construction and repair, the crushed stone market will continue to develop. Crushed stone production and prices are constantly increasing, which indicates the prospects for the development of this market.

The crushed stone market in Ukraine is characterized by a high degree of saturation due to sufficient stocks of raw materials, which makes it possible to export products at competitive prices (from 120 to 220 UAH per ton). The competition in this segment is also regional in nature, because, due to the slight difference in geological composition and "factional" crushed stone, a key competition is observed in the field of logistics costs and the ability to deliver products in different batches and modes of transport [9]. Insignificant imports are characterized by the presence of own stocks, existing purchases are only local periodic in nature and are associated with a specific demand (Table 1).

Table 1. Crushed stone market capacity in Ukraine, 2014–2018

Indicators	2014	2015	2016	2017	2018
Production, million tons	74.0	62.4	64.0	75.7	80.9
Import, million tons	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Export, million tons	23.4	12.0	6.7	8.5	6.4
Capacity, million tons	50.8	50.5	57.4	67.3	74.7
Growth rate, %		-0.5	13.6	17.3	11.0

Source: data of the State Statistics Service of Ukraine, market operators, Pro-consulting assessment [7,10,11]

In general, the crushed stone market is experiencing an increase in capacity, which is associated with the level of consumption and demand for road construction, construction of residential and non-residential buildings. Raw materials are also used in other areas – construction of drainage systems and others. At the moment, there is a positive trend in the growth of construction in general (Fig. 1).



Fig. 1. Dynamics of crushed stone market capacity, 2014–2018, million tons

Source: data of the State Statistics Service of Ukraine, market operators, Pro-consulting assessment [7, 10, 11].

Segmentation of the crushed stone market by regions of Ukraine in 2014-2018 shows that the most capacious market is located in Zhytomyr region. The share of crushed stone production of enterprises located in the Regional Branch "South-Western Railway" is 44% (Table 2).

Table 2. Crushed stone market capacity in Ukraine, 2014–2018, million tons

Indicators	2014	2015	2016	2017	2018
Capacity across Ukraine	50.8	50.5	57.4	67.3	74.7
Capacity in RB "South-Western Railway", including by areas	25.3	25.3	28.7	28.9	32.8
Zhytomyr	15.7	15.3	17.4	18.5	18.2
Kyiv	4.7	4.8	5.4	3.8	5.9
Khmelnysky	1.7	2.3	2.6	3.4	4.5
Vinnytsia	3.2	2.9	3.3	3.2	4.2

Source: data of the State Statistics Service of Ukraine, market operators, Pro-consulting assessment[7,10,11].

The most popular fraction in all industries is crushed stone 5–20 mm. This granite crushed stone is very often used in the construction of foundations, as well as for the manufacture of high quality concrete and structures that are created from it. The same material was used and continues to be used in the filling of airfield pavements, pavements and similar structures.

The dynamics of crushed stone production in physical terms in recent years shows a tendency to increase. In 2015, there was a significant reduction in the production of crushed stone, which was due to economic instability and the loss of a number of large economic regions. The average value of crushed stone production for the period 2014–2018 was 71.4 million tons, and the average growth rate was 9.2% (Fig. 2).



Fig. 2. Dynamics of crushed stone production in Ukraine, 2014–2018, million tons

Source: data of the State Statistics Service of Ukraine, market operators, Pro-consulting assessment [7,10,11].

Thus, by 2014, all cargo was sent to the Regional Branch “South-Western Railway” 38473 thousand tons, including construction cargo 20733 thousand tons or 54% of the total shipment to the branches, in 2018 all shipments were sent to the branch in volume 38467 thousand tons, of which 15548 thousand tons of building materials, which is 40% of the total shipment. It

should be noted that in 2019 the percentage of shipments of construction goods to the total shipment was 33% (table 3).

Table 3. Shipment of goods on the Regional Branch "South-Western Railway", 2014-2019

Name of cargo	Shipment of goods, tons						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Total	37 715 075	38 473 238	37 081 104	36 889 021	40 780 721	38 467 165	35 124 283
Coal	3 965	3 548	3 362	9 962	21 337	14 481	17 342
Oil cargoes	1,375,744	249 635	111 504	732 577	1 047 352	1 034 211	665 567
Ferrous metals	43 116	26 952	7 855	11 849	4 570	4 097	2 508
Forest cargoes	2 533 529	2,725,385	2,852,830	2,609,929	1,712,376	1 468 320	632 434
Cement	1,279,724	1 222 520	1 204 952	1 351 112	1 139 314	1,050,059	1 039 106
Chemical and mineral fertilizers	331 021	377 382	466 151	522 003	489 325	268 434	103 294
Bread cargoes	6,265,386	7 531 784	8 291 603	9 004 861	10 932 105	11 158 377	13,750,793
Ferrous scrap	884 967	904 426	734 371	627 366	752 629	753 916	642 792
Construction cargo	20,733,497	20 930 804	17 777 018	15 056 621	17 309 968	15 548 849	11 567 363
incl. stones, natural construction products	17 695 353	18 822 775	15,794,336	13 084 123	15 365 118	13 889 109	10 399 760
Refractories	891 010	889 392	779 766	671 971	730 568	757 891	549 078

Source: Reporting data of the Regional Branch "South-Western Railway" [12].

The main reason for the decline in the transport of crushed stone by railway, it should be said openly, is the fact that the vector of logistics of the railway transport was directed only in favour of the railways, without taking into account the interests of the shippers.

Consider this problem on the example of the Unigran Company.

Unigran is one of the largest manufacturers of the construction products in Ukraine. The main products are crushed stone, sand, screenings and paving slabs. In favourable periods of economic growth large-scale road construction was carried out. They produced and sold six million tons of crushed stone a year, and most transported it on their own. Since 2014, there has been a decline in the production and transportation of crushed stone, in 2017-2018 there was a rise, and in 2019-2020 - again a decline.

What problems, in the opinion of Unigran, have affected its production and economic activities?

The main problem today is the insufficient number of available electric freight and diesel locomotives. For example, at the station of gravity of the company - Penzyevychy there was always a locomotive, which carried out shunting works and formed routes to departure. Today, in addition to this station, the neighbouring ones are served: Irsha, Malyn, Chopovychy, and the number of locomotives and crews has not increased [13].

The second problem is routing. Today Ukrzaliznytsia relies on the scheduled shipments. However, in practice there is also a need to deliver goods in batches of cars and the company is forced to carry out this transportation by road. And the railway naturally loses these volumes of transportations. So a few years ago, automotive logistics worked only at a distance

of up to 100 km, if more - was considered inefficient. Today, such transportation is already carried out at a distance of 200-250 km.

Another problem is the lack of sites for the repair of freight cars, for this reason, dozens of scarce freight cars are idle without repair for two - three months. In addition, prices for repairs in recent years have risen significantly, that is, the cost of using your own car is constantly growing. It is advisable to open this market to private repair companies so that there is competition.

It is impossible not to agree with the specified problem questions of the company, which, first of all have to be solved operatively by railway people. It is hard to deny that reforming the operational vertical has impaired operational management. The newly created structures have centralized transportation management, which is still inefficient today, including the development of tariff policy. At the same time, the regional branches today do not have the appropriate levers to manage and resolve all issues of operational and commercial work, and require approval from Ukrzaliznytsia.

Thus, after the introduction of changes in the rates of payment for the use of own cars in accordance with paragraph 3.4.2 of the Agreement on the provision of services for the transportation of goods by railway, which changes came into force on October 1, 2020, the fee for the use of cars has increased significantly during the first three day, as an example, the cost of the service for the use of a universal semi-car on the first day increased 9 times (from UAH 88.3 to UAH 800.0).

It should be noted that the additional financial burden on the car component (usage fee) will lead to an increase in the cost of transportation logistics in the carrier's cars. At the same time, the difficult situation for JSC "Ukrzaliznytsia" with the volume of traffic in the carrier's cars may worsen.

The reorientation of loading of separate nomenclature groups of freights in private cars is possible in the conditions of surplus of private cars, after increase in cost for use of the carrier's car.

The management of the Regional Branch "South-Western Railway" proposed to reduce or cancel the fee for the use of the carrier's own cars within 48 hours, which will allow cargo owners and JSC "Ukrzaliznytsia" to use most CTL cars, which currently have worse technical condition than private cars.

There are a number of other issues that need to be addressed by both railways and freight owners. Only fruitful cooperation between the two sides will allow to obtain positive results, which will certainly increase the volume of the railway transport.

Conclusions. The research identified the main prerequisites for the development of crushed stone production in Ukraine and competition in the transportation market.

It is known that the crushed stone market of Ukraine is characterized by a high degree of saturation due to sufficient stocks of raw materials, which makes it possible to export products at competitive prices (from 120 to 220 UAH per ton). Competition in this segment is mainly observed in the field of logistics costs and the ability to deliver products in different batches and modes of transport.

At the same time, many enterprises have exhausted the allocated reserves of raw materials, their equipment and technology are physically worn out and obsolete [14].

The introduction of new technologies for the production of crushed stone requires an increase in the cost of its production [15].

The analysis shows that the selling price of crushed stone in the United States, Europe and Russia is almost the same and averages about \$ 5 per ton. Although in general, the

transportation of construction goods account for about 10-50% of the total volume of marketable products.

The ratio between production and consumption prices in Ukraine is estimated as two to one, which is due to transport, supply, sales, tax, and other costs. At the same time, consumption prices differ significantly in some regions [16].

If we take the data from 2014, then the proportion was 20% to 80% in favour of the railway. Every year road transport grows by 3-5%. And in the coming years, if the specified growth of traffic, road transport will reach the level of the railway transport [17].

On the example of Unigran Company, the main problems, which concern it at the present stage as both the producer of crushed stone, and the carrier, are considered:

Insufficient number of freight electric locomotives and diesel locomotives for shunting and export works;

negative impact of scheduled shipments organized by the railway on the timely departure of certain groups of freight cars;

lack of sites for repair of freight cars, for this reason dozens of scarce freight cars are idle without repair for two or three months.

It is impossible not to agree with the specified problematic questions of the company, which first of all, have to be solved operatively by railway people. At the level of the regional branch, appropriate measures are being implemented to improve operational and commercial work, but unfortunately there are problems, mainly of a regulatory nature, such as the introduction of changes in rates for own cars in accordance with paragraph 3.4.2 of the Service Agreement on the organization of cargo transportation by railway, the changes to which came into force on October 1, 2020.

The reorientation of loading of separate nomenclature groups of freights in private cars is possible in the conditions of surplus of private cars, after increase in cost for use of the carrier's car.

The management of the regional branch of the South-Western Railway proposed to reduce or cancel the fee for the use of the carrier's own cars within 48 hours, which will allow cargo owners and JSC "Ukrzaliznytsia" to use most CTL cars, which currently have worse technical condition than private cars.

There are many other issues that need to be addressed by both railways and freight owners, but only a fruitful cooperation between the two sides can achieve positive results, i.e. increase production and transportation.

REFERENCES

1. Shekov, V. A., Luodes, Kh. T., Ivanov, A. A., Vozdaenko, A. Ya, Myasnikova, O. V. (2004). *Shcheben of Karelia. Properties, application, and prospects for use*. Petrozavodsk.
2. Eitutis, H. (2018). Analiz ta otsinka obsiahiv tranznytykh perevezen zaliznychnym transportom Ukrainy. *DUZT. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti*. 62.53–63.
3. Konkurentni perevahy zaliznyts na rynku vantazhnykh perevezen (2012). *Visn. Chernih derzh. tekhnoloh. un-tu. Seriya «Ekonomichni nauky»*. 1(56). 140–156. (In Ukrainian).
4. *Calculation method and economic indicators for the distribution of traffic between modes of transport* / ed. Dmitriev, V. A. (1993). Moskov, Transport, 1993. (In Russian)
5. Kirpa, G. M. *Integration of the bulk transport of Ukraine and the European transport system: monograph*. (2004). Dnipropetrovsk: Vydavnytstvo Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana.
6. Mironenko, V. K. (2008). Concept of improving the quality of transport and logistics security of enterprises of the hydro-metallurgical complex and ways of reaching the point. *IV Mizhnar. Science Conf. DETUT*, 141–143.
7. *Analysis of the crushed stone market in Ukraine and neighboring countries 2014–2018*. – URL: <https://inventure.com.ua/analytics/investments/analiz-rynka-shebnya-v-ukraine-i-stranah-blizhnego-zarubezhya-2014-2018-gg>

8. *Crushed stone market overview of Ukraine*. – URL: <https://inventure.com.ua/analytics/investments/obzor-rynka-shebnya-ukrainy>
9. Kulaiev, Yu. F. (2012). *Metody ekonomichnoi otsinky investytsiinykh proektiv na zaliznychnomu transporti*. Kyiv, Feniks, 512. (In Ukrainian).
10. Dates of the State Statistics Service of Ukraine, operators in the market, assessment Pro–consulting
11. *Statistical scholar of Ukraine for 2018 rik. Derzhavna Statistics Service of Ukraine: website.* URL: www.ukrstat.gov.ua (дата звернення: 28.11.2019).
12. *Sounds of the regional branch "Pivdenno-Zakhidna zaliznytsya"*.
13. Kritskaya, I. Ukrzaliznytsia does not communicate with the carrier as a partner. – URL: <https://mintrans.news/logistics/ukrzaliznytsya-ne-obschaetsya-s-gruzoperevozchikom-kak-s-partnerom>
14. Sobkevich, O. V., Mikhailichenko, K. M (2014). *Mechanism of effective management and development of the potential of the transport and road complex of Ukraine*. Kyiv, NISD, 60. (In Ukrainian)
15. *Competitiveness of Ukraine in the context of globalization of the light economy. Materials of the All-Holy Economic Forum: website.* URL: <http://www.weforum.org>
16. Pasichnyk, V. I. (2003). *Theoretical foundations of the economics of exploitation activity: monograph*. Kyiv, Naukovy svit, 222.
17. Kushnir L. V. (2015). Scientific and methodological approaches to determining the relationship between transport and the dynamics of economic development. *Young scientist*, 15 (20), ch. 2, 15–19.

Артем Миронович¹, Георгій Ейтуніс²

¹ Виконавчий директор, регіональна філія «Південно-Західна залізниця», вул. Лисенка, 6, м. Київ, 01601, Україна

² Доктор економічних наук, професор, кафедра «Економіка, маркетинг та Бізнес-адміністрування», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА ЩЕБЕНЮ В УКРАЇНІ ТА КОНКУРЕНЦІЇ НА РИНКУ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті охарактеризовані виробництво і застосування щебню на території України. Наведено цінові фактори виробництва і реалізації щебню в зарубіжних країнах і здійснено порівняльний аналіз з українськими виробниками. Наведено динаміку ємності і виробництва щебеневої продукції в Україні з урахуванням експортної та імпоротної складових. Встановлено, що найбільш ємний ринок розташований в Житомирській області. Відзначено, що питома вага виробництва щебню підприємств, розташованих на території регіонального філіалу "Південно-Західна залізниця" становить 44%. З'ясовано, що тільки плідна взаємодія обох сторін дозволить отримати позитивні результати, що, безумовно, вплине на збільшення обсягів перевезень залізничним транспортом.

Ключові слова: щебінь, технологія виробництва, фракція щебню, ціновий фактор, ємність ринку, сегментація ринку, транспортна складова, конкуренція.

Шапошник Владислав Юрійович¹, Шикунів Олександр Анатолійович^{2*}

¹ Доцент, кафедра «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, вул. Лазаряна, м. Дніпро, 49010, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4701-6491>

² Доцент, кафедра «Вагони та вагонне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, вул. Лазаряна, м. Дніпро, 49010, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8256-2634>

*Автор, відповідальний за листування: tri_s@ua.fm

ПРОБЛЕМА ОБРИВІВ АВТОЗЧЕПІВ

Проблема обривів автозчепів залишається актуальною для залізничного транспорту. В роботі приведені ряд дефектів, що виявлено в обірваних автозчепках. Проведений аналіз міцності автозчепу свідчить про наявність запасу міцності, але виявлені в обірваних автозчепках дефекти перевищують цей запас. Аналіз нормативної документації та методів контролю автозчепів свідчить, що методи руйнівного та неруйнівного контролю, що використовуються при виготовленні та ремонті автозчепів на можуть в повному обсязі охопити дефекти, які можуть виникати при їх виготовленні. Тому найважливішим кроком у вирішенні цієї проблеми повинно стати підвищення якості контролю корпусу автозчепу. Запропоновано використання акустичного контролю, а саме тіньового або дзеркально-тіньового методу для контролю хвостовика автозчепу в місці отвору під клин тягового хомута. Робота методів ґрунтується на зменшенні амплітуди сигналу при проходженні через несплошність металу, що дозволяє виявляти наявність внутрішніх дефектів. Ці методи дозволяють виявляти значні внутрішні ливарні дефекти типу несплошність металу, що зменшить ймовірність обриву автозчепів через наявність цього типу дефекту. На відміну від наявних методів контролю внутрішніх ливарних дефектів, запропоновані методи є неруйнівними та можуть бути застосованими до всіх автозчепів після незначної підготовки поверхні для контролю.

Ключові слова: автозчеп, обрив, неруйнівний контроль, ультразвуковий контроль, тіньовий метод, міцність, безпека.

Вступ. Обов'язком всіх працівників залізничного транспорту є постійне підвищення рівня безпеки руху, як одного з найбільш важливих якісних показників роботи залізничного транспорту, постійна робота щодо попередження і усунення причин, які призводять до порушень безпеки руху поїздів. Для виконання зазначених вимог повинен підвищуватися контроль за утриманням у справному стані рухомого складу та об'єктів інфраструктури, за якістю ремонту та технічного обслуговування, впроваджуватися нова та вдосконалюється існуюча техніка, передові методи праці, засоби діагностики [1-6].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. За інтенсивністю відчепів в поточний ремонт на ударно-тягове обладнання може припадати до 8 % від всіх несправностей, особливо у поїздах підвищеної ваги і довжини, у зимову пору року при температурі мінус 40-50 °С коли міцність металу автозчепу на розрив знижується майже в 2 рази, складному профілю колії та помилками машиніста при управлінні

поїздом, при різниці висот осей між суміжними автозчепами більше 100 мм напруження в тілі автозчепу при однакових прокольних силах більше в 3-4 рази у порівнянні з співвісним розташуванням та ін. [7, 8, 9].

Ударно-тягові прилади призначаються для з'єднання одиниць рухомого складу між собою, передачі зусиль, пом'якшення дії цих зусиль на рухомий склад, а також для утримання зчеплених вагонів на певній відстані один від одного. Одним з найбільш навантажених та таким, що працює в найбільш тяжких умовах елементом ударно-тягового пристрою є корпус автозчепу. Корпус автозчепу СА-3, рис.1, виконаний у вигляді порожнистого сталевого виливку з низьколегованих сталей 20ГЛ, 20ФЛ, головна частина якого плавно переходить в подовжений хвостовик [10].

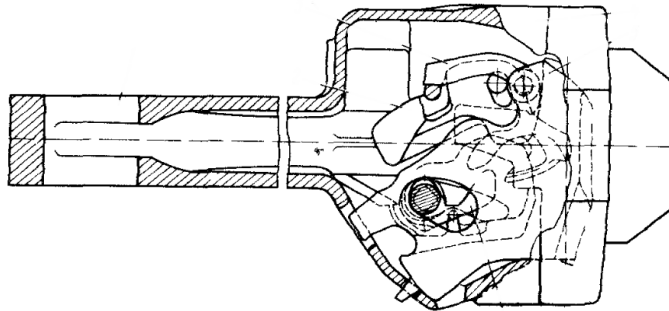


Рис. 1. Переріз корпусу автозчепу СА-3 з механізмом

Основним видом порушення безпеки руху поїздів по несправності автозчепного обладнання є обриви автозчепів, через тріщини в корпусі автозчепу. Також відомі випадки сходу вагонів через наїзд на обірваний корпус автозчепу. Близько 15-20 % тріщин приходяться на перемичку і стінки клинового отвору, 11% - на тіло хвостової частини, решта - це тріщини в тілі головки автозчепу. Огляд корпусів автозчепів з тріщинами і зламами хвостової частини показав, що 60 % корпусів автозчепів, крім того, мали дефекти технологічного походження (товщина стінок менше встановленої, дефекти литва) [7, 8].

Мета і завдання дослідження. Дослідження сучасного стану контролю корпусу автозчепу та визначення можливості підвищення якості контролю цього вузла.

Матеріали та методи дослідження. До основних несправностей корпусу автозчепу СА-3 відносяться (рис.2) [8, 11]:

- тріщини 1 в кутах, утворених ударною стінкою зіву і бічною стінкою великого зуба, а також між цією стінкою і тяговою стороною великого зуба;
- зноси 2 тягових і ударних поверхонь великого і малого зубів;
- знос поверхні 3 упору голови автозчепу.
- тріщини 4 в місці переходу голови до хвостовика;
- зім'яття 5 стінки отвору для клина тягового хомута;
- тріщини 6 в стінці отвору для клина тягового хомута;
- знос 7 упорної поверхні хвостовика;
- зноси 8 поверхонь корпусу в місці дотику з поверхнями отвору ударної розетки;
- тріщини в кутах прорізів для замка і замкотримача;

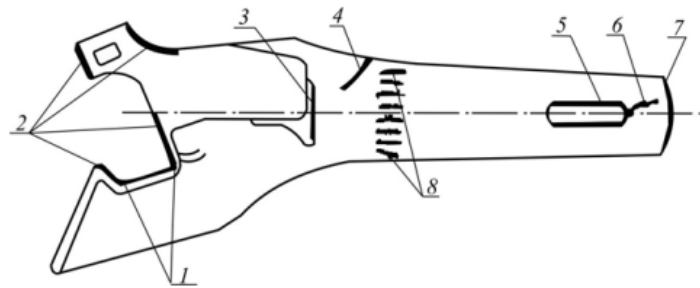


Рис. 2. Місця пошкоджень і зносів корпусу автозчепу

На рис. 3 приведені фото обривів корпусу автозчепу СА-3. У місці розриву по отвору для клина тягового хомута наявні значні за розмірами внутрішні дефекти металу. Згідно з ДСТУ ГОСТ 32885 [12] у цьому місці метал повинен мати повну заливку.



Рис. 3. Обрив корпусу автозчепу СА-3 по отвору для клина тягового хомута

Протягом року вагон приблизно 30 раз навантажується силами розтягування та стиснення які досягають 250-300 тс і навіть перевищувати ці значення сил [7, 13-15]. Проведемо розрахунок корпусу автозчепу на міцності саме в перетині його отвору під клин (рис.4, переріз VI) [16-19].

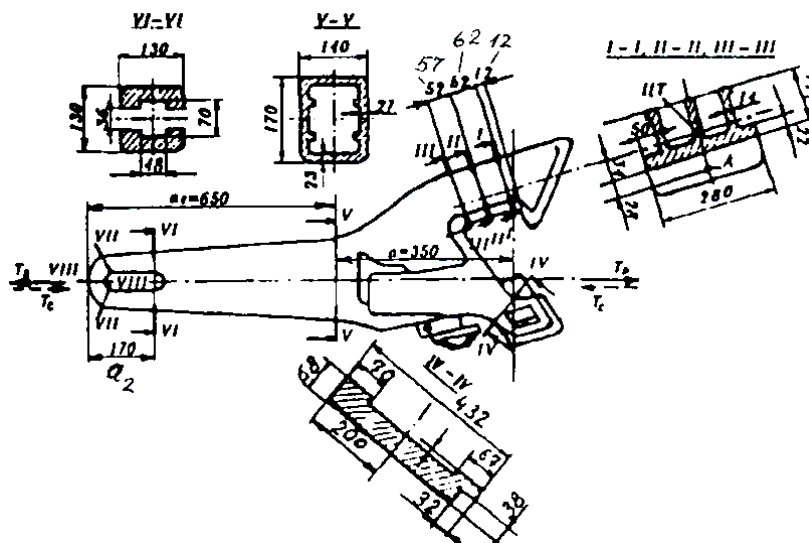


Рис. 4. Розрахункова схема корпусу автозчепу

Напружений стан хвостовика корпусу автозчепу оцінюється при дії поздовжньої сили розтягування $T_p = 2,5$ МН та стиснення $T_c = -3,5$ МН при ексцентриситеті цих сил $e = 50$ мм. Напруження в перерізі VI визначають за формулою:

$$\sigma_{P(C)} = \pm\sigma_M \pm \sigma_N \leq [\pm\sigma_T]. \quad (1)$$

Отримані напруження не повинні перевищувати допустимі для сталі марки 20Г1ФЛ з границею текучості $[\sigma_T] = 400$ МПа. Напруження які виникають у розрахунковому перерізі визначаємо за формулами:

$$\sigma_M = \frac{T_{P(C)} e_{VI}}{W}, \quad (2)$$

$$\sigma_N = \frac{T_{P(C)}}{F}, \quad (3)$$

де W, F – момент опору та площа поперечного перерізу відповідно, $W_{VI} = 260$ см³, $F = 105,88$ см².

$$e_{VI} = \frac{\frac{e}{2} a_2}{a + a_1}, \quad (4)$$

де a_1, a_2, a – відстані до розрахункового перерізу VI, $a_1 = 650$ мм, $a_2 = 170$ мм, $a = 350$ мм.

Підставивши данні отримаємо:

$$\sigma_p = 4,09 + 23,61 = 27,70 \text{ кН/см}^2 = 276,98 \text{ МН/м}^2 \leq [400 \text{ МПа}]$$

$$\sigma_c = -5,72 + (-33,06) = -38,78 \text{ кН/см}^2 = -387,77 \text{ МН/м}^2 \leq [400 \text{ МПа}]$$

Умова міцності корпусу автозчепу у перерізі отвору під клин виконується в обох варіантах прикладання навантажень (розтягання та стиснення). Однак, запас по міцності складає лише 3 % при дії стискаючої сили та 31% при дії сили розтягання. При наявності у відливці внутрішніх дефектів, що зменшують площу перерізу запас міцності буде зменшуватися. При наявності дефектів площею 3,8 см² та 36,28 см² і більше відповідно для стискання та розтягання умова міцності корпусу автозчепу у перерізі отвору під клин не виконується.

Аналіз обривів автозчепів показав, що площа старої тріщини в перемичці і стінках отвору під клин нерідко становить 50-80% площі перетину. Зазначимо, що міцність автозчеплення наближається до міцності хребтових балок, особливо у 4-вісних цистерн [7]. Вирішувати проблему обривів автозчепів збільшенням їх міцності недоцільно, саме тому необхідно підвищувати якість контролю корпусу автозчепу, з метою виявлення недопустимих дефектів.

При виготовленні, прийманні продукції та проведенні планових видів ремонту обов'язково проводиться неруйнівний контроль (НК) деталей автозчепного пристрою. НК корпусу автозчепу може проводитися наступними методами [20-24]:

І. Магнітопорошковим методом неруйнівного контролю який базується на притяганні магнітних часток магнітним полем розсіювання, що виникає над дефектом при намагнічуванні деталі.

II. Вихрострумовим методом неруйнівного контролю який ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться в об'єкті контролю зовнішнім полем.

III. Ферозондовим методом неруйнівного контролю який ґрунтується на виявленні ферозондовим перетворювачем магнітного поля розсіювання дефекту в попередньо намагнічених деталях і перетворенні його в електричний сигнал.

Розглянуті методи контролю дозволяють контролювати всю поверхню деталі або окремі її ділянки і виявляти поверхневі і підповерхневі дефектів типу тріщин різноманітного походження, флокенів, закатів, надривів, волосовин, розшарувань та ін.

При виготовленні автозчепів не рідше одного разу в місяць при періодичних випробуваннях контролюють наявність та розмір внутрішніх дефектів при розрізанні корпусу автозчепу по перетинах в місцях, зазначених на рис.5 [25].

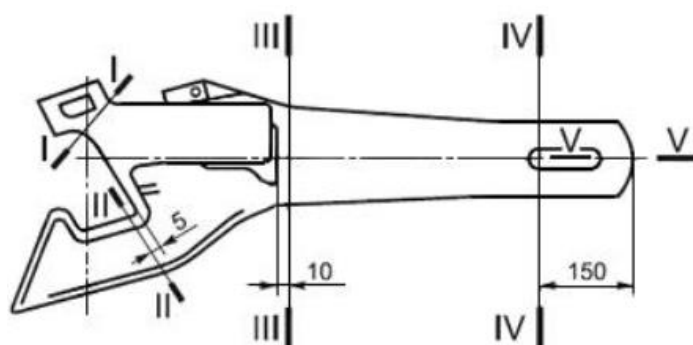


Рис. 5. Місця розрізання корпусу автозчепу для контролю внутрішніх дефектів

При проведенні НК корпусу автозчепу не виключені такі помилки як пропуск та виявлення хибних дефектів. Ці помилки можуть бути викликані як низькою кваліфікацією дефектоскопіста так і низькою інших факторів пов'язаних із шорсткістю поверхні деталі, локальними змінами електромагнітних властивостей металу, зміною кривизни контрольованої поверхні та інш.

Зони проведення неруйнівного контролю згідно з [25] подані на рис.6

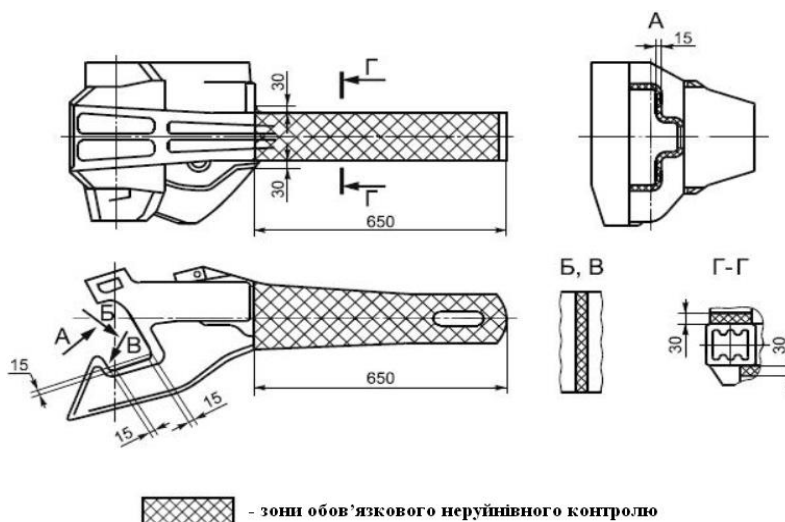


Рис. 6. Зони обов'язкового неруйнівного контролю корпусу автозчепу СА-3

Згідно з вимогами [25] неруйнівний контроль корпусу автозчепу повинен проводитися будь-якими методами, що забезпечують необхідну точність, тобто конкретні методи та методики контролю цим нормативним документом не оговорені.

Огляд методів контролю передбачених [25] та відповідними інструкціями Укрзалізниці [20, 23] показав, що методи неруйнівного контролю здатні виявляти лише поверхневі та підповерхневі дефекти корпусу автозчепу, а руйнівний метод контролю не може гарантувати, що внутрішні дефекти, особливо в зоні отвору під клин тягового хомута, відсутні в інших автозчехах, або не розміщуються в зоні хвостовика автозчепу де не передбачено обов'язкове розрізання.

Як бачимо з рис.3 дефекти литва розміщується вглибині металу, а можливими методами НК які спроможні виявити такі дефекти з достатньою точністю є акустичний або радіаційний методи [26-28]. Серед цих методів найбільше розповсюдження при проведенні НК деталей залізничного транспорту отримав акустичний метод контролю, а саме ультразвуковий метод контролю, який наразі успішно застосовується при контролі осей, коліс, упорного кільця буксового підшипника, товщинометрії та контролі зварних швів. Широке різноманіття акустичних методів контролю дозволяє обрати оптимальний метод контролю для кожної деталі.

Зони ультразвукового контролю корпусу автозчепу в місці отвору під клин показана на рис. 7. Контролюється область на відстані 187 мм від торця хвостовика.

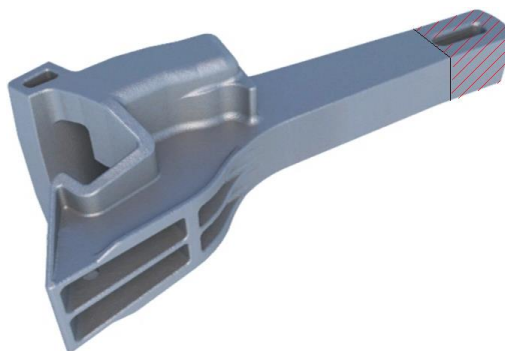


Рис. 7. Зони ультразвукового контролю корпусу автозчепу

Для ультразвукового контролю зазначеної зони пропонується застосовувати тінювий або дзеркально-тінювий метод. Тінювий метод відноситься до методів проходження та заснований на посиленні у виріб який контролюється пружних коливань і реєстрації їх інтенсивності після проходження звукової хвилі через виріб. Найчастіше випромінювач і приймач розташовуються по різні боки об'єкта контролю. При динамічному скануванні вони повинні рухатися синхронно. Переваги цього методу полягають в меншій залежності від орієнтації дефекту, ніж в методі відображення. До недоліків даного методу відносять необхідність двостороннього доступу до деталі, необхідність синхронного переміщення випромінювача і приймача, неможливість визначити координати дефекту. Даним методом добре виявляються внутрішні дефекти металу розміром від 8 мм. Схема контролю тінювим методом показана на рис.8.

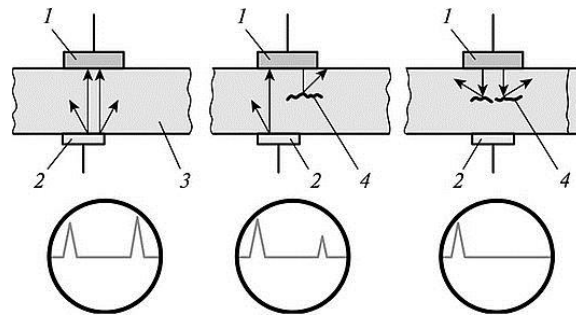


Рис. 8. Схема контролю тіньовим методом прямим перетворювачем та зображення сигналів на екрані дефектоскопа:

1 – випромінювач, 2 – приймач; 3- дефект; 4 – об’єкт контролю

При дзеркально-тіньовому методі ознакою виявлення дефекту служить ослаблення амплітуди сигналу, відбитого від протилежної поверхні (її зазвичай називають донної поверхнею) виробу. Додатковою перевагою цього методу в порівнянні з тіньовим є односторонній доступ (рис.9) – випромінювач (В) та приймач (П) знаходяться з одного боку деталі та можуть бути об’єднані в один корпус.

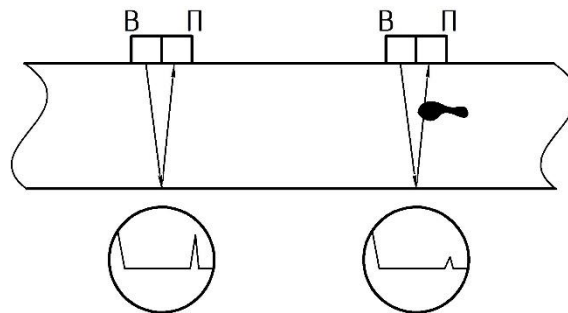


Рис. 9. Схема контролю дзеркально-тіньовим методом та зображення сигналів на екрані дефектоскопа

Запропоновані методи контролю доцільно впроваджувати при виготовленні корпусів автозчепів та при приймальному контролі автозчепів Укрзалізницею. Подальші дослідження цього питання повинні бути направлені на розробку відповідних методик проведення ультразвукового неруйнівного контролю та оцінки результатів цього контролю, а також проведення експериментальних досліджень з метою визначення ефективності запропонованих рішень.

Висновки. Проблема обривів автозчепів залишається актуальною для залізничного транспорту. Як показав аналіз літератури вирішувати цю проблему збільшенням міцності корпусу автозчепу недоцільно. Тому найважливішим кроком у вирішенні цієї проблеми повинно стати підвищення якості контролю корпусу автозчепу. Аналіз методів контролю, особливо зони отвору під клин тягового хомута показав, що можливість виявлення внутрішніх дефектів металу (пори, раковини) вкрай мала, та можлива лише при проведенні руйнівного контролю. Авторами запропоновано використання акустичного контролю, а саме тіньового та дзеркально-тіньового методу. Поставлено питання необхідності розробки відповідних методик проведення ультразвукового неруйнівного контролю, а

також проведення експериментальних досліджень. Запропоновані методи контролю пропонуються до впровадження на етапі виробництва та приймання продукції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Huang H.Z., Yuan X., Yao X.S. Fuzzy fault tree analysis of railway traffic safety // Conference on traffic and transportation studies, American society of civil engineers, 2000. P. 107–112
2. Reidemeister A. et al. Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a “hat” // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 985 012034. P. 1-7. Doi: 10.1088/1757-899X/985/1/012034
3. Shvets A. O., Bolotov O. O. Influence of loads from the axis of a gondola car on its dynamic indicators and railroad tracks. // Наука та прогрес транспорту. 2019. № 1 (79). P. 151–166. doi: 10.15802/stp2019/158127
4. Reidemeister O. G., Shykunov O. A. Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car bogie // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2018. № 4 (76). doi: 10.15802/stp2018/141186
5. Reidemeister O. H., Kalashnyk V. O., Shykunov O. A. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2016. №2(62), P. 148–156. <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334>
6. Мурадян Л.А., Шапошник В. Ю., Винстрот Бернд Уве, Муковоз С.П. Испытания перспективных тормозных колодок на железных дорогах Украины // Локомотив інформ. 2015. №7-8 (109-110). С. 20-22
7. Козубенко В. Г. Безопасное управление поездом: вопросы и ответы : учебное пособие. Москва : Маршрут. 2005. 320 с.
8. Гурский Е. П. Оценка технического состояния автосцепного устройства в эксплуатации. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель : БелГУТ, 2009. 28 с.
9. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016. № 11. С. 49–54. Doi: 10.15802/ecstr2016/91337.
10. Belyaev V. I. Standards and new design of absorbing devices for automatic SA-3 couplers // Rail Technology Review. 2013. Vol. 53, №. 3–4. P. 43–46.
11. Mousavi Zadeh N., Dehghani K., Pournavari M. Failure analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages // Engineering failure analysis. 2007. №14. P. 903–912.
12. ДСТУ ГОСТ 32885:2016 (ГОСТ 32885-2014, IDT) Автозчеплення моделі СА-3. Конструкція та розміри. Київ : ДП«УкрНДНЦ».
13. Урсуляк Л. В., Сапарова Л. С., Швець А. А. Оценка наибольших продольных сил в поезде при его движении по перелому продольного профиля // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 78 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 17-18 травня 2018 р): Дніпро : Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту, 2018. С. 86–87.
14. Недужа Л. О., Швець А. А. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2012. №1(73), С. 131–147. Doi: 10.15802/stp2018/123457
15. Daunys M., Putnaitė D., Bazaras Ž. Principles for modelling technological processes investigation into the strength and durability of automatic coupler SA-3 in railway carriages. // Transport. 2009. №24(2). P. 83–92. Doi:10.3846/1648-4142.2009.24.83-92
16. Расчет вагонов на прочность : учебное пособие для вузов / под ред. Л. А. Шадура. - 2-е изд., испр. и доп. Москва : Машиностроение. 1971. 432 с.
17. Daunys M., Putnaitė D. Determination of lifetime for railway carriages automatic coupler SA-3. // Mechanika. - Kaunas: Technologija. 2005. №2(52). P. 5-10
18. Anghel C., Dumitru I., Faur N., Branzei N., Bogdan R., The analysis of a damaged component from the connection system of the wagons. // Engineering Failure Analysis. 2013. №29. P. 93- 107.
19. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ : ДП«УкрНДНЦ».
20. Криворудченко В. Ф., Ахмеджанов Р. А. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта : учеб. пособие для вузов. Москва : Маршрут. 2005. 436 с.
21. Jemec V., Grum J. Latest methods of non-destructive testing of railway vehicles. // The 8th international conference of the Slovenian society for non-destructive testing. 2005. P. 69-79.
22. Hoddinot D. S. Railway axle failure investigations and fatigue crack growth monitoring of an axle. // Proc. Instn Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit. 2004. P. 283–292.
23. СТІП 0.8-2016 (Проект) Вагони вантажні. Неруйнівний контроль деталей і складових частин під час ремонту. Правила організації та проведення. АТ «Укрзалізниця».
24. СТІП 04-018:2019 «Комплект документів на технологічний процес вхідного контролю відповідальних деталей та вузлів вантажних вагонів». Наказ АТ «Укрзалізниця» від 09.08.2019 №524

25. ДСТУ ГОСТ 22703:2018 (ГОСТ 22703–2012, IDT) Деталі литі зчпних та автозчпних пристроїв залізничного рухомого складу. Загальні технічні умови. Київ : ДП«УкрНДНЦ».
26. Неразрушающий контроль и диагностика : Справочник / ред. В. В. Клюев. Москва : Машиностроение. 2003. 656 с.
27. Palanisamy S., Nagarajah R., Iovenitti P. Ultrasonic inspection of rough surface aluminium die castings. // *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2007. №49. P. 160-164. Doi: <https://doi.org/10.1784/insi.2007.49.3.160>
28. Wilczek A., Długosz P., Hebda M. Porosity Characterization of Aluminium Castings by Using Particular Non-destructive Techniques. // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2015. №34. P. 26. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0302-z>

REFERENCES

1. Huang, H.Z., Yuan, X. & Yao, X.S. (2000) Fuzzy fault tree analysis of railway traffic safety. *Conference on traffic and transportation studies, American society of civil engineers*, 107–112. Doi: [https://doi.org/10.1061/40503\(277\)16](https://doi.org/10.1061/40503(277)16)
2. A. Reidemeister et al. (2020) Improvement of the open wagon for cargoes which imply loading with a “hat”. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 985 012034, 1-7. Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012034>
3. Shvets, A.O. & Bolotov, O.O. (2019) Influence of loads from the axis of a gondola car on its dynamic indicators and railroad tracks. *Наука та прогрес транспорту*, 1 (79). 151–166. Doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/158127>
4. Reidemeister, O.G. & Shykunov, O.A. (2018) Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car- bogie. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепрпетровского национального университета железнодорожного транспорта*, 4 (76), 125-133. Doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/141186>
5. Reidemeister, O.H., Kalashnyk, V.O. & Shykunov, O.A. (2016). Modernization as a way to improve the use of universal cars. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2(62), 148–156. Doi: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67334>
6. Muradian, L.A., Shaposhnyk, V.Y., Uve, Vynstrot Bernd & Mukovoz, S.P. (2015) Ispytaniya perspektivnykh tormoznykh kolodok na zheleznykh dorogakh Ukrainy [Tests of promising brake pads on the railways of Ukraine] *Locomotive Inform.* 7-8 (109-110), 20-22 [in Russian].
7. Kozubenko, V.G. (2005) Bezopasnoye upravleniye poyezdom: voprosy i otvety : uchebnoye posobiye [Safe train control: questions and answers: a study guide.]. *Moskva : Marshrut*, 320 [in Russian].
8. Gurskiy E.P. (2009) Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya avtostsepnogo ustroystva v ekspluatatsii [Assessment of the technical condition of the automatic coupler in operation]. *Gomel : BelGUT*, 28 [in Russian].
9. Muradian, L.A., Shaposhnyk, V.Y. & Podosonov D.O. (2016). Pidvyshchennia nadiinosti vantazhnykh vahoniv z vykorystanniam novykh tekhnolohii vyhotovlennia i vidnovlennia robochykh poverkhon [Improving the Reliability of Freight Wagons with the Use of New Manufacturing Technologies and Regeneration of Working Surfaces]. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport* 11, 49-54 [in Russian] Doi: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2016/91337>
10. V. I. Belyaev (2013) Standards and new design of absorbing devices for automatic SA-3 couplers. *Rail Technology Review*, Vol. 53 (№3–4), 43–46.
11. Zadeh, N., Mousavi, K. & Dehghani, M. (2007) Pouranvari Failure analysis of automatic coupler SA-3 in railway carriages *Engineering failure analysis*, 14, 903–912.
12. Avtozcheplyennia modeli SA-3. Konstruktsiia ta rozmyri [Automatic coupler model SA-3 and its components. Design and dimensions]. (2016). *DSRU GOST 32885 (GOST 32885-2014, IDT) Kyiv : DP«UkrNDNTs»* [in Ukrainian]
13. Ursuliak, L.V., Saparova, L.S. & Shvets, A.A. (2018) Otsenka naibolshih prodolnyih sil v poezde pri ego dvizhenii po perelomu prodolnogo profilya [Estimation of the greatest longitudinal forces in the train when it moves along the fracture of the longitudinal profile]. *The problems and prospects of railway transport development: proceedings of the 78 International Scientific & Practical Conferenc* (pp. 86-87) Dnipro: *Dnipropetrovsk National University of Railway Transport* [in Russian]
14. Neduzha, L.O., & Shvets, A.O. (2021). Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia mitsnisnykh yakostei khrebtovoi balky vantazhnoho vahona [Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars]. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 1(73), 131–147 [in Ukrainian] Doi: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457>
15. Daunys, M., Putnaitė, D., Bazaras, Ž. (2009) Principles for modelling technological processes investigation into the strength and durability of automatic coupler SA-3 in railway carriages. *Transport*, 24(2), 83–92. Doi:10.3846/1648-4142.2009.24.83-92
16. Raschet vagonov na prochnost : uchebnoye posobiye dlya vuzov [Calculation of carriages for strength:] (1971) / L. A. Shadura. - 2-e izd.. ispr. i dop. *Moskva : Mashinostroyeniye*, 432 [in Russian].
17. Daunys, M., Putnaitė, D. (2005) Determination of lifetime for railway carriages automatic coupler SA-3. *Mechanika.-Kaunas: Technologija*, 2(52), 5-10.
18. Anghel, C., Dumitru, I., Faur, N., Branzei, N., Bogdan, R. (2013) The analysis of a damaged component from the connection system of the wagons. *Engineering Failure Analysis*, 29, 93- 107.
19. ДСТУ 7598 (2014) Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh) [Freight wagons. General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled)]. *Kyiv : DP«UkrNDNTs»* [in Ukrainian]

20. Krivorudchenko, V.F., Akhmedzhanov, R.A. (2005) *Sovremennyye metody tekhnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya detaley i uzlov podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta* [Modern methods of technical diagnostics and non-destructive testing of parts and assemblies of railway rolling stock]. *Moskva : Marshrut*, 436 [in Russian].
21. Jemec, V., Grum, J. (2005) Latest methods of non-destructive testing of railway vehicles. *The 8th international conference of the Slovenian society for non-destructive testing*, 69-79.
22. Hoddinot, D. S. (2004) Railway axle failure investigations and fatigue crack growth monitoring of an axle. // *Proc. Instn Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 283–292.
23. (Proekt) Vahony vantazhni. Neruiniivnyi kontrol detalei i skladovykh chastyn pid chas remontu. Pravyla orhanizatsii ta provedennia. [(Project) Freight cars. Non-destructive testing of parts and components during repair. Rules of organization and conduct]. (2016). *STP 0.8. JSC «Ukrainian railways»* [in Ukrainian]
24. Komplekt dokumentiv na tekhnolohichni protses vkhidnoho kontroliu vidpovidalnykh detalei ta vuzliv vantazhnykh vahoniv [A set of documents on the technological process of input control of responsible parts and components of freight cars]. (2019). *STP 04-018. JSC «Ukrainian railways»* [in Ukrainian]
25. Detali lyti zchipnykh ta avtozchepnykh prystroiv zaliznychnoho rukhomoho skladu. Zahalni tekhnichni umovy [Molded parts of coupler and automatic coupler devices of railway rolling stock. General specifications]. (2018) *DSTU GOST 22703 (GOST 22703–2012, IDT) Kyiv : DP«UkrNDNTs»* [in Ukrainian]
26. Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika : Spravochnik [Non-destructive testing and diagnostics: Handbook] (2003) / red. V. V. Klyuyev. *Moskva : Mashinostroyeniye*, 656 [in Russian].
27. Palanisamy, S., Nagarajah, R. & Iovenitti, P. (2007). Ultrasonic inspection of rough surface aluminium die castings. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 49. 160-164. Doi: <https://doi.org/10.1784/insi.2007.49.3.160>
28. Wilczek, A., Długosz, P. & Hebda, M. (2015). Porosity Characterization of Aluminium Castings by Using Particular Non-destructive Techniques. *Journal of Nondestructive Evaluation* 34, 26. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10921-015-0302-z>

Vladyslav Shaposhnyk¹, Oleksandr Shykunov²

¹. Associate Professor, Department «Cars and Cars Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan str., Dnipro, 49010, Ukraine

². Associate Professor, Department «Cars and Cars Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan str., Dnipro, 49010, Ukraine

THE PROBLEM OF BREAKS AUTOMATIC COUPLING

The problem of breaks automatic coupling is becoming urgent for outbound transport. In the robot, a number of defects are shown, which were found in the damaged car parts. Carrying out an analysis of the equipment of the vehicle will indicate the presence of a stock of performance, and if there is a defect in the deteriorated parts of the vehicle, it will be overwhelmed by the stock. An analysis of the normative documentation and methods in the control of car breakdowns is necessary to provide information on the methods of ruinous and non-rudimentary control, so that it can be done when preparing and repairing car breakdowns. Tom found the crocodile in the first place in the world of problems and is to blame for the increase in the quality of control to the body of the vehicle. Proponent is the acoustical control, and the very thin or mirror-thin method for the control of the shank of the autozchep in the screw hole before the wedge of the traction clamp. The robots of the methods runtyyu on the change in the amplitude of the signal when passing through the discontinuity of the metal, which allows the appearance of internal defects. These methods allow the appearance of significant internal defects such as metal discontinuities, but also to reduce the speed of car breakdowns through the appearance of this type of defect. On the basis of the obvious methods for the control of internal defects, the methods are projected that are irregular and can be stagnated to all auto-breakdowns due to minor preparation of the surface for control.

Keywords: automatic coupling, break, non-destructive diagnostics, ultrasonic control, shadow method, strength, reliability.

УДК 629.463.62

Олексій Фомін^{1*}, Альона Ловська²

¹ Професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

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

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ЗЧЛЕНОВАНОГО ТИПУ З КРУГЛИХ ТРУБ, ЗАВАНТАЖЕНОГО КОНТЕЙНЕРАМИ-ЦИСТЕРНАМИ

Проведено визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб, завантаженого контейнерами-цистернами. Дослідження проведені шляхом математичного моделювання. Розв'язок рівнянь руху здійснений в програмному комплексі MathCad. Встановлено, що при дії повздовжньої сили у 2,5 МН на передні упори автотягу, прискорення на першій з боку прикладення сили секцію вагона-платформи складає $27,7 \text{ м/с}^2$, а на другій – $24,4 \text{ м/с}^2$.

Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи розглянуто можливість використання на ньому концепту упряжного пристрою, як альтернативного варіанту типовому автотягу. Гасіння кінетичної енергії удару при цьому здійснюється за рахунок сил в'язкого опору, що виникають у концепті.

Запропонована реалізація дозволяє зменшити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи на 10% у порівнянні з використанням типового автотягеного пристрою.

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

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, концепт упряжного пристрою.

Вступ. Підвищення ефективності використання залізничного транспорту в міжнародному сполученні зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію інноваційних конструкцій вагонів. Відомо, що найбільшого розповсюдження в міжнародному сполученні дістали вагони-платформи, в тому числі зчленованого типу. Особливістю вагонів-платформ зчленованого типу є те, що їх несуча конструкція складається з двох секцій, які спираються на три візки. Взаємодія секцій між собою здійснюється за рахунок вузла зчленування, наприклад, SAC-1.

Дані вагони в процесі експлуатації можуть зазнавати дії значних повздовжніх навантажень, що негативно впливає на міцність їх несучих конструкцій, а також безпеку руху. З метою зменшення динамічної навантаженості вагонів-платформ зчленованого типу важливим є удосконалення їх конструкцій шляхом використання принципово нових технічних рішень. Це сприятиме забезпеченню міцності (втомної) міцності несучих конструкцій, зменшенню витрат на ремонти в експлуатації, збереженню вантажів, зокрема, контейнерів (контейнерів-цистерн) або зйомних кузовів, забезпеченню безпеки руху тощо.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Дослідження впливу зміщення вантажу на показники руху вагона-платформи проведено в роботі [1]. Отримано залежності основних динамічних показників з огляду на величину швидкості руху.

Визначення динамічної навантаженості та міцності довгобазного вагона висвітлюється у роботі [2]. Проведені дослідження підтвердили доцільність прийнятих при проектуванні вагона технічних рішень.

Важливо сказати, що при проектуванні даних несучих конструкції вагонів не враховано заходів щодо зменшення їх динамічної навантаженості при дії циклічних навантажень.

Аналіз несучої конструкції вагона-платформи проведено в роботі [3]. Особливістю вагона-платформи є можливість регулювання корисної довжини залежно від габаритів вантажу, який на ньому перевозять.

В роботі [4] проводиться аналіз несучої конструкції вагона для інтермодальних перевезень вантажів. Особливістю несучої конструкції вагона є наявність поворотної платформи для завантаження та розвантаження.

Однак в розглянутих роботах дослідженню поздовжньої динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів за експлуатаційних режимів уваги не було приділено.

Визначення динамічної навантаженості вагона проводиться у роботі [5]. До уваги прийнятий випадок використання різних типів візків під вагонами. Проаналізовано вплив технічних характеристик візків на динамічні показники вагона.

Теоретичні та експериментальні дослідження навантаженості несучих конструкцій вантажних вагонів висвітлюється у роботі [6]. Приклад використання запропонованого підходу засвідчив його працездатність та ефективність, а також правильність спрямування відповідних науково-дослідних робіт.

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

В роботах [7, 8] запропоновані та реалізовані заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів при експлуатаційних режимах. Дослідження проведені шляхом математичного моделювання та підтверджені комп'ютерним. Однак авторами не приділялося уваги питанням зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій довгобазних вагонів.

Аналіз літературних джерел [1–8] дозволяє зробити висновок, що питанням визначення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів зчленованого типу з круглих труб, завантажених контейнерами-цистернами досі не приділялося належної уваги. Це викликає необхідність проведення відповідних досліджень та напрацювань в цьому напрямку.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб, завантаженого контейнерами-цистернами шляхом математичного моделювання. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

1. Скласти розрахункову схему вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб для визначення поздовжньої навантаженості несучої конструкції;
2. Провести моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб при використанні типового автозчепного пристрою;
3. Провести моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб при використанні концепту упряжного пристрою.

Матеріали та методи дослідження. З метою зменшення матеріалоемності вагона-платформи запропоновано впровадження у його несучу конструкцію круглих труб [9]. На базі запропонованої конструкції вагона-платформи створено вагон-платформу зчленованого типу [10], (рис. 1).

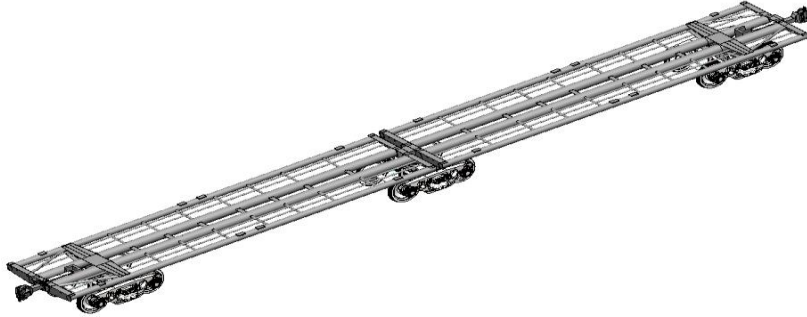


Рис. 1. Вагон-платформа зчленованого типу з круглих труб

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами-цистернами при експлуатаційних режимах навантаження (розтягнення-ривок) проведено математичне моделювання. Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого контейнерами-цистернами, наведена на рис. 2. При цьому використано математичну модель розроблену проф. Богомазом Г. І. [11]. Дослідження проведені в плоскій системі координат. Враховано, що на передні упори автовозу діє навантаження у 2,5 МН [12, 13]. В якості прототипу обрано контейнер-цистерну типорозміру 1СС.

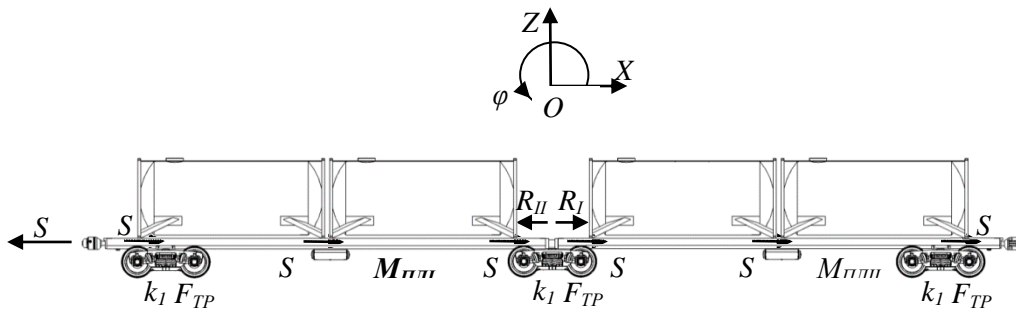


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-платформи

Контейнера-цистерни розглянуті як прикріплені маси відносно рами вагона-платформи. Враховано, що контейнера-цистерни, розміщені на вагоні-платформі, мають однакову завантаженість котла наливним вантажем.

Рівняння руху при цьому мають вигляд:

$$M'_{III_1} \cdot \ddot{x}_{III_1} + M_{III_1} \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_{III_1} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i - R_{II}, \quad (1)$$

$$I_{III_1} \cdot \ddot{\varphi}_{III_1} + M_{III_1} \cdot h \cdot \ddot{x}_{III_1} - g \cdot \varphi_{III_1} \cdot M_{III_1} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \dot{\Delta}_2), \quad (2)$$

$$M_{III_1} \cdot \ddot{z}_{III_1} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

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

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

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

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

$$M'_{\Pi\Pi\Pi} \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi\Pi} = -\sum_{i=1}^2 S_i + R_I, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I_{\Pi\Pi\Pi} \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi\Pi} - g \cdot \varphi_{\Pi\Pi\Pi} \cdot M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + \\ + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \end{aligned} \quad (9)$$

$$M_{\Pi\Pi I} \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi I} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (10)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij}\right) \cdot \ddot{x}_i^{II} + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot \ddot{\varphi}_i^{II} - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{II} = S^{II}_i, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \left(I_{\alpha} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2\right) \cdot \ddot{\varphi}_i^{II} + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot \ddot{x}_i^{II} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{II} - \\ - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot \varphi_i^{II} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij}\right) \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi II} = 0, \quad (13)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{II} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij}^{II} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_i^{II} + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \xi_{ij}^{II} = 0, \quad (14)$$

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

$$S_i = f_{mp} \cdot \text{sign} \cdot (x_{\Pi\Pi I} - x_{ij})$$

де $M_{\Pi\Pi I}$ – маса i -ї секції вагона-платформи; $I_{\Pi\Pi I}$ – момент інерції i -ї секції вагона-платформи; S_a – величина повздовжньої сили, яка діє на передні упори автозчепу; f_{mp} – амплітудне значення сили сухого тертя; m_T – маса візка; I – момент інерції колісної пари; r –

радіус середнезношеного колеса; n – кількість вісей візка; l – половина бази i -ої секції вагона-платформи; F_{mp} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1, k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона-платформи; k – кількість тонн коливань наливного вантажу; m_i – маса тіла, яке еквівалентне i -му контейнеру-цистерні з частиною наливного вантажу, що не приймає участі у переміщенні відносно котла; m_{ij} – маса j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; z_{ci} – висота центру ваги контейнера-цистерни; c_{ci} – відстань від площини $z_i = 0$ до точки закріплення j -го маятника у i -му контейнері-цистерні; l_{ij} – довжина j -го маятника; I_θ – приведений момент інерції i -го контейнера-цистерни та наливного вантажу, що не приймає участі у русі відносно котла; I_{ij} – момент інерції маятника; x, φ, z – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо повздовжньої вісі та вертикальному переміщенню вагона-платформи; x_i, φ_i – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому та кутовому навколо повздовжньої вісі переміщенню контейнера-цистерни; ζ_{ij} – кут відхилення j -го маятника від вертикалі.

Вертикальні переміщення контейнера-цистерни відносно рами вагона-платформи не враховувалися. До уваги також приймалася податливість наливного вантажу відносно стінок котла контейнера-цистерни. Рух наливного вантажу описувався сукупністю математичних маятників [11].

Визначення гідродинамічних характеристик наливного вантажу здійснювалося за методикою, наведеною у [14]. У якості наливного вантажу прийнятий бензин. На підставі проведених розрахунків для випадку максимально-допустимої завантаженості котла контейнера-цистерни у відповідності з [15], отримано значення $m_{ij} \approx 6,8$ т, $I_{ij} \approx 250$ т·м². При цьому враховано, що котел заповнений на 95%.

Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено за допомогою метода Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad [16 – 19]. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю.

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що прискорення, яке діє на першу з боку прикладення сили секцію вагона-платформи складає 27,7 м/с², а на другу – 24,4 м/с² (рис. 3).

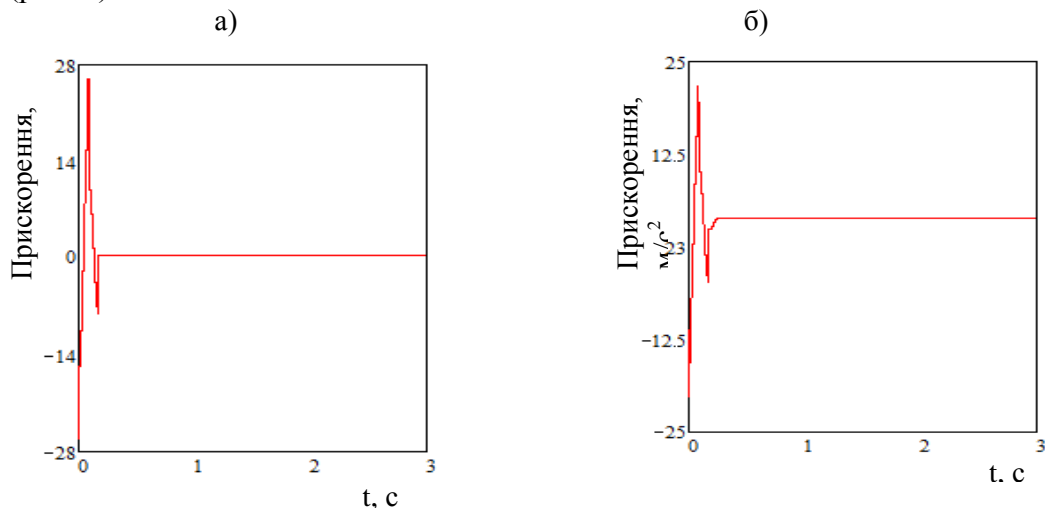


Рис. 3. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу
а) перша з боку дії сили секція; б) друга з боку дії сили секція

Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи розглянуто можливість використання на ній концепту упряжного пристрою, як альтернативного варіанта типовому автозчепу (рис. 4), [9].

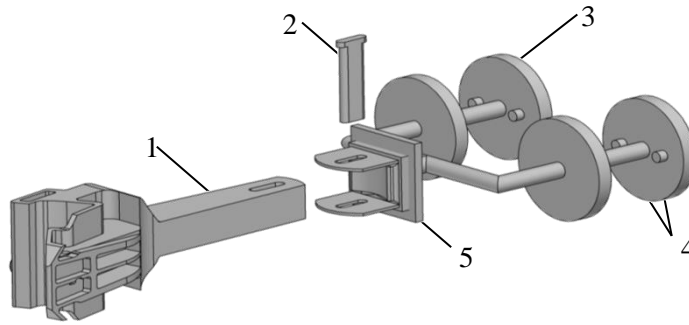


Рис. 4. Концепт уп'язного пристрою автозчепу

1 – корпус автозчепу; 2 – клин; 3 – поршень; 4 – дросельні клапани; 5 – опорна планка

При цьому консольні частини хребтової балки вагона-платформи заповнені в'язкою речовиною з демпфуючими властивостями. Для перетворення кінетичної енергії удару в енергію дисипації в концепт входить поршень з двома дросельними клапанами (впускним та випускним). Передача повздовжнього навантаження від корпусу автозчепу на концепт здійснюється через опорну планку, яка посередництвом вилки передає його на дводискові поршні. При переміщенні поршнів в бік п'ятника вагона відкриваються впускні клапани, при цьому випускні клапани – закриті. При зворотньому переміщенні поршнів (ривок, стискання) відкриваються випускні клапани поршнів, впускні – закриті. Коефіцієнт в'язкого опору, що створюється концептом уп'язного пристрою повинен бути не нижче за 70 кН/с · м.

Рівняння руху вагона-платформи, завантаженого контейнерами-цистернами, при цьому мають вигляд:

$$M'_{\Pi\Pi_1} \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi_1} + M_{\Pi\Pi_1} \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi_1} = S_a - \sum_{i=1}^2 S_i - R_{\Pi} - \beta \cdot \dot{x}_{\Pi\Pi_1}, \quad (15)$$

$$I_{\Pi\Pi_1} \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi_1} + M_{\Pi\Pi_1} \cdot h \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi_1} - g \cdot \varphi_{\Pi\Pi_1} \cdot M_{\Pi\Pi_1} \cdot h = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (16)$$

$$M_{\Pi\Pi} \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (17)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_i^I + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \ddot{\varphi}_i^I - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^I = S_i^I, \quad (18)$$

$$\left(I_{\alpha} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2 \right) \cdot \ddot{\varphi}_i^I + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \ddot{x}_i^I + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^I - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \right) \cdot \varphi_i^I = 0, \quad (19)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij} \right) \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi_1} = 0, \quad (20)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^I - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij}^I - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_i^I + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^I = 0, \quad (21)$$

$$M'_{\Pi\Pi\Pi} \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi\Pi} = -\sum_{i=1}^2 S_i + R_I, \quad (22)$$

$$I_{\Pi\Pi\Pi} \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi\Pi\Pi} + M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot h \cdot \ddot{x}_{\Pi\Pi\Pi} - g \cdot \varphi_{\Pi\Pi\Pi} \cdot M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot h = l \cdot F_{TP}(\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (23)$$

$$M_{\Pi\Pi\Pi} \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi\Pi} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP}(\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2), \quad (24)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij}\right) \cdot \ddot{x}_i^{\text{II}} + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot \ddot{\varphi}_i^{\text{II}} - \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{\text{II}} = S^{\text{II}}_i, \quad (25)$$

$$\left(I_{\theta} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}^2\right) \cdot \ddot{\varphi}_i^{\text{II}} + \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot \ddot{x}_i^{\text{II}} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{\text{II}} - g \cdot \left(m_i \cdot z_{ci} + \sum_{j=1}^k m_{ij} \cdot c_{ij}\right) \cdot \varphi_i^{\text{II}} = 0, \quad (26)$$

$$\left(m_i + \sum_{j=1}^k m_{ij}\right) \cdot \ddot{z}_{\Pi\Pi\Pi} = 0, \quad (27)$$

$$I_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{\text{II}} - m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{x}_{ij}^{\text{II}} - m_{ij} \cdot c_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_i^{\text{II}} + g \cdot m_{ij} \cdot l_{ij} \cdot \ddot{\xi}_{ij}^{\text{II}} = 0, \quad (28)$$

де β – коефіцієнт в'язкого опору, що створюється концептом упругого пристрою. Результати розрахунку наведені на рис. 5.

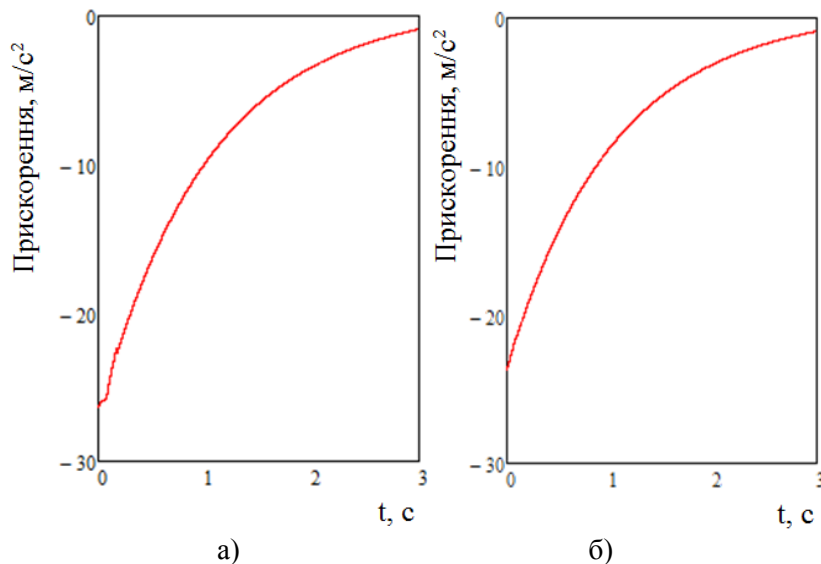


Рис. 5. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу
а) перша з боку дії сили секція; б) друга з боку дії сили секція

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що прискорення, яке діє на першу з боку прикладення сили секцію вагона-платформи склало близько $25,0 \text{ м/с}^2$, а на другу – близько $22,0 \text{ м/с}^2$.

Запропонована реалізація дозволяє зменшити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи на 10% у порівнянні з використанням типового автозчепного пристрою.

Висновки

1. Складено розрахункову схему вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб для визначення повздовжньої навантаженості несучої конструкції. Враховано, що несуча конструкція завантажена чотирма контейнерами-цистернами типорозміру 1СС. Дослідження проведені в плоскій системі координат. Враховано, що на передні упори автозчепу діє повздовжня сила у $2,5 \text{ МН}$.

2. Проведено моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб при використанні типового автозчепного пристрою. При цьому враховано, що котел заповнений на 95%. Розв'язок рівнянь руху здійснений в програмному комплексі MathCad. Результати досліджень дозволили зробити висновок, що прискорення, яке діє на першу з боку прикладення сили секцію вагона-платформи складає $27,7 \text{ м/с}^2$, а на другу – $24,4 \text{ м/с}^2$.

3. Проведено моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб при використанні концепту упряжного пристрою. При цьому коефіцієнт в'язкого опору, що створюється концептом упряжного пристрою повинен бути не нижче за $70 \text{ кН/с} \cdot \text{м}$. Визначено, що прискорення, яке діє на першу з боку прикладення сили секцію вагона-платформи складає $25,0 \text{ м/с}^2$, а на другу – близько $22,0 \text{ м/с}^2$.

Запропоноване рішення дозволяє зменшити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи на 10% у порівнянні з використанням типового автозчепного пристрою.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених “Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів”, яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shatunov O. V., Shvets A. O. Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. Наука та прогрес транспорту. 2019. № 2 (80). С. 127–143. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>.
2. WBN Waggonbau Niesky GmbH: Developing a flexible platform of freight wagons. Intern. Edition. 2016. № 1. P. 46.
3. Nandan Shivendra, Trivedi Rishikesh, Kant Satyajeet, Ahmad Javed, Maniraj M. Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions. Preprint. 2020. March. <https://www.researchgate.net/publication/340001068>
4. Šťastniak Pavol, Kurčík Pavol, Pavlík Alfréd. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 235(2). 00030, doi: 10.1051 / mateconf / 201823500030
5. Myamlin Sergey, Povilas Lingaitis Leonas, Daildyka Stasys, Vaičiūnas Gediminas, Bogdevičius Marijonas, Bureika Gintautas. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. Transport. 2015. Vol. 30(1). P. 88–92. doi:10.3846/16484142.2015.1020565
6. Недужа Л. О., Швецъ А. О. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2018, № 1 (73). P. 131 – 147. doi: 10.15802/stp2018/123457
7. Fomin O., Lovska A. Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. Engineering Science and Technology an International Journal. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>

8. Fomin Oleksij, Alyona Lovska, Radkevych Valentyna, Horban Anatoliy, Skliarenko Inna, Gurenkova Olga. The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14, No. 21. P. 3747–3752.
9. Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Pavel Kučera, Václav Píštěk. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Science*. 2020. Vol. 10. 7441. doi:10.3390/app10217441
10. Фомін О. В., Ловська А. О. Визначення міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. № 2 (86). С. 92–102.
11. Богомаз Г. И., Мехов Д. Д., Пилипченко О. П., Черномашенцева Ю. Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Зб. наук. праць “Динаміка та керування рухом механічних систем”*. Київ: АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87 – 95.
12. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
13. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
14. Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосных железнодорожных цистерн с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.22.07 “Подвижной состав железных дорог и тяга поездов” / Ю. П. Кривовязюк. – Днепропетровск, 1986. 157 с.
15. Правила перевозок опасных грузов. К соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении. Том 3. ОСЖД, 2011. 531 с.
16. Vatulia G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 301–307.
17. Kitov Y., Verevicheva M., Vatulia G., Orel Y., Deryzemlia S. Design solutions for structures with optimal internal stress distribution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 133(1–3). 03001.
18. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E., Kharchenko M. E. Relationships between the ultimate strengths of polymer composites in static bending, compression, and tension. *Mechanics of Composite Materials*. 2019. Vol. 52, Issue 2. P. 259–266.
19. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 7 (108). P. 21 – 29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162

REFERENCES

1. Shatunov O. V., Shvets A. O. (2019). Study of dynamic indicators of flat wagon with load centre shift. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 2 (80).127–143. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165160>. (in English).
2. (2016). WBN Waggonbau Niesky GmbH: Developing a flexible platform of freight wagons. *Intern. Edition*, 1. 46. (in English).
3. Nandan Shivendra, Trivedi Rishikesh, Kant Satyajeet, Ahmad Javed, Maniraj M. (2020). Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions. *Preprint*. March. <https://www.researchgate.net/publication/340001068> (in English).
4. Štastniak Pavol, Kurčík Pavol, Pavlík Alfréd. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235(2). 00030, doi: 10.1051 / mateconf / 201823500030 (in English).
5. Myamlin Sergey, Povilas Lingaitis Leonas, Dailydka Stasys, Vaičiūnas Gediminas, Bogdevičius Marijonas, Bureika Gintautas. (2015). Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 30(1). 88–92. doi:10.3846/16484142.2015.1020565 (in English).
6. Neduzha L. O., Shvec A. O. (2018). Teoretichni ta eksperimentalni doslidzhennya micnisnih yakostej hrebtovoyi balki vantazhnogo vagona. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu*, 1 (73). 131 – 147. doi: 10.15802/stp2018/123457 (in Ukrainian).
7. Fomin O., Lovska A. (2020). Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 23, 6. 1455–1465. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010> (in English).
8. Fomin Oleksij, Alyona Lovska, Radkevych Valentyna, Horban Anatoliy, Skliarenko Inna, Gurenkova Olga. (2019). The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14, 21, 3747–3752. (in English).
9. Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Pavel Kučera, Václav Píštěk. (2020). Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Science*, 10, 7441. doi:10.3390/app10217441 (in English).
10. Fomin O. V., Lovska A. O. (2020). Vznachennya micnosti nesuchoyi konstrukciyi vagona-platformi zchlenovanogo tipu z kruglih trub. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo nacionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2 (86), 92–102. (in Ukrainian).

11. Bogomaz G. I., Mehov D. D., Pilipchenko O. P., Chernomashenceva Yu. G. (1992). Nagruzhenost kontejnerov-cistern, raspolozhennyh na zheleznodorozhnoj platforme, pri udarah v avtoscepku. *Zb. nauk. prac "Dinamika ta keruvannya ruhom mehanichnih sistem"*, 87–95.

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

13. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight cars. Strength and Dynamic Requirements], 54. GOST 33211-2014 (2016). (in Russian).

14. Krivovyazyuk Yu. P. (1986). Ocenka ekvivalentnoj nagruzhenosti chetyrehosnyh zheleznodorozhnyh cistern s zhidkimi gruzami razlichnoj plotnosti pri prodolnyh udarah: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.22.07 "Podvizhnoj sostav zheleznyh dorog i tyaga poezdov", Dnepropetrovsk, 157. (in Russian).

15. (2011). Pravila perevozok opasnyh gruziv. K soglasheniyu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshenii. Tom 3, OSZhD, 531. (in Russian).

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

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

18. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E., Kharchenko M. E. (2019). Relationships between the ultimate strengths of polymer composites in static bending, compression, and tension. *Mechanics of Composite Materials*, 52, 2, 259–266. (in English).

19. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 7 (108), 21 – 29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162 (in English).

Oleksij Fomin¹, Alyona Lovska²

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

² Associate Professor of Wagons Chair, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC LOAD OF THE JOINT-PLATFORM OF THE JOINT TYPE FROM ROUND PIPES LOADED BY TANKER CONTAINERS

The dynamic loading of the load-bearing structure of the articulated platform car made of round pipes loaded with tank containers was determined. The research was conducted by mathematical modeling. The solution of the equations of motion is carried out in the MathCad software package. It is established that under the influence of a longitudinal force of 2.5 MN on the front stops of the autocoupling, the acceleration on the first section of the platform car is 27.7 m/s² from the side of the force application, and on the second - 24.4 m/s².

To reduce the dynamic load of the load-bearing structure of the platform car, the possibility of using the concept of a harness device on it as an alternative to a typical self-coupling device is considered. The quenching of the kinetic energy of the impact is carried out due to the viscous resistance forces arising in the concept.

The proposed implementation allows to reduce the dynamic load of the load-bearing structure of the platform car by 10% compared to the use of a standard self-coupling device.

The conducted researches will promote creation of innovative designs of cars-platforms and increase of efficiency of use of railway transport.

Keywords: transport mechanics, platform car, load-bearing structure, dynamic loading, harness device concept.

Олексій Фомін^{1}, Альона Ловська², Дмитро Скуріхін³, В'ячеслав Бондаренко⁴*

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

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

³ Доцент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID <http://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

⁴ Доцент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID <http://orcid.org/0000-0002-3746-5157>

* Автор, відповідальний за листування: fomin1985@ukr.net

МОНІТОРИНГ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

В публікації запропонована моніторингова технологія автоматизації виробництва на основі технологій автоматичної ідентифікації, яка дозволить відстежувати у реальному масштабі часу хід виконання технологічних процесів, забезпечити міжцехову логістику, а також виконати функції безпеки доступу та ідентифікації на виробництві.

На прикладі одного з вагонних депо розглянуті типові недоліки організації виробничого процесу, обліку та ідентифікації деталей підприємства залізничного транспорту. Запропоновані шляхи та етапи впровадження технологій автоматичної ідентифікації, зокрема, вказано, що введення системи моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту доцільно робити поетапно, починаючи з технологій штрихкодуювання. Детально розкрито процес моніторингу підприємств залізничного транспорту, взаємодію суб'єктів і об'єктів виробничого процесу.

Ключові слова: вагони, моніторинг, штрих-код, радіомітка, виробничий процес, автоматична ідентифікація, карта технологічна, логістика складська.

Вступ. Виробничі підприємства обробляють великі обсяги паперових даних, і часто описи передаються з паперу в електронні системи та назад багато разів, щоб вирішувати різні службові завдання. Використання паперу в такому обсязі вкрай марнотратне не лише щодо часу, витраченого на передачу даних, але й через похибки та помилки, які можна внести, як при введенні, так і при зчитуванні інформації.

У виробничих процесах на вагонобудівних та вагоноремонтних заводах та депо використовується застаріла схема обліку деталей, не ведеться облік пересування обладнання та персоналу. Не забезпечується автоматизований доступ персоналу, відсутній облік фактичного виконання, початку та закінчення технологічних операцій.

В публікації через призму технологій автоматичної ідентифікації розглянута моніторингова технологія автоматизації виробництва, яка дозволять відстежувати у реальному масштабі часу хід виконання технологічних процесів, забезпечити

міжцехову логістику, а також виконати функції безпеки доступу та ідентифікації на виробництві

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Одним із прикладів реалізації системи оперативного обліку на виробництві може служити система TechnologiGS. В даній системі реалізовані функції: лімітно-забірних карток та видачі матеріалів по цехах, видачі матеріалів та деталей в коморах, контроль фактичного виконання робіт, контроль поточного стану обробки деталей та ін. [2]. Завдання моніторингу на виробництві вирішувалися також авторами публікацій [3, 4]. Застосування технологій автоматичної ідентифікації в експлуатації рухомого складу залізниць розкрито в праці [5]. Питання виробничої логістики вагоноремонтних підприємств досліджувалися авторами [6-9].

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка способу моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту, який включає маркування та ідентифікацію об'єктів та суб'єктів виробничих процесів на основі технологій штрих-кодування та радіочастотної ідентифікації, за рахунок чого скоротиться виробничий цикл, знизиться собівартість виробів та підвищиться продуктивність праці.

Матеріали та методи дослідження. Технології автоматичної ідентифікації дуже поширені в торгівлі та в складському господарстві. Кожен товар у супермаркеті має ідентифікаційний ярлик і в цілому важко уявити торгівлю без маркування. Деякі більш дорогі товари мають додатково захисний ярлик для захисту від крадіжки.



Рис. 1. Застосування штрих-кодів в роздрібній торгівлі і складському господарстві

На основі технологій автоматичної ідентифікації пропонується розглянути і сучасну моніторингову технологію автоматизації виробництва, яка дозволяє відстежувати у реальному масштабі часу хід виконання технологічних процесів, забезпечити міжцехову логістику, а також виконати функції безпеки доступу та ідентифікації на виробництві.

Типові недоліки технології організації виробничого процесу, обліку та ідентифікації деталей підприємства вагонного господарства розглянемо на такому прикладі:

деталю чи вузлам присвоюється заводські номери, які заносяться в ескізні специфікації у паперовому вигляді. Таких ескізних специфікацій 35 папок, по 50 сторінок кожна, які знаходяться у кожному підрозділі підприємства;

цех, який виготовляє конкретну деталь, здає готову продукцію на склад по здаточним накладним, комірник їх приймає. Далі цех, якому потрібна деталь, виписує її за потребою. За 1 зміну таких документів, які потребують підписів, накопичується безліч;

за допомогою спеціальних програм, розроблених у 1990 р., відділ автоматизації систем управління виробництвом обробляє здаточні, наряди, цінники, матеріальні та трудові нормативи, закази та вносить у нормативно-довідкову інформацію, робляться звіти;

Центральна заводська лабораторія проводить перевірку засобів виміральної техніки та засобів допускового контролю. Для цього, окрім гравірованих номерів за кресленням, шаблонам присвоюються ідентифікаційні номери лабораторії та заносяться у базу у паперовому вигляді. Шаблонів на підприємстві близько 3000 шт;

пересування деталей, вузлів та вагонів на підприємстві вимагає заповнення великої кількості документів.

Одним з найпопулярніших і найпростіших способів ідентифікації є штрих-кодування. Штрих коди бувають лінійні та двомірні. Лінійні штрих коди зчитуються в одному напрямку по горизонталі. Найбільш розповсюджені EAN-8, EAN-13, Code39, Code128.

Code39 найбільш розповсюджений і використовується на різних виробництвах. Цей тип коду не вміщує контрольних розрядів, починається та закінчується спеціальним стоп-символом, дозволяє кодувати будь-яку кількість символів (обмежено шириною сканера). Штрих-код Code39 складається з символу (знаку) - набору світлих та темних смуг, які кодують цифру, літеру або службовий символ, та модулю – мінімальної ширини світлої або темної смуги.

Двомірні штрих-коди призначені для кодування великого об'єму інформації на мінімальній площі. Розшифровка такого коду проводиться у двох вимірах - по горизонталі та вертикалі. Двомірні коди можуть існувати як самостійні джерела інформації без звернення у бази даних, чим забезпечується повна мобільність деталей чи вузлів. Оскільки штрих код друкується та зчитується машинами, їх обробка займає менше часу з більшою точністю, чим ввід даних вручну. При ручному ввіді у середньому виникає одна помилка на 300 позицій. При роботі з штрих кодом, помилка складає менше однієї на мільйон зчитаних позицій. Швидкість вводу інформації при зчитуванні штрих кодів у 100 разів швидше ручного вводу, що приводить до значного підвищення ефективності та продуктивності будь-якої операції. З використанням технології штрих кодування ефективно використовується робочий час, скорочується персонал для проведення ідентифікаційних операцій, ведеться точний облік деталей, вузлів, інструменту, обладнання, персоналу. Персонал підприємства отримує оперативну інформацію, там де йому потрібно.

Технологія штрихового кодування в цілому включає в себе такі операції:

- ідентифікацію об'єкта шляхом присвоєння цифрового, цифрового коду;
- подання коду у вигляді штрихів з використанням певної символіки;
- нанесення штрихового коду на фізичні носії (деталь, вузол, упаковку, документи, етикетки);

- зчитування штрихових кодів;

- декодування штрихових кодів у машинні, визначення літерових, цифрових, літеро-цифрових даних та передача їх у комп'ютер.

Галузі застосування штрих-кодування різноманітні:

- інвентаризація – штрих коди активно використовуються на складах для обліку деталей, обліку обладнання у виробничих цехах, запасів матеріалів;

- ідентифікація – посвідчення особистості робітника з надрукованим штрих-кодом використовується компаніями у всьому світі;

системи реєстрації часу – штрих-коди використовуються для реєстрації приходу чи виходу з роботи персоналу, що дозволяє позбавити від паперових розкладів та автоматично розраховувати зарплату.

У технологічний процес штрих-кодування у вагонобудівних і вагоноремонтних підприємствах доцільно включити наступне обладнання:

стаціонарні персональні комп'ютери, під'єднані до загальнозаводської мережі або точкам радіодоступу;

принтери для друкування штрих-кодів та супроводжувальних документів;

ручні сканери штрих-кодів;

мобільні промислові мікрокомп'ютери- термінали збору даних.

Обладнання розміщується у кожному цеху, дільниці, складі, термінали збору даних приєднані до точок радіодоступу. Штрих-код присвоюється всім паперовим, електронним документам, цехам, дільницям, робочим місцям, вагонам, вузлам, деталям, обладнанню, робочому інструменту, шаблонам, картам технологічного процесу, всьому персоналу підприємства. При видачі матеріалів у цех формується лімітна карта, якої присвоюється штрих-код, комірником він зчитується та формується обліковий витратний документ. Необхідні супроводжувальні документи (накладна) формуються і заповнюються автоматично, вказується реальна кількість виданого матеріалу. Пошук необхідного документа складського обліку робиться автоматично по зчитаному штрих-коду.

Розташування штрих-коду на поверхні кочення коліс доцільно для виробників коліс, тому що ідеально підходить для швидкого сканування великої кількості коліс, але незручно для виробників колісних пар, так як мітка стає нечитабельною після двох обертів по рейці (рис. 2).

В той же час розташування штрих-коду на колісному диску доцільно для виробників колісних пар, так як дає можливість легко сканувати за допомогою фіксованих сканерів, мітки захищені на всьому протязі процесу складання та доступні навіть на етапі складання вагону. Системи контролю технічного стану колісних пар залізничного рухомого складу розглядаються у таких роботах авторів [10-15].

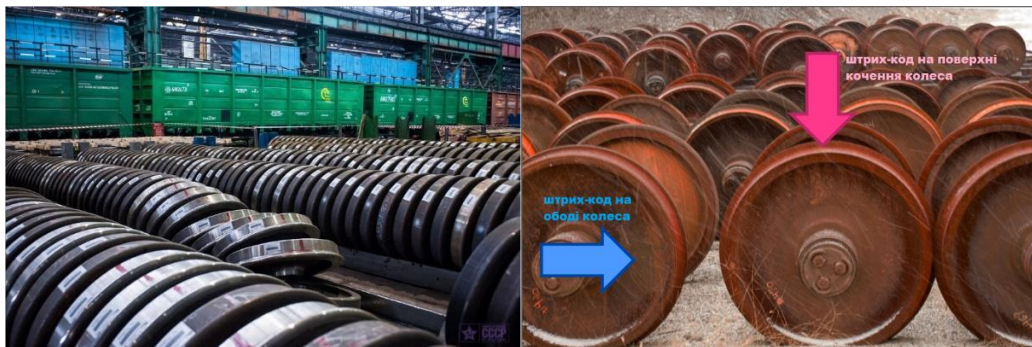


Рис. 2. Варіанти розташування штрих-коду на елементах колісної пари

Штрих-кодування є складовою комплексної системи моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту розробленої та запатентованої на кафедрі вагонів Українського державного університету залізничного транспорту [1].

Пропонована розробка включає маркування та ідентифікацію об'єктів та суб'єктів виробничих процесів на основі технологій штрих-кодування та радіочастотної

ідентифікації, за рахунок чого планується скоротити виробничий цикл, знизити собівартість виробів та підвищити продуктивність праці.

Пропонований спосіб моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту здійснюють таким чином. Попередньо на кожен об'єкт чи суб'єкт виробничого процесу 10 за технологіями 12 наносять унікальний номер у вигляді штрих-коду або радіочастотної мітки 9 (рис. 3). Унікальними номерами позначають переважно персонал 15, вагон 18 та його елементи 13, виробничі приміщення, площі, позиції потокової лінії та робочі місця 17, виробничі операції 19, виробниче обладнання та оснастку 14, паперову документацію та креслення 16. На локальному сервері підприємства 2 або веб-сервері 1 формують базу даних, до якої заносять всі унікальні номери об'єктів та суб'єктів 10 разом з їх повним електронним описом. У якості електронного опису є переважно особисті відомості про працівника з фотографією, креслення, технічна характеристика та фотографії вузлів та деталей вагона або інструмента, технічний та технологічний паспорти вагона, технологічні та географічні карти, довідкова література та керівна документація. Зв'язок між промаркованим об'єктом чи суб'єктом 10 та його електронним описом у базі даних здійснюють застосовуючи переважно технології 11 та зчитуючі пристрої 8. Зчитуючи код з об'єкта чи суб'єкта 10 відкривають його електронний опис на комп'ютерах 3,4 або заносять інформацію у базу даних серверів 1, 2.

Автоматизовані робочі місця (АРМ) 4 взаємодіють зі зчитуючими пристроями 8 за допомогою інтерфейсу 7. По каналах 5, використовуючи дротову (LAN) або бездротову (WLAN) технології, забезпечують зв'язок АРМ 4 між собою та локальним сервером підприємства 2, локального сервера підприємства 2 з користувачами 3. По каналах 6 забезпечують зв'язок веб-сервера 1 з користувачами 3 та локальним сервером підприємства 2.

Для кожного вагона, враховуючи його елементну базу, на локальному сервері підприємства 2 або веб-сервері 1 формують технологічний паспорт, який поповнюють, оновлюють та зберігають протягом життєвого циклу вагона. Технологічний паспорт містить відомості переважно про елементну базу вагона, контрольно-діагностичні, технічні та технологічні параметри, норми часу на операції, відомості про виробниче обладнання та оснастку, техніко-економічні показники, технологічну документацію, графіки та трудомісткість виконання робіт, результати контролю, також у технологічний паспорт заносять дані про всі несправності та відмови, які були виявлені протягом життєвого циклу вагона та відомості про їх усунення.

Відповідно до виробничого замовлення, плану підприємства та технологічного паспорту вагона, для кожного цеха або відділення на сервері підприємства або веб-сервері автоматично формують завдання у вигляді технологічної карти (рис. 4). Технологічна карта містить: перелік операцій 20, що очікують на виконання, відведений час на їх виконання 21 та виконавців 26, вимоги на видачу та замовлення запчастин 27, матеріалу та інструменту 25. Фіксацію виконаних операцій технологічного процесу, контроль послідовності операцій, видачу та замовлення запчастин, матеріалу, оснастки та інструменту здійснюють шляхом зчитування з технологічної карти штрих-кодів 9, попередньо нанесених шляхом друкування біля кожної операції або групи операцій або шляхом зчитування штрих-коду або радіочастотної мітки безпосередньо з ярлика об'єкта чи суб'єкта.

Кожен робітник має картку видачі інструменту з штрих-кодом, при одержанні інструменту зчитується штрих-код інструменту та персональний штрих-код робітника,

дані заносяться у базу. Пересування деталей по цехам створюється за допомогою модулю пересування деталей. З супроводжувальної карти зчитується штрих-код, програма автоматично визначає підрозділ-одержувач згідно із прохідного технологічного процесу. Готова деталь супроводжується паперовою накладною із штрих-кодом. Накладна передається у бухгалтерію заводу для обробки.

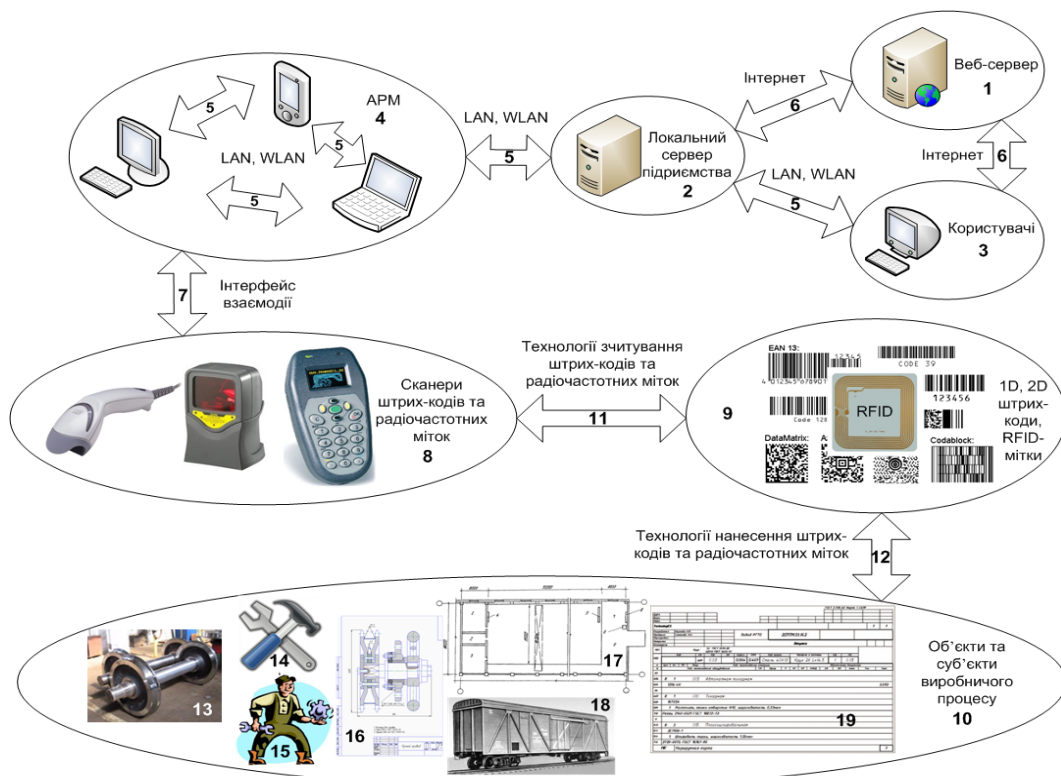


Рис. 3. Функціональна схема способу моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту

Операції 1...P	Регламентований час	Затримка	Обладнання	Оснастка	Інструмент	Виконавець	Запчастина
Операція 1 [Barcode]	ГОД.ХВ.СЕК	[Barcode]	Назва [Barcode]	Назва [Barcode]	Назва [Barcode]	П.І.Б. [Barcode]	Назва [Barcode]
Операція 2 [Barcode]	ГОД.ХВ.СЕК	[Barcode]	Назва [Barcode]	Назва [Barcode]	Назва [Barcode]	П.І.Б. [Barcode]	Назва [Barcode]
...
Операція P [Barcode]	ГОД.ХВ.СЕК	[Barcode]	Назва [Barcode]	Назва [Barcode]	Назва [Barcode]	П.І.Б. [Barcode]	Назва [Barcode]

20 21 22 23 24 25 26 27
9

Рис. 4. Технологічна карта

Введення системи моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту доцільно робити поетапно і починати саме зі штрих-кодування:

1. ідентифікація персоналу
2. присвоєння штрих-кодів деталям, вузлам, документам
3. введення виробничих програм.
4. ідентифікація цехів, підрозділів, робочих місць
5. введення складського обліку
6. присвоєння штрих - кодів вагонам, готової продукції.
7. введення звітності

Штрих-коди недорогі у виробництві, можуть зчитуватися рядом скануючих пристроїв, та виробляються за допомогою різноманітних технологій друку та маркування. Система на перших етапах не потребує значних вкладень, обладнання просте у використанні, вартість доступна. За попередніми підрахунками строк окупності такої системи ідентифікації 2 роки.

Висновки. Використання технології автоматизованої ідентифікації дозволяє значно покращити управління матеріальними та інформаційними потоками на всіх стадіях логістичного процесу виготовлення та ремонту вагонів.

Економічна доцільність способу моніторингу підприємств залізничного транспорту досягається за рахунок зниження собівартості виробів за рахунок скорочення виробничого циклу шляхом автоматизації процесів розроблення виробничих завдань; замовлення запчастин, матеріалу та інструменту; контролю виконання виробничих операцій, доступу персоналу та переміщення об'єкта чи суб'єкта в межах підприємства; підвищення продуктивності праці підприємства залізничного транспорту на основі адаптації виробничого процесу для виконання всіх заявок при мінімальних затратах.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених “Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів”, яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спосіб моніторингу виробничих процесів підприємств залізничного транспорту: патент на корисну модель 76604 Україна МПК G06K 1/00, G06K 17/00 / Устенко О.В., Мартинов І.Е., Бондаренко В.В., Скуріхін Д.І.; власник Українська державна академія залізничного транспорту. 2013. 5 с.
2. Чилингаров, К. М. TechnologiCS. Оперативный учет и применение штрих-кодирования в производстве // САПР и графика. 2008. №. С 45-49.
3. Nguyen V., Melkote S.N. (2020) Manufacturing Process Monitoring and Control in Industry 4.0. In: Wang L., Majstorovic V., Mourtzis D., Carpanzano E., Moroni G., Galantucci L. (eds) Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46212-3_10
4. P. Stavropoulos, D. Chantzis, C. Doukas, A. Papacharalampopoulos, G. Chryssolouris, Monitoring and Control of Manufacturing Processes: A Review, Procedia CIRP, Volume 8, 2013, Pages 421-425, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.127>
5. Фомін О. В, Ловська А. О., Скуріхін Д.І., Бондаренко В.В. Багатофункціональний пристрій для контролю технічного стану ходових частин вагонів в експлуатації // Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля. 2021. вип. 1(265). С. 128-32. doi:10.33216/1998-7927-2021-265-1-128-132
6. Волошин Д.І., Афанасенко І.М. Оцінка ефективності функціонування вагоноремонтних підприємств // 36. наук.праць. Київ: ДЕТУТ. 2019. Вип.33. С. 78-85.
7. Волошин Д.І., Афанасенко І.М. Оцінка ризику виробничих систем з ремонту вагонів // 36. наук.праць, Київ: ДЕТУТ. 2016. Вип.29. С. 121-126.
8. Волошин Д.І. До питання підвищення надійності роботи виробничих підрозділів підприємств з ремонту вагонів // 36. наук.праць. Харків: УкрДУЗТ. 2015. Вип.157. С. 128-131.

9. Візняк Р. І., Рєва І. В. Впровадження та застосування високотехнологічного обладнання для проведення технічного обслуговування ходових частин пасажирських вагонів нового покоління в умовах вагонного депо «Запоріжжя-1» Придніпровської залізниці // Зб. наук. праць. Харків: УкрДУЗТ. 2015. Вип. 158, Т.ІІ. С. 125-128.
10. Мартинов І. Е., Бондаренко В. В, Скуріхін Д. І. Математичне моделювання коливань колісної пари як основа методу акустичного контролю // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 1/7(67). С. 22-28.
11. Бондаренко В. В., Скурихин Д. И., Кузнецов А. Н., Рубаненко А. И. Динамический анализ колебаний колесной пары вагона при ее движении с короткой неровностью на поверхности катания // Коммунальное хозяйство городов. 2011. №. 97. С. 278-289.
12. Бондаренко В. В, Скуріхін Д.І., Мельник Я.П. Пристрій акустичного контролю колісних пар на основі мікроконтролера // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту Харків: УкрДУЗТ. 2016. Вип.166. С.97-102.
13. Бондаренко В. В, Скуріхін Д.І. Бортова система акустичного контролю колісних пар // Залізничний транспорт України. 2012. №. 1. С. 32-35.
14. Система дистанційного акустичного контролю рейкового рухомого складу під час руху: патент на винахід 96483 Україна МПК В61К 9/08 (2006.01), G01S 5/14(2006.01) / Бондаренко В.В., Візняк Р.І., Скуріхін Д.І.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. 2011. 5 с.
15. Bondarenko, V.V., Skurikhin, D.I., Vizniak, R.I., Ravlyuk, V.H., Skurikhin, V.I. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. pp. 30–36.

REFERENCES

1. Sposib monitorynhu vyrobnychkh protsesiv pidpryyemstv zaliznychnoho transportu [Method of monitoring production processes of railway transport enterprises]. Patent №76604 Ukrayina MPK G06K 1/00, G06K 17/00 Ustenko O.V., Martynov I.E., Bondarenko V.V., Skurikhin D.I. 2013.
2. Chylynharov, K. M. (2008) TechnologiCS. Operatyvnyy uchen' ta zastosuvannya shtrykhiv-kodyruvan' u vyrobnytstvi [Operational accounting and application of bar coding in production]. *SAPR ta hrafika*. №. S 45-49.
3. Nguyen V., Melkote S.N. (2020) Manufacturing Process Monitoring and Control in Industry 4.0. In: Wang L., Majstorovic V., Mourtzis D., Carpanzano E., Moroni G., Galantucci L. (eds) *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46212-3_10
4. P. Stavropoulos, D. Chantzis, C. Doukas, A. Papacharalampopoulos, G. Chryssolouris, (2013) *Monitoring and Control of Manufacturing Processes: A Review, Procedia CIRP, Volume 8, Pages 421-425, ISSN 2212-8271*, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.127>
5. Fomin, O. V, Lovs'ka? A. O., Skurikhin, D.I., Bondarenko, V.V. (2021) Bahatofunktsional'nyy prystryi dlya kontrolyu tekhnichnoho stanu khodovykh chastyn vahoniv v ekspluatatsiyi [Multifunctional device for monitoring the technical condition of running gear of cars in operation]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho Natsional'noho Universytetu imeni Volodymyra Dalya*. № 1(265). S. 128-32. doi:10.33216/1998-7927-2021-265-1-128-132
6. Voloshyn, D.I., Afanasenko, I.M. (2019) Otsinka efektyvnosti funktsionuvannya vahonoremontnykh pidpryyemstv [Estimation of efficiency of functioning of car repair enterprises]. *Zb. nauk.prats'*. Kyiv: DETUT. №33. S. 78-85.
7. Voloshyn, D.I., Afanasenko, I.M. (2016) Otsinka ryzyku vyrobnychkh system z remontu vahoniv [Risk assessment of production systems for car repair]. *Zb. nauk.prats'*, Kyiv: DETUT. №29. S. 121-126.
8. Voloshyn, D. I. (2015) Do pytannya pidvyshchennya nadiynosti roboty vyrobnychkh pidrozdiliv pidpryyemstv z remontu vahoniv [On the issue of improving the reliability of production units of car repair companies]. *Zb. nauk.prats'*. Kharkiv: UkrDUZT. №157. S. 128-131.
9. Viznyak, R. I., Ryeva, I. V. (2015) Vprovadzheniya ta zastosuvannya vysokotekhnolohichnoho obladdannya dlya provedennya tekhnichnoho obsluhovuvannya khodovykh chastyn pasazhyr'skykh vahoniv novoho pokolinnya v umovakh vahonnoho depo «Zaporizhzhya-1» Prydniprov's'koyi zaliznytsi [Introduction and application of high-tech equipment for maintenance of running gears of passenger cars of the new generation in the conditions of the car depot "Zaporizhzhya-1" of the Dnieper Railway]. *Zb. nauk. prats'. Kharkiv: UkrDUZT. Vyp. 158, T.II. S. 125-128*.
10. Martynov, I. E., Bondarenko, V. V, Skurikhin, D. I. (2014) Matematychnе modelyuvannya kolyvan' kolisnoyi pary yak osnova metodu akustychnoho kontrolyu [Martynov IE, Bondarenko VV, Skurikhin DI Mathematical modeling of wheel pair oscillations as the basis of the method of acoustic control]. *Vostochno-Evropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohyy*. № 1/7(67). S. 22-28.
11. Bondarenko, V. V., Skurikhin, D. I., Kuznêtsov, A. N., Rubanenko, A. I. (2011) Dinamicheskyy analiz kolebaniy kolesnoy pary vagona pri yeye dvizhenii s korotkoy nerovnost'yu na poverkhnosti kataniya [Dynamic analysis of vibrations

of a wheelset of a car during its movement with a short unevenness on the rolling surface]. *Kommunal'noye khozyaystvo gorodov. №. 97. S. 278-289.*

12. Bondarenko, V. V, Skurikhin, D.I., Mel'nyk ,YA.P. (2016) Prystriy akustychnoho kontrolyu kolisnykh par na osnovi mikrokontrolera [Device of acoustic control of wheel pairs based on a microcontroller]. *Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu Kharkiv: UkrDUZT. №.166. S. 97-102.*

13. Bondarenko, V. V, Skurikhin, D.I. (2012) Bortova systema akustychnoho kontrolyu kolisnykh par [Onboard system of acoustic control of wheel pairs]. *Zaliznychnyy transport Ukrayiny. №. 1. S. 32-35.*

14. Systema dystantsiynoho akustychnoho kontrolyu reykovoho rukhomoho skladu pid chas rukhu [The system of remote acoustic control of rail rolling stock during the movement] pat. 96483 Ukrayina MPK B61K 9/08 (2006.01), G01S 5/14(2006.01) / Bondarenko V.V., Viznyak R.I., Skurikhin D.I.; zayavnyk ta patentovlasnyk Ukrayins'ka derzhavna akademiya zaliznychnoho transportu. 2011 – 5s.

15. Bondarenko, V.V., Skurikhin, D.I., Vizniak, R.I., Ravlyuk, V.H., Skurikhin, V.I. (2019) Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. pp. 30–36*

Oleksiy Fomin¹, Alyona Lovska², Dmytro Skurikhin³, Viacheslav Bondarenko⁴

¹ Professor, Department of Railway cars and car facilities, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrilivska, 9, Kyiv, Ukraine, 04071

^{2,3,4} Assistant professor, Department of Railway car Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, Sq. Feuerbach, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050

MONITORING OF PRODUCTION PROCESSES OF RAILWAY TRANSPORT ENTERPRISES

The publication proposes a monitoring technology for production automation based on automatic identification technologies, which will allow real-time monitoring of the progress of technological processes, ensure interdepartmental logistics, as well as perform access and identification security functions in production.

On the example of one of the carriage depots, typical shortcomings of the organization of the production process, accounting and identification of parts of a railway transport enterprise are considered. The ways and stages of implementation of automatic identification technologies are proposed, in particular, it is indicated that it is advisable to introduce a system for monitoring production processes of railway transport enterprises in stages, starting with bar-coding technologies. The process of monitoring railway transport enterprises, the interaction of subjects and objects of the production process is disclosed in detail.

Keywords: cars, monitoring, barcode, radio tags, production process, automatic identification, technological card, warehouse logistics.

Микола Радкевич¹, Світлана Сапронова², Віктор Ткаченко³

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

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

³ Кафедра тягового рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СПЕЦІАЛЬНИХ ВАГОНІВ

В статті проведено дослідження залишкового ресурсу несучих металевих конструкцій (НМК) спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту на основі результатів технічного діагностування та типових випробувань. В більшості наукових публікацій досліджується збільшення строку експлуатації різних типів пасажирських вагонів шляхом удосконалення їх конструктивних властивостей. В дослідженні використовуються наступні методи: скидання з клинів, ресурсні випробування на міцність при зіткненні, випробування на співудар, статичні випробування на міцність. На підставі проведення технічного діагностування та типових випробувань визначається можливість встановлення нового призначеного терміну служби вагонів. Залишковий ресурс встановлювався по одному з мінімальних розрахункових значень, отриманих за математичною залежністю для розрахунку залишкового терміну служби. При визначенні залишкового ресурсу під час типових випробувань проводилась оцінка показників запасу опору втомі з врахуванням напруження несучих конструкцій вагону під час випробувань. Зроблено висновок про те, що стан несучих металевих конструкцій спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту після тривалої експлуатації не наближається до граничного. Отримані практичні та теоретичні результати дають змогу продовжити термін служби спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту понад встановлений заводом-виробником.

Ключові слова: спеціальні вагони, несучі металеві конструкції, контрольні випробування, залишковий ресурс.

Вступ. В зв'язку зі скороченням інвентарного парку спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту після досягнення нормативного терміну служби, закупівлею в недостатній кількості нових вагонів був викликаний їх дефіцит. Комплекс робіт з продовження терміну служби передбачений методикою технічного діагностування пасажирських вагонів, що вислужили призначений термін [1, 13], та нормативними документами. Але ні існуюча методика не враховує деяких особливостей пошкоджень елементів конструкції у період експлуатації. У таких випадках звичайні засоби технічного діагностування згідно з [1] не дають змогу повною мірою оцінити ймовірність продовження терміну служби вагона.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Ресурс (техніка) – наробіток пристрою (механізму) від початку його експлуатації або після ремонту і до досягнення їм граничного стану, який визначається нормативно-технічною документацією [15, 2]. Для різних механізмів ресурс може виражатися в різних одиницях вимірювання, наприклад, в годинах роботи, кілометрах пробігу, роках, тощо. Залишковий ресурс – сумарний

наробіток, що прогнозується за результатами технічного діагностування обладнання, від початку контролю його технічного стану до переходу у граничний стан [15].

Обґрунтування необхідності уточнення терміну продовження корисної експлуатації пасажирських вагонів розглядалися як в Україні так і в закордонних публікаціях [16,17]. В науковому дослідженні [3] обґрунтовано продовження терміну служби пасажирських вагонів з осередками корозії хребтової балки. Розробка рекомендацій із продовження терміну корисної експлуатації пасажирських вагонів розглянуто в роботі [4]. В роботах [5, 6, 7] досліджувались проблеми та особливості технічного діагностування пасажирських вагонів. А в [8, 9], виконувались числові розрахунки на базі скінченно-елементної моделі з оцінкою міцності по I та III розрахункових режимах. Далі з урахуванням попередніх результатів виконувались розрахунки втомної пошкодженості елементів конструкції для оцінки залишкового терміну служби. Крім того, в [8] були виконані розрахунки для нових вагонів і вагонів з мінімальними товщинами елементів (внаслідок корозії) та розрахунковим шляхом був встановлений суттєвий вплив механічних або зварних пошкоджень (підрізів), залежно від розмірів останніх, на термін служби вагонів.

В більшості перерахованих наукових публікаціях досліджується збільшення строку експлуатації різних типів пасажирських вагонів шляхом удосконалення їх конструктивних властивостей.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є проведення дослідження залишкового ресурсу несучих металевих конструкцій (НМК) спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту із строком служби, що перетнув 41 рік від дати виготовлення для встановлення можливості подальшого продовження строку служби

Завданням дослідження є визначення залишкового ресурсу НМК спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту із строком служби, що перетнув 41 рік від дати виготовлення для оцінки показників міцності та опору втомі методами технічного діагностування та типових випробувань.

Матеріали та методи дослідження. Найбільш поширеними вагонами, які використовуються для перевезення спецконтингенту, є вагони моделі 61-4500 (рис. 1).



Рис. 1. Вагон моделі 61-4500 для перевезення спецконтингенту

Для випробувань даного типу вагонів використовуються наступні методи [10, 12]:

скидання з клинів – оцінка власних частот коливань та динамічних напружень в елементах НМК рами і кузова вагона. Залежно від кількості використаних клинів і місця їх

розташування під відповідними колесами вагона визначені види коливання при проході і скиданні вагона з клинів;

ресурсні випробування на міцність при зіткненні – визначення і оцінка динамічних напружень і деформацій в НМК рами та кузова вагона при прикладанні нормативних ударних сил через автозчепне обладнання [2, 13, 14];

випробування на співудар, проведені шляхом накочування локомотивом вагона-бойка на дослідний вагон, який знаходиться в підпертому та вільному станах. Співудари при типових випробуваннях проводились за швидкостями, які указані в табл. 1;

статичні випробування на міцність – визначення напруженого стану, деформацій, стійкості елементів конструкції кузова, рами вагона та рами візка з реально наявними товщинами на період обстеження при дії статично прикладеного навантаження.

На рис. 2 наведено схеми установки тензорезисторів на рамі вагона відповідно при проведенні контрольних випробувань.

Таблиця 1. Кількість співударів вагона в кожному стані

Діапазон швидкості зіткнення, км/год	Кількість співударів	
	Підпертий стан	Вільний стан
Від 3 до 6 вкл.	3	3
Від 6 до 10 вкл.	3	3
Від 10 до 12 вкл.	1	1

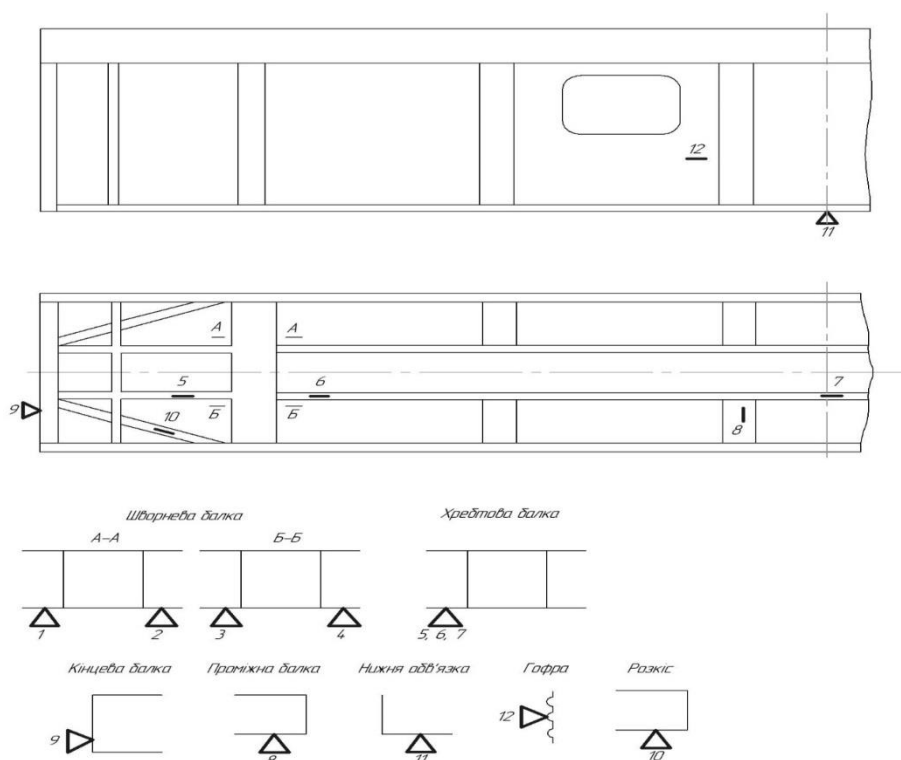


Рис. 2. Схема встановлення тензорезисторів на несучих металевих конструкціях вагона

На підставі проведення технічного діагностування та типових випробувань визначається можливість встановлення нового призначеного терміну служби вагонів [10].

Залишковий ресурс встановлювався по одному з мінімальних розрахункових значень, отриманих за математичною залежністю для розрахунку залишкового терміну служби. Якщо за результатами розрахунків виявиться, що ресурс вичерпаний, то залишковий термін служби визначається за результатами стендових випробувань на втому.

При визначенні залишкового ресурсу під час типових випробувань проводилась оцінка показників запасу опору втомі з врахуванням напруження несучих конструкцій вагону під час випробувань.

Оцінку запасу опору втомі виконано завдяки умові:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,e}} \geq [n], \quad (1)$$

де $\sigma_{a,N}$ – границя витривалості (за амплітудою) натурної деталі в разі симетричного циклу та сталого режиму навантаження на базі випробування $N_0=10^7$ циклів, МПа.

$\sigma_{a,e}$ – розрахункове значення амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, приведена до бази N_0 , еквіваленте за пошкоджуюною дією реальному режиму експлуатаційних випадкових напружень протягом проектного терміну служби, МПа.

$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу опору втомі.

Розрахункове значення границі витривалості визначається за формулою

$$\sigma_{a,N} = \overline{\sigma_{a,N}} \times (1 - z_p \times \mathcal{G}_{\sigma_{a,N}}), \quad (2)$$

де $\overline{\sigma_{a,N}}$ – середнє (медіанне) значення границі витривалості дослідного зразка;

$z_p = 1,645$ – квантиль розподілу, що відповідає односторонній ймовірності $P = 0,95$;

$\mathcal{G}_{\sigma_{a,N}} = 0,5$ – коефіцієнт варіації границі витривалості.

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\sigma_{-1}}{(K_\sigma)_K}, \quad (3)$$

де $\sigma_{-1} = 170$ МПа – границя витривалості;

$(K_\sigma)_K = 1,5$ – середнє значення загального коефіцієнту зниження границі витривалості натурної деталі по відношенню до границі витривалості гладкого стандартного зразка [11].

$$\sigma_{a,e} = \sqrt[m]{\frac{N_c}{N_0} \times \sum \sigma^m P}, \quad (4)$$

де $N_0 = 10^7$ – базова кількість циклів;

m – показник ступеня в рівнянні кривої втомі у амплітуді;

N_c – сумарна кількість циклів динамічних напружень на розрахунковий термін служби.

Приймається фактичний термін служби – 41 рік;

$\sigma^m P$ – значення рівня напружень з урахуванням її масової долі під час експлуатації.

$$m = \frac{A}{(K_b)_k}, \quad (5)$$

де A – коефіцієнт згідно [11];
 $(K_b)_k$ – середнє значення загального коефіцієнту зниження границі витривалості натурної деталі по відношенню до границі витривалості гладкого стандартного зразка;
 m – 4 та 12 у залежності від типу конструкції згідно [11].

$$N_c = g_e \times T_p, \quad (6)$$

де T_p – сумарний час дії динамічних напружень.

$$T_p = B \times T_K, \quad (7)$$

де B – коефіцієнт переведу календарного розрахункового строку служби у роках в час неперервного руху в секундах;

T_K – фактичний сумарний час дії динамічних напружень, $T_K = 41$ рік;

$$g_e = \frac{a}{2\pi} \times \sqrt{\frac{g}{f_{CT}}}, \quad (8)$$

де $a = 1,1$ – коефіцієнт для кузова вагона;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;
 f_{CT} – статичний прогин підвішування.

$$B = 365 \times \frac{10^3 \bar{L}_c}{\bar{V}}, \quad (9)$$

де \bar{L}_c – 126 км – максимальний середньодобовий пробіг вагону ЗАК;
 \bar{V} – 25 м/с, середня швидкість поїзда;

Розрахункові значення n – коефіцієнта запасу опору втомі у дослідних місцях вагону згідно ДСТУ 7774:2015 [11] приведено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахункові значення n у дослідних місцях вагона

Номер каналу	Напруження від сил, що виникають під час руху вагону під час коливань підскакування, скручування кузова, галопування та бокової хитавиці, МПа	Напруження сили взаємодії між вагонами, вагона з локомотивом, гальмування, співударів, з урахуванням її масової частки під час експлуатації, МПа	Значення напружень $\sigma^m P$, МПа	Запас опору втомі n
1	2,32	10,92	13,24	4,26
2	3,74	10,58	14,32	3,94
3	5,51	12,07	17,58	3,21
4	5,32	18,41	23,73	2,38
5	7,04	58,21	65,25	1,32
6	6,16	30,06	36,22	2,34
7	2,92	20,80	23,72	2,38
8	7,38	11,85	19,23	2,93
9	1,8	6,72	8,52	6,62
10	1,48	10,66	12,14	4,64
11	3,01	19,44	22,45	2,51
12	3,63	12,19	15,82	3,56

Допустиме напруження матеріалу несучих конструкцій складає: $0,9\sigma_T = 221$ МПа згідно [11]. Зона 5 дослідного вагону має сумарний рівень напружень 245,37 МПа та перевищує значення допустимих напружень для нових та модернізованих вагонів на 11% (табл. 3).

Таблиця 3. Сумарні значення напружень у дослідних місцях вагону в рамках І режиму

Номер кана лу	Напруження від власних сил тягіння конструкції (тари), обладнання, пасажирів, багажу та ін., МПа	Напруження від сил, що виникають під час руху вагону під час коливань підсакування, скручування кузова, галопування та бокової хитавиці, МПа	Напруження сили взаємодії між вагонами, вагону з локомотивом, гальмування, співударів, у тому числі аварійних зіткнень (250 т.), МПа	Сумарні значення напружень, МПа
1	10,9	2,32	53,18	66,4
2	10,9	3,74	38,91	53,55
3	10,9	5,51	98,3	114,71
4	10,9	5,32	68,95	85,17
5	10,9	7,04	227,43	245,37
6	10,9	6,16	159,06	176,12
7	10,9	2,92	81,95	95,77
8	10,9	7,38	37,01	55,29
9	10,9	1,8	44,68	57,38
10	10,9	1,48	51,45	63,83
11	8,3	3,01	70,24	81,55
12	-	3,63	28,3	31,93

Враховуючи те, що одночасне поєднання максимальних повздовжніх (250 т на автозчепному пристрою) та вертикальних навантажень є рідким поєднанням несприятливих факторів (частість сил складає 0,0000001), подальша безпечна експлуатація спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту можлива за межами 41 року від побудови при зменшеному періодичному технічному діагностуванні несучих конструкцій в порівнянні із звичайним пасажирським вагоном.

Висновки. За результатами проведених досліджень, було визначено, що стан несучих металевих конструкцій спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту після тривалої експлуатації не наближається до граничного.

Таким чином, отримані практичні та теоретичні результати дають можливість продовжувати строк служби спеціальним вагонам для перевезення спецконтингенту понад 41 рік від побудови при періодичному технічному діагностуванню несучих конструкцій в не рідше ніж один раз на 2 роки компетентними, акредитованими організаціями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методика технічного діагностування пасажирських вагонів, що виступили призначений термін, з метою його продовження: ЦЛ-0070. Київ: Нескінчене джерело, 2008. 60 с.
2. Кошель, О.О., Сапронова, С.Ю., Буліч, Д.І., Ткаченко, В.П. Визначення залишкового ресурсу несучих металевих конструкцій вагонів хопер-дозаторів та думпкарів (самоскидів) на основі результатів технічного діагностування та типових випробувань. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». Київ: ДУІТ, 2020. Вип.35. С.14-23. doi: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-2>.

3. 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.
4. 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). doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57096>.
5. Мямлин, С.В., Анофриев, В.Г., Пулария А.Л. Диагностирование подвижного состава с целью продления срока службы. Материали LXVI Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (11.05–12.05 2006). Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Днепропетровск, 2006. С. 108-109.
6. Мямлин, С.В., Пулария, А.Л. Проблемы технического диагностирования пассажирских вагонов. Материали Міжнар. наук.- техн. конф. «Розвиток наукової школи трансп. Механіки». Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2013. С. 65-67.
7. Мямлин, С.В., Анофриев, В.Г., Пулари, А.Л. Особенности технического диагностирования подвижного состава. Материали 1 Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми та ефективні шляхи ремонту і відновлення залізничного рухомого складу». Київ: ДП «ПВІТЬ «Київдіпротранс», 2006. С. 16-17.
8. Шикун, О.А., Рейдемейстер, О.Г., Анофриев, В.Г. Дослідження граничного стану пасажирських вагонів. Вагонний парк. 2012. № 12. С. 4-6.
9. Мямлин, С.В., Горобец, В.Л. Научные методы оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава. Вісник сертифікації залізничного транспорту. Дніпропетровськ, 2011. № 8. С. 12-17.
10. НДКП/НВЦ УІ 008-19 «Дослідження залишкового ресурсу з метою продовження терміну служби спеціальних вагонів для перевезення спецконтингенту», НДКП, м.Київ, 2020.
11. ДСТУ 7774:2015. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальнотехнічні норми для розрахунку та проектування механічної частини вагонів. Київ, 2015.
12. 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. – Северодонецьк: Вид-во СНУ ім.В.Даля, 2020. – С. 130-132.
13. Правила виключення пасажирських вагонів із інвентарного парку: ЦЛ–0069. Київ: Нескінчене джерело, 2008. 40 с.
14. Програма і методика проведення ударних ресурсних випробувань пасажирських вагонів, що виступили призначений термін служби: узгодж. ЦЛ, ЦРБ, ЦТехУкрзалізниця та УкрНДІВ: ПМ 01-13/ВЛВ. Дніпропетровськ, 2013. 16 с.
15. 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.
16. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., Bozdog, E. [et al.]. 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. 2012. 19. 579-586.
17. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., Bozdog, E. [et al.]. Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. Intern. J. of Crashworthiness. London. 2011. Vol. 16. Iss. 3. 319–329. doi: 10.1080/13588265.2011.566475.

REFERENCES

1. Methods of technical diagnostics of passenger cars that have served the appointed period, in order to extend it: CL-0070.(2008) Kyiv: Infinite Source. 60 p.
2. Koshel, O.O., Sapronova, S.Y., Bulich, D.I. Tkachenko, V.P. (2020). Vyznachennya zalyshkovoho resursu nesuchykh metalevykh konstruktivnykh vahoniv khoper-dozatoriv ta dumpkariv (samoskydiv) na osnovi rezul'tativ tekhnichnoho diahnostuvannya ta tyrovokh vyprobuvan'. [Determination of the residual life of load-bearing metal structures of hopper dispensers and dump trucks (dump trucks) based on the results of technical diagnostics and standard tests]. *Transportni systemy i tekhnolohiyi. [Transport Systems and Technologies]*. 35. 14-23. doi: [https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-2_\(in Ukrainian\)](https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-2_(in Ukrainian)).
3. Myamlin, S.V., Reidemeister, O.H., Pularia, 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 Dnipropetrovs'koho 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).

4. Myamlin, S.V., Reydemeyster, O.H., Pulariya, A.L., Kalashnyk V.O. (2015). Rozrobka rekomendatsiy iz prodovzhennya terminu korisnoyi ekspluatatsiyi pasazhyrskikh 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). doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57096>. (in Ukrainian).
5. 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).
- 6 Myamlin, S.V., Pulariya, A.L. (2013). Problemy tekhnicheskoho dyagnostyrovannya passazhyrskikh 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, P. 65–67. (in Russian).
7. 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).
8. Shykunov, O.A., Reydemeyster, O.H., Anofriyev, V.H. (2012). Doslidzhennya hranychnoho stanu pasazhyrskikh vahoniv. [Investigation of the limit state of passenger cars]. Vahonnyy park. [Car park.] 12. C. 4-6. (in Ukrainian).
9. Myamlyn, S.V., Horobets V.L. (2011). Nauchnye metody otsenky resursa nesushchykh konstruksiyi podvizhnogo sostava. [Scientific methods for assessing the service life of rolling stock bearing structures]. *Visnyk sertyfikatsiyi zaliznychnoho transportu*. [Bulletin of railway transport certification]. Dnipropetrovsk. 8. 12-17. (in Ukrainian).
10. NDKTI / NVC UI 005-19. Doslidzhennya zalyshkovoho resursu ta vstanovlennya hranychnoho terminu ekspluatatsiyi nekupeynykh pasazhyrskikh vahoniv pobudovy KVZ. [Study of the residual resource and the establishment of the service life of non-compartment passenger cars for the construction of KVZ]. Kyiv: NDKTI, 2020. (in Ukrainian).
11. DSTU 7774: 2015. Vahony pasazhyrski mahistral'ni lokomotyvnoyi tyahy. Zahal'notekhnichni normy dlya rozrakhuvannya ta proektuvannya mekhanichnoyi chastyny vahoniv. [Passenger cars of main locomotive traction. General technical standards for the calculation and design of the mechanical part of cars]. Kyiv, 2015. (in Ukrainian).
12. Radkevich, M.M., Saponova, S.Yu. Analiz tipovih viprobuvan' na spivudar special'nih vagoniv dlya perevezennya speckontingentu z metoyu prodovzhennya terminu sluzhbi (2020) [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 naukovihprac' naukovopraktichnoi konferentsiyi z dobuvachiv 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. P 130-132. (in Ukrainian).
13. Pravyly vyklyuchennya pasazhyrskikh vahoniv iz inventarnoho parku: TSL–0069. [Rules for exclusion of passenger cars from the inventory: CL-0069]. Kyiv: Neskinchene dzherelo, 2008. 40 p. (in Ukrainian).
14. Prohrama i metodyka provedennya udarnykh resursnykh vyprobuvan' pasazhyrskikh vahoniv, shcho vysluzhyly pryznachenny termin sluzhby: uzgodzh. TSL, TSRB, TSTekhUkrzaliznytsi ta UkrNDIV: PM 01-13/VLV. [The program and a technique of carrying out shock resource tests of the passenger cars which have served the appointed service life: coordination. CL, CRH, CTechUkrzaliznytsia and UkrNDIV: PM 01-13 / VLV]. Dnipropetrovsk, 2013. 16 s. (in Ukrainian).
15. Radkevich, M.M., Saponova, S.Yu., Tkachenko, V.P. (2020) Doslidzhennya zalishkovoho resursu ta vstanovlennya granichnogo terminu ekspluatatsiyi nekupeynykh pasazhyrskikh vagoniv pobudovy 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).
16. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., Bozdog, E. [et al.]. (2012). Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models. *Intern. Iron & Steel Symposium (02.04–04.04.2012)*. Karabük University. Istanbul. 19. 579-586.
17. Baykasoglu, C., Sunbuloglu, E., Bozdog, E. [et al.]. (2011). Railway passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness. *Intern. J. of Crashworthiness*. London. Vol. 16. Iss. 3. 319–329. doi: 10.1080/13-588265.2011.566475.

Nikolay Radkevich¹, Svitlana Sapronova¹, Victor Tkachenko²

¹ Department of Railway carriage and Railway carriage property, State University of Infrastructure and Technologies, st. Kirilivska, m. Kyiv, 04071, Ukraine

² Department of Traction Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, st. Kirilivska, m. Kyiv, 04071, Ukraine

INVESTIGATION OF RESIDUAL RESOURCE OF SPECIAL RAILWAY VAGON

The article examines the residual life of load-bearing metal structures (NMC) of special cars for the transportation of special contingent on the basis of the results of technical diagnostics and standard tests. Most scientific publications investigate the increase in the service life of different types of passenger cars by improving their design properties. The following methods are used in the study: resetting from wedges, resource tests for impact strength, impact tests, static strength tests. On the basis of carrying out technical diagnostics and standard tests the possibility of establishment of new appointed service life of cars is defined. The residual resource was set at one of the minimum calculated values obtained by mathematical dependence to calculate the residual service life. When determining the residual resource during the standard tests, the evaluation of the fatigue resistance margin was performed taking into account the stress of the load-bearing structures of the car during the tests.

It is concluded that the condition of load-bearing metal structures of special wagons for transportation of special contingent after long operation does not approach the limit. The obtained practical and theoretical results make it possible to extend the service life of special wagons for the transportation of special contingent beyond the established by the manufacturer.

Keywords: *special wagons, bearing metal structures, control tests, residual resource.*

Дмитро Волошин^{1}, Олександр Шевченко², Людмила Волошина³*

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

² Начальник зі збереження вагонного парку, Регіональна філія «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця», вул. Пантелеймонівська, 19, м. Одеса, Україна, 65012. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8526-0984>

³ Асистент, Кафедра інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2039-111X>

* Автор відповідальний за листування: dmivol777@gmail.com

АНАЛІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Сучасний стан вантажного вагонного парку характеризується підвищенням фізичним зносом у часі. Непропорційне оновлення рухомого складу, низька якість ремонту внаслідок відсутності відповідної модернізації виробничих систем, особливості проведення навантажувально-розвантажувальних операцій в експлуатації висувають підвищені вимоги до збереження вагонного парку. Особливої уваги заслуговують питання загального управління системою збереження на транспорті. Контроль збереження вантажних вагонів повинний проводитися на всіх етапах експлуатації: при вантажних роботах, при передачі в міжнародному та внутрішньому сполученні, при технічному обслуговуванні та ремонті. При цьому кожен етап потребує використання відповідної нормативної документації, яка забезпечує виконання умов збереження вантажних вагонів в експлуатації.

У представленій статті проведено аналіз сучасного стану парку вантажних вагонів з огляду на забезпечення їх збереження при експлуатації. Визначено фактори, які є найбільш впливовими з точки зору ефективного управління вагонним парком. Розглянуто можливі стратегії забезпечення збереження. Наведено статистичний матеріал по відмовам та пошкодженням вагонів. На основі цього проведена оцінка найбільш вагомих за впливом на забезпечення збереження вагонів подій. Запропоновано практичні рішення по створенню ефективної системи збереження рухомого складу на транспорті.

Ключові слова: збереження вагонів, залізнична інфраструктура, перевізний процес, пошкодження вагонів, вагонний парк.

Вступ. За останні роки на залізницях України відбуваються масштабні процеси реформування галузі. Основна мета проведених структурних перетворень полягає у підвищенні ефективності використання існуючих потужностей при забезпеченні високого рівня якості залізничних перевезень. Відмітимо, що структурні та функціональні зміни окремих підсистем галузі проходили дуже швидко та за короткий проміжок часу. При цьому інноваційні процеси базувалися на існуючій інфраструктурі, яка створювалася в інших умовах та при інших показниках використання рухомого складу.

Значні зміни на даному етапі пройшли в системі управління вагонним господарством [1]. Практично однорідні вагоноремонтні депо були розподілені на два

класи господарських суб'єктів – ремонтні та експлуатаційні. При цьому пройшли трансформації як з подрібнення, так і з укрупнення виробничих систем вказаних підприємств. Вагони інвентарного парку АТ «Укрзалізниця» отримали статус власних вагонів з віднесенням на баланс вагоноремонтних заводів або філій. Вказані перетворення створили нову систему взаємовідносин між ремонтними та експлуатаційними підприємствами, при цьому перші виступили у ролі постачальників експлуатаційної інфраструктури.

Залізничний транспорт до 1991 року характеризувався однорідністю системи управління та відсутністю самого поняття «власні вантажні вагони». На сучасний момент, коли вагони належать різним стороннім організаціям, питання збереження парку постають як ніколи гостро. Різні підходи до використання рухомого складу в процесі навантажувально-розвантажувальних операцій у державних та приватних компаній, відсутність чітко визначеної відповідальності за порушення умов роботи з рухомих складом створює доволі невизначену систему забезпечення збереження вагонів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питання взаємодії вантажно-розвантажувальних машин і пристроїв із залізничними вагонами та причини виникнення несправностей вагонів наведено у [2]. Висвітлено технологічні прийоми навантажувально-розвантажувальних робіт, виходячи з умов забезпечення технічно-справного стану вагонів. Розглянуто передовий на той час досвід роботи зі скорочення простоїв вагонів під вантажними операціями і забезпечення їх збереження на промислових і залізничних підприємствах.

Аналіз динамічного навантаження контейнерів, розміщених на вантажних вагонах розглядається у роботі [3]. Авторами вказано, що в умовах функціонування міжнародних транспортних коридорів та інтенсифікації комбінованих перевезень, необхідним є створення оптимальних конструкцій транспортних засобів. Проведено дослідження прискорень, що діють на вагони з контейнерами на основі розроблених математичних моделей.

Питання підвищення безпеки перевезення контейнерів при транспортуванні в міжнародному сполученні розглянуто в [4]. Досліджено особливості умов експлуатації вантажного рухомого складу при перевезенні морським транспортом. За результатами дослідження динамічних складових навантажень, що діють на транспортні засоби, запропоновані рекомендації стосовно розробки нормативної документації на їх виготовлення та подальшу експлуатацію.

Аналіз причин пошкодження вантажних вагонів проводиться в роботах [5, 6]. Пропонується впровадження прогресивних підходів до організації технічного контролю на пунктах технічної передачі рухомого складу. Що дозволяє мати дієвий спосіб запобігання прийому на магістральні колії пошкоджених вагонів.

Особливості збереження вантажних вагонів при різних умовах експлуатації на залізничному транспорті з огляду на надійність рухомого складу розглянуто в [7-16].

Мета і завдання дослідження. Метою статті є розробка практичних заходів по удосконаленню системи забезпечення збереження вантажних вагонів. Для досягнення вище зазначеної мети поставлені такі задачі:

1. Провести аналіз існуючої системи забезпечення збереження вагонів з метою визначення факторів, що впливають на її ефективність.
2. Розробити практичні рекомендації по удосконаленню системи збереження вагонів за рахунок використання комплексного підходу.

Матеріали та методи дослідження. Збереження вагонів є актуальною науково-практичною задачею. На поточний момент технічний стан більшості вантажних вагонів характеризується значним фізичним та моральним зносом. Більшість відмов елементів конструкцій вагонів відбувається за рахунок порушення вимог нормативних документів при проведенні вантажних операцій та експлуатації рухомого складу на межі експлуатації різних транспортних систем. У цілому має місце невідповідність системи збереження вагонів, що прийнята на АТ «Укрзалізниця» до фактичних умов експлуатації рухомого складу (рис. 1) у сучасних умовах роботи (потреби виведення вертикалі фахівців збереження вагонного парку у окремий контролюючий підрозділ при АТ «Укрзалізниця»):

До основних недоліків існуючої системи збереження належать:

- відсутність штрафів за пошкодження вагонів;
- відсутність розробленого та прийнятого порядку компенсування винними у пошкодженні вагонів всіх збитків, які пов'язані із простоями вагону у ремонті. На сьогодні компенсується лише нормований час, наприклад, для піввагонів у ТОВ-2 нормований час складає 13 год. Тоді як на практиці час простоїв вагонів у очікуванні своєї позапланової черги ремонту є значно більшим;
- відсутність юридично затверджених законодавчих нормативно-правових актів із питань контролю збереження вагонного парку.
- відсутність нормативних документів, які дають можливість заборони фахівцями АТ «Укрзалізниця» використання та експлуатації підприємствами під'їзних колій несправного технологічного, транспортного та іншого обладнання, що взаємодіє з вагоном (або якщо обладнання не відповідає встановленим нормативам);

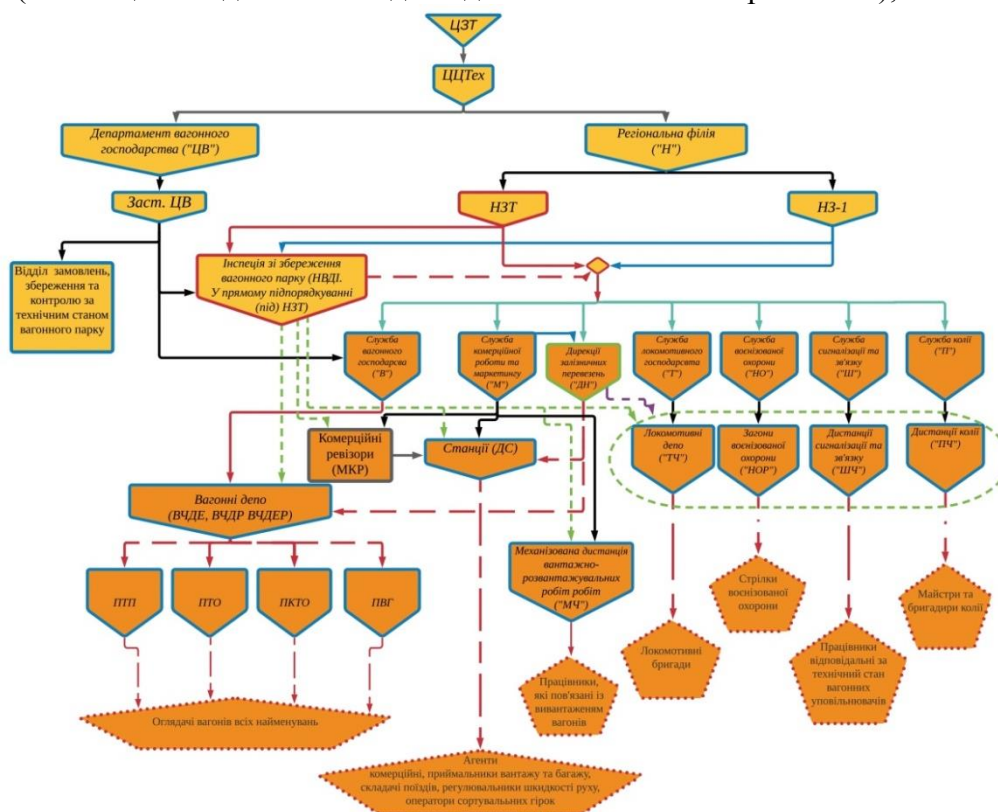


Рис. 1. Алгоритм функціонування системи збереження вагонного парку на АТ «Укрзалізниця»

➤ відсутність належних заробітних плат виконавців (оглядачів вагонів, приймальників вантажу та багажу, комерційних агентів), які здійснюють безпосередній технічний та комерційний огляд вагонів (в результаті на практиці все рідше застосовуються методи матеріальної відповідальності за приймання пошкоджених або розукомплектованих вагонів із під'їзних колій);

➤ відсутність законодавчого впливу Міністерства інфраструктури України, стосовно взаємодії господарської діяльності портів (будь-якої форми власності) та АТ «Укрзалізниця»;

➤ можливість застосування канатного грейферного вивантаження (після отримання тимчасових дозволів від АТ «Укрзалізниця» та власників вагонів), а не виключно вивантаження гідравлічними грейферами, які значно менше пошкоджують вагони;

➤ відсутність на всіх ПТП, станціях і місцях масового вивантаження вагонів системи відеофіксації вантажних робіт із вагонами, з доступом до цієї інформації причетних залізничників;

➤ недостатнє матеріально-технічне забезпечення деталями для відповідного за обсягами ремонту під'їзних колій;

➤ відсутність на практиці страхування всіх вантажних вагонів (дана система створила б додаткові умови для покращення якості ремонту вагонів та сприяла зменшенню факторів їх пошкодження);

➤ низька вартість калькуляцій за ремонт пошкоджених вагонів (основні складові калькуляцій - заробітна плата виконавців та вартість запасних частин та матеріалів, які не відповідають ринковим цінам);

➤ низький рівень заробітної плати фахівців, які відповідають за збереження вагонного парку (що має вплив на утримання висококваліфікованих фахівців у конкурентному середовищі та появи факторів корупційних ризиків).

Підвищити рівень збереження вагонів можна за двома напрямками. За першим - це удосконалення конструкцій вагонів, елементів транспортної інфраструктури та технічних засобів, що здійснюють вантажні операції. Роботи в цьому напрямку проводяться постійно, але обмежуючим фактором в даному випадку є відсутність значних інвестицій в необхідні дослідження та інерційність розвитку прийнятих технологічних процесів.

За другим напрямком, збереження вагонів забезпечується змінами у системі управління та контролю за експлуатацією вагонів, на основі прогресивних методів та підходів до аналізу стану вагонного парку та транспортної інфраструктури. При цьому нівелюються застрілі підходи до управління збереженням вагонів, підвищується ефективність використання існуючої матеріально-технічної бази та знижуються втрати в системі експлуатації та ремонту вагонів. Це дає змогу стверджувати, що другий напрям розвитку є першочерговим.

Як свідчать статистичні дані по експлуатації, кількість пошкоджених вагонів залишається досить високою. Так у 2020 році середньостатистична кількість пошкоджених вагонів склала близько 200 одиниць на місяць. Майже на 30% збільшилася кількість випадків сходу вагонів з колії у порівнянні з попереднім роком (табл. 1).

Таблиця 1. Кількість випадків сходу вантажних вагонів з залізничної колії за 2020 рік

№ п/п	Регіональна філія	Кількість сходів	
		2019 рік	2020 рік
1	Південно-Західна	22	10
2	Придніпровська	294	405
3	Львівська	15	22
4	Південна	9	17
5	Одеська	48	53
6	Донецька	35	36
Разом		423	543

Незважаючи на постійні профілактичні та організаційні заходи по збереженню вагонів, які ініціюються Департаментом вагонного господарства, на високому рівні залишається кількість пошкоджених вагонів у морських та річкових портах. Протягом 2020 року грейферними кранами при вантажних операціях було пошкоджено 572 вагонів, що склало 83% від загальної кількості пошкоджених одиниць. При цьому середня сума витрат на кожний пошкоджений вагон склала більше 2 тис. грн.

На залізницях існує вкрай важка ситуація з розукомплектуванням вантажних вагонів. Так, у 2020 році було виявлено 3871 територіально визначений розукомплектований вагон з загальною сумою матеріальних збитків більше 31млн.грн. В цілому спостерігається тенденція збільшення вказаних випадків, що потребує негайних системних дій у галузі з метою протидії вказаним негативним явищам. Хоча за останні роки по фактам розукомплектування проводиться робота як з боку фахівців зі збереження вагонів, так і правоохоронних органів, повноцінно змінити ситуацію, що склалася, наразі не вдалося.

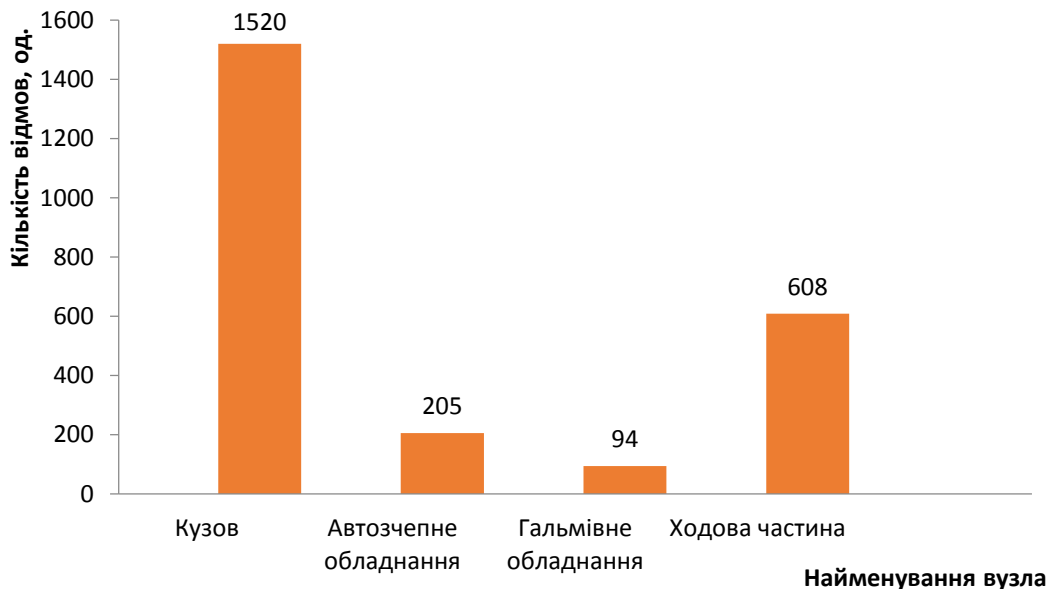


Рис. 2. Розподіл відмов по вузлам вантажних вагонів за 2020 рік

Для удосконалення системи управління збереженням вагонів потрібно вирішити ряд практичних задач.

По-перше, потребує змін нормативно-технічне забезпечення процесів експлуатації вагонів та виявлення пошкоджених одиниць. Саме з цією метою фахівцями Департаменту вагонного господарства, Інспекцій зі збереження вагонного парку та наукових працівників УкрДУЗТ був розроблений проект нормативного документу СТП 04-108:20 «Вагони вантажні. Інструкція із збереження парку». Даний стандарт дозволить конкретизувати та структурувати вимоги до рухомого складу при навантажувально-розвантажувальних операціях всіх видів вантажних вагонів, при передачі та прийомі вагонів з колій (на колії) незагального користування, огляду вагонів у пунктах передачі та визначає порядок дій працівників залізничної інфраструктури при розукомплектуванні вагонів по єдиному певному алгоритму. В цілому розроблений стандарт створює умови для обов'язкового виконання вимог по збереженню вагонного парку.

По-друге, вважається за необхідне розширення повноважень Інспекцій зі збереження вагонного парку, з метою відповідного за обсягами та якістю контролю всіх учасників перевізного процесу з огляду на збереження. За досвідом розвитку аналогічних структур у інших країнах, необхідним кроком є забезпечення незалежності робітників інспекцій при прийнятті рішень. Одним з варіантів є створення нового контролюючого органу з широкими повноваженнями та при відсутності впливу на дії його представників з боку залізничних адміністрацій або приватних структур.

Потребують удосконалення засоби технічного контролю стану рухомого складу та залізничної інфраструктури. Для проведення постійного моніторингу технічного стану вагонів, визначення ефективності заходів, що спрямовані на підвищення збереження вагонів доцільним є введення та використання ряду коефіцієнтів. Наприклад, коефіцієнту виявлення пошкоджених вагонів, імовірності безвідмовної роботи, параметру потоку відмов та ін. [17].

В сучасних умовах необхідно скорегувати існуючі нормативно-правові документи, які зобов'язують всіх учасників перевізного процесу забезпечувати збереженість вагонів. При цьому повинні нівелюватися суб'єктивні інтереси окремих учасників.

Потребує підвищення юридична обізнаність працівників вагонних депо, які є відповідальними по випадкам виявлення вагонів із викраденими деталями, що дозволить їм ефективно взаємодіяти з правоохоронними органами та власниками вагонів.

Вважається доцільним проведення систематичного професійного навчання фахівців та працівників, які взаємодіють із промисловими підприємствами (працівники вертикалей ДС, ВЧДЕ, НВДІ), стосовно вивчення особливостей ефективного ділового спілкування, риторики, методів переконань, нейтралізації методів маніпуляцій винних у порушеннях технологій при роботі із вагонним парком. Проведення на систематичній основі підвищення кваліфікації спеціалістів із збереження вагонного парку.

Висновки. На поточний момент склалася незадовільна ситуація із збереженням вагонного парку. Проведений аналіз статистичних даних з експлуатації вагонів дає змогу стверджувати, що динаміка виникнення пошкоджень вагонів залишається негативною і у деяких випадках має тенденцію до збільшення вказаної статистики пошкоджень у часі. Рішенням даної проблеми є комплексний підхід до забезпечення збереження, який полягає в удосконаленні нормативно-технічних, правових та організаційних напрямів експлуатації рухомого складу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волошин Д.І., Волошина Л.В. Підвищення динамічної стійкості підприємств транспортної інфраструктури / III Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету. Квітень 2021. <http://2021.depas.od.ua/>, <https://drive.google.com/file/d/1O7Zwwr0HRnmHiY1MlnCFs-zaZxxMc64p/view>.
2. Долгих К. О., Кузнецова И. С., Лапшин В. Ф. Обеспечение сохранности полувагонов при погрузочно-разгрузочных работах / Современные проблемы транспортного комплекса России. Том 2, № 1 (2012). С.232-238.
3. Fomin Oleksij, Lovska Alyona, Radkevych Valentyna, Horban Anatoliy, Skliarenko Inna, Gurenkova Olga. The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, Vol. 14, No. 21, P. 3747–3752.
4. Ловська А. О., Фомін О. В., Скуріхін Д. І., Федосов-Ніконов Д. В., Рибін А. В. Визначення динамічної навантаженості та стійкості контейнера, розміщеного на рол-трейлері при перевезенні залізничним поромом // Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. Вип. 36. С. 4 – 14.
5. Клавдиенко О.А. Сохранность вагонного парка: проблемы остаются. // *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2013. №1. С. 23-25.
6. Рибін А. В. Проблеми забезпечення збереження інвентарного парку напіввагонів в експлуатації / Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2013, вип. 139, с.269-273 DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.139.2013.87305>.
7. Чиганашкина И.В. Проблема сохранности грузовых вагонов и организации внепланового ремонта на сети РЖД / *Транспорт Российской Федерации*. № 6 (31). 2010. Стр. 68-71
8. Bosso N., Gugliotta A., Zampieri N. Different dynamic track excitations on freight vehicles running on high speed and traditional lines detected with onboard diagnostic systems. // 25th Symposium of the International Association of Vehicle System Dynamics, IAVSD 2017, Rockhampton; Australia, *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 2 (2018), pp. 867-872.
9. Shana Cui, Russell Pittman, Jian Zhao. Restructuring the Chinese Freight Railway: Two Scenarios. / *Asia and the Global Economy*. January 2021. Volume 1, Issue 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aglobe.2021.100002>
10. Ferhat Dikmen, Meral Bayraktar, Rahmi Guclu. Determination of critical section of wagon axle by considering dynamic and safety factors / *Alexandria Engineering Journal*. 18 June 2019. Volume 58, Issue 2. Pages 611-624 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.010>
11. Rezvani M. A., Mazraeh A. Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. / *European Journal of Mechanics – A / Solids* January–February 2017. Volume 61. Pages 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011>
12. Peng D., Jones R., Hui D. An engineering approach to the fracture assessment of hopper wagons. / *Engineering Fracture Mechanics*. 30 March 2017. Volume 179. Pages 79-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.045>
13. Lei Xu, Xianmai Chen, Xianglin He. Development of a railway wagon-track interaction model: Case studies on excited tracks / *Mechanical Systems and Signal Processing*. 18 August 2017. Volume 100. Pages 877-898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.08.008>
14. Clarhaut J., Hayat S., Coquempot V. The concept of the smart wagon for improving the safety of a railroad transportation system / *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Volume 43, Issue 8. Pages 638-643. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100712-3-FR-2020.00102>
15. Vladimir Milovanović, Vladimir Dunić, Miroslav Živković. Identification causes of cracking on the underframe of wagon for containers transportation – Fatigue strength assessment of wagon welded joints. / *Engineering Failure Analysis*. July 2013. Volume 31. Pages 118-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.039>
16. Emmanuel Matsika, Stefano Ricci, Conor O'Neill. Rail vehicles, environment, safety and security / *Research in Transportation Economics*. May 2013. Volume 41, Issue 1. Pages 43-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.11.011>
17. Волошин Д.І. До питання підвищення надійності роботи виробничих підрозділів підприємств з ремонту вагонів. 36. наук.праць. Харків : УкрДУЗТ, 2015. Вип.157. С. 128-131.

REFERENCES

1. Voloshyn D.I.(2015) Prior to nutrition, the need for robots has been adjusted for robotic workers of enterprises for the repair of wagons. *Zb. science is great*. Kharkiv: UkrSURT. Vip. 157. - Pp. 128-131. [in Ukrainian]
2. Dolgikh K.O., Kuznetsova I.S., Lapshin V.F. (2012) Ensuring the safety of gondola cars during loading and unloading operations. *Modern problems of the transport complex of Russia*. Vol 2, № 1, Pp.232-238. [in Russian]
3. Fomin Oleksij, Lovska Alyona, Radkevych Valentyna, Horban Anatoliy, Skliarenko Inna, Gurenkova Olga. (2019) The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 14, No. 21, P. 3747–3752.

4. Lovska A.O., Fomin O.V., Skurikhin D.I., Fedosov-Nikonov D.V., Ribin A.V. (2020) Determination of dynamic load and stability of a container placed on a roll trailer during transportation by railway ferry. *Collection of Science Practitioners DUIT. Series "Transport systems and technologies"*. Vip. 36. Pp. 4 - 14. [in Ukrainian]
5. Klavdienko O.A. (2013) Preservation of the car fleet: problems remain. *Wagons and wagon facilities*. No. 1. Pp. 23-25. [in Russian]
6. Rybin A.V. (2013) Problems securing inventory park open wagons in operation. *Zb. science is great*. Kharkiv: UkrSURT, Vip. 139. Pp. 269-273. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.139.2013.87305>. [in Ukrainian]
7. Chiganashkina I.V. (2010) The problem of the safety of freight cars and the organization of unscheduled repairs on the Russian Railways network. *Transport of the Russian Federation* № 6 (31). Pp. 68-71
8. Bosso N., Gugliotta A., Zampieri N. (2018) Different dynamic track excitations on freight vehicles running on high speed and traditional lines detected with onboard diagnostic systems. *25th Symposium of the International Association of Vehicle System Dynamics, IAVSD 2017, Rockhampton; Australia, The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 2*, pp. 867-872.
9. Shana Cui, Russell Pittman, Jian Zhao (2021) Restructuring the Chinese Freight Railway: Two Scenarios. *Asia and the Global Economy*. January 2021. Volume 1, Issue 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aglobe.2021.100002>
10. Ferhat Dikmen, Meral Bayraktar, Rahmi Guclu (2019) Determination of critical section of wagon axle by considering dynamic and safety factors. *Alexandria Engineering Journal*. 18 June 2019. Volume 58, Issue 2. Pages 611-624 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.010>
11. Rezvani M. A., Mazraeh A. (2017) Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics – A / Solids* January–February 2017. Volume 61. Pages 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euomechsol.2016.08.011>
12. Peng D., Jones R., Hui D. (2017) An engineering approach to the fracture assessment of hopper wagons. *Engineering Fracture Mechanics*. 30 March 2017. Volume 179. Pages 79-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.045>
13. Lei Xu, Xianmai Chen, Xianglin He. (2017) Development of a railway wagon-track interaction model: Case studies on excited tracks. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 18 August 2017. Volume 100. Pages 877-898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.08.008>
14. Clarhaut J., Hayat S., Coquemot V. (2010) The concept of the smart wagon for improving the safety of a railroad transportation system. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Volume 43, Issue 8. Pages 638-643. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100712-3-FR-2020.00102>
15. Vladimir Milovanović, Vladimir Dunić, Miroslav Živković (2013) Identification causes of cracking on the underframe of wagon for containers transportation – Fatigue strength assessment of wagon welded joints. *Engineering Failure Analysis*. July 2013. Volume 31. Pages 118-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.039>
16. Emmanuel Matsika, Stefano Ricci, Conor O'Neill. (2013) Rail vehicles, environment, safety and security. *Research in Transportation Economics*. May 2013. Volume 41, Issue 1. Pages 43-58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2012.11.011>
17. Voloshyn D.I., Voloshyna L.V. (2021) Increasing the dynamic resilience of transport. *III International Scientific and Practical Marine Conference* of the Department of SEU and TE Odessa National Marine University. April 2021. <http://2021.depas.od.ua/>, <https://drive.google.com/file/d/1O7Zwwr0HRnmHiY1MlnCFs-zaZxxMc64p/view>. [in Ukrainian]

Dmytro Voloshyn¹, Alexey Shevchenko², Liudmyla Voloshyna³

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

²Head of the Freight Wagon Fleet Safety Inspection, Branch Odessa Railway JSC "Ukrainian Railway", 19, Panteleymonivska str., Odessa, 65012, Ukraine

³Assistant, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61050, Ukraine

ANALYSIS OF ENSURING THE SAFETY OF FREIGHT WAGON IN MODERN CONDITIONS OF OPERATION

The current state of the freight wagon fleet is characterized by increased physical wear over time. Disproportionate renewal of rolling stock, low quality of repair due to the lack of appropriate modernization of production systems, the peculiarities of loading and unloading operations in operation make increased demands on the preservation of the wagon fleet. The issues of general management of the transport safety system deserve special attention. Control of safety of freight

wagons should be carried out at all stages of operation: at freight works, at transfer in the international and domestic communication, at maintenance and repair. In this case, each stage requires the use of appropriate regulations, which ensures compliance with the conditions of storage of freight wagons in operation.

The presented article analyzes the current state of the freight wagon fleet with a view to ensuring their safety during operation. The factors that are the most influential in terms of effective management of the wagon fleet are identified. Possible conservation strategies are considered. The statistical material on failures and damages of wagons is resulted. Based on this, an assessment of the most significant events in terms of the impact on ensuring the safety of wagons was made. Practical solutions for creating an effective system for preserving rolling stock in transport are proposed.

Keywords: safety of wagons, railway infrastructure, transportation process, damage to wagons, wagon fleet.

Oleksij Fomin¹, Pavlo Prokopenko^{2*}, Serhii Kara³, Vladimir Fomin⁴

¹ Department of Cars and Carriage Facilities, Faculty of infrastructure and rolling stock of railways, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

² Department of Cars and Carriage Facilities, Faculty of infrastructure and rolling stock of railways, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-6590>

³ The Rail Transport Scientific and Engineering Institute branch of JSC "Ukrzaliznytsia", street I. Fedorova 39, Kyiv, Ukraine, 03038. ORCID 0000-0003-0401-6547

⁴ Department of Cars and Carriage Facilities, Faculty of infrastructure and rolling stock of railways, State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071. ORCID 0000-0002-8725-1106

*Corresponding author: prokopenko1520mm@gmail.com.

ASSESSMENT CARTS STRENGTH INDICATORS WAGONS WITH EXPIRED SERVICE LIFE

Currently, a significant number of units of specialized cars of 1520 mm gauge in Ukraine has a service life that exceeds that assigned by the manufacturer. At the same time, many years of experience in diagnosing and analyzing the operation of carts of these cars by specialized organizations, shows that their technical condition after long operation shows that the specified service life specified in the technical conditions in most cases far from the limit. This is largely due to the significant margin of safety, which is laid down in the design, and the peculiarities of the operation of a particular type of car. The paper considers the issues of assessing the operation of such cars on the example of the carriage of the weighing car, bogie model 18-102, and the carriage of the passenger car model KVZ-TsNII used in the track economy for transportation of workers. The average daily mileage of such cars is 60-70 percent less than the average mileage that is laid down when calculating the service life assigned by the manufacturer. The evaluation and methods of determining the strength of the frames of carriages of special cars are performed. Conclusions are made based on the results of the analysis of the strength of the carriages of special cars.

Keywords: bogies, control tests, resource, technical diagnostics, safety margin, resource estimation, strength.

Introduction. Currently, a significant number of units of bogies of special cars of 1520 mm gauge in Ukraine has a service life that exceeds that assigned by the manufacturer. At the same time, many years of experience in diagnosing the technical condition of freight, passenger and weighing carts after long operation show that the service life specified in the technical conditions is far from the limit. This is largely due to the significant margin of safety, which is laid down in the design, and the peculiarities of the operation of a particular type of car. Ensuring safe and timely freight transportation is one of the main tasks of railway transport. In this regard, when at the end of the last century began to show a shortage of freight rolling stock, including specialized, as well as taking into account the technical and economic difficulties of its renewal after the appointed period, it was decided to partially abandon the regulated service life for rolling stock units, the individual resource of which allowed to solve their further trouble-free operation.

In recent years, there has been a significant aging of the operational fleet of specialized carriages. The fleet of weighing cars has more than 50% of cars that have served one and a half or more years and a half of service life.

To address the issue of the possibility of further operation of weighing cars with a service life exceeding not only the intended, but also one and a half, their technical diagnosis and control tests are carried out.

Analysis of recent research and problem statement. To date, insufficient attention has been paid to the study of the residual life of the load-bearing structures of bogies of special wagons with a service life exceeding that set by the manufacturer. Thus, in [1] the results of researches of bearing capacity of gondola cars of model 12-9745 are given. However, the purpose of such research was to find structural reserves to reduce the material consumption of this model of cars. Accordingly, the load-bearing capacity of the body structure with the simulation of wear typical of 1.5 service life has not been studied. The article [2] presents the prospects for improving the design of gondola cars, including by increasing the service life. However, it is proposed to increase the service life of gondola cars by improving their design properties, for example through the introduction of materials with improved characteristics. Analysis of the properties of structural materials of car bodies of the new generation is given in [3]. The advantages of using new progressive materials for separate components of car constructions are indicated in the work. However, the issue of extending the implementation of this direction when extending the service life of gondola cars is not paid attention. Measures to improve the load-bearing structure of the gondola body in order to ensure the reliability of its attachment to the deck of the railway ferry are given in [4, 5]. The calculation was performed in the software environment MSC Adams. The study of resistance against overturning the car was carried out when it fits into a curve with a radius of 250 m, taking into account different speeds. The issues of estimating the accuracy of the capacity of railway networks intended for transportation of raw materials and finished products of the mining and metallurgical industry are given in [6, 7]. The design features of the car for intermodal transportation are considered in [8]. The car has a lowered middle part, and the presence of the reversible part makes it possible to load / unload vehicles on / from it by scooter. In [9] the results of researches on definition of character and level of influence of various freight carts on durability of bearing systems of cars are resulted. However, the task of such a study did not include the question of determining the appropriate impact on bodies that are operated outside the standard period. Studies [10, 11] analyzed the features of the movement and interaction of units of new rolling stock. And the corresponding researches for units with indicators reflecting operational wear are not carried out. Summarizing the results of the above analysis, it can be noted that at present the issue of the possibility of extending the service life of the load-bearing structures of weighing cars has not been fully resolved. Taking into account the above, we can conclude that the results of the analysis of information sources on the subject indicate the lack of sufficient methodological and practical materials to determine the residual life of the frames of bogies special cars.

The purpose and tasks of the study. The purpose of the work - to solve the scientific and practical problem of creating theoretical provisions on the features of the assessment and determination of the residual life of the frames of carts of special cars.

The purpose of technical diagnostics and control tests is to study the residual life and justify the possibility of continuing the operation of carriages of special cars with exhausted assigned service life, establishing the value of the extended service life.

The task of running strength tests of bogies 18-102 and KVZ-TsNII is to determine the stress (strain) in the studied sections and points of the elements of the bogie.

Features of carrying out a complex of works on definition of a residual resource of weight-calibrating cars are:

the average daily mileage of special cars is 60-70% less than the mileage of freight and passenger cars on the basis of which the test cars are made;

differences in the features of operation of special cars.

The above features must be taken into account when determining the residual life of the bearing metal bogies models 18-102 and KVN-TsNII.

Materials and methods of research. The objects of research were the bogie of the model KVZ-TsNII (Fig. 1) of 1974 and the bogie of the model 18-102 (Fig. 2) of 1955, which were operated with special cars.



Fig. 1. Experimental bogie model KVZ-TsNII



Fig. 2. Experimental bogie model 18-102

To develop a scheme for the installation of strain gauges, the normative calculation of the bogie model KVZ-TsNII by the finite element method was performed to determine the most loaded places. The calculations were performed for the most unfavorable possible combination of simultaneously acting regulatory forces in accordance with the established calculation regime III.

Mode III – operating mode, which takes into account the forces acting on the cart during the movement of the car as part of the train on straight and curved sections of track and turnouts with the allowable speed up to design speed with periodic service braking, periodic moderate jerks and shocks, regular operation of mechanisms and car components.

The plots of stresses arising in the frame of the cart are shown in fig. 3, 4.

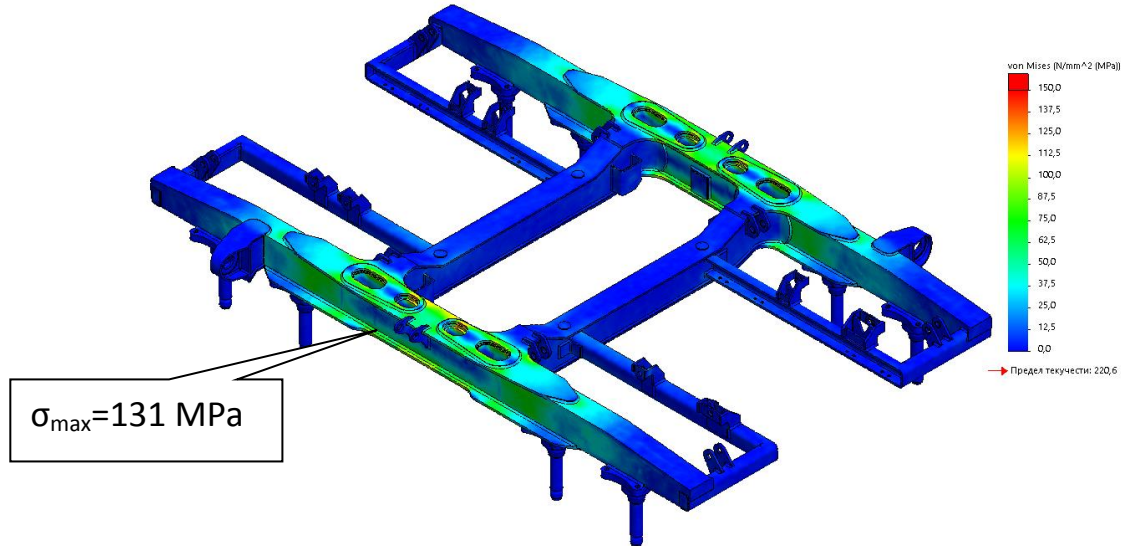


Fig. 3. Example of a diagram of stresses arising in the frame of the bogie

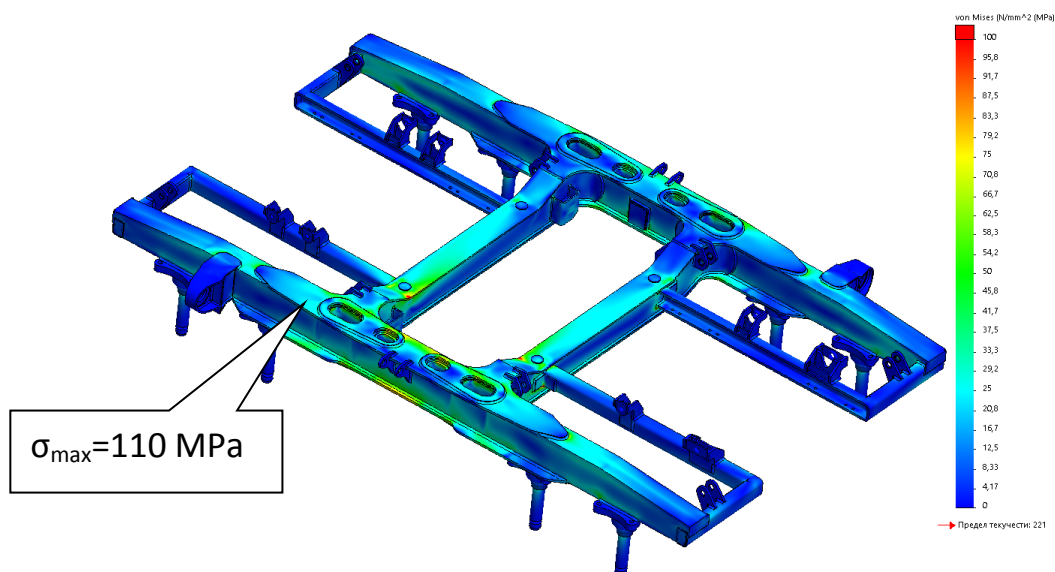


Fig. 4. Example of a diagram of stresses arising in the frame of the bogie

The maximum stresses are 110-131 MPa, which is less than the allowable $[\sigma_d] = 150 \text{ MPa}$.

When conducting running strength tests of bogies of the KVZ-TsNII and 18-102 models, the stress (deformation) in the investigated sections and points of the bogie elements is determined.

Running strength tests, bogie model KVZ-TsNII and 18-102, with the determination of stress (deformation) in the studied sections and points of the elements are carried out on

straight and curved sections of track, turnouts in the modes of traction, run and braking. The tests are performed in the actual operation of the car.

In fig. 5, 6 shows a simplified diagram of the installation of strain gages on the cart during the running strength tests.

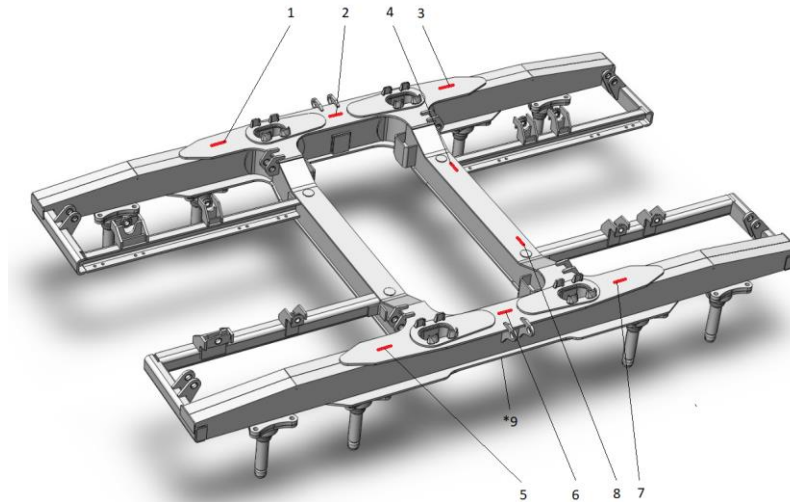


Fig. 5. Simplified scheme of installation of strain gages on the bogie KVZ-TsNII

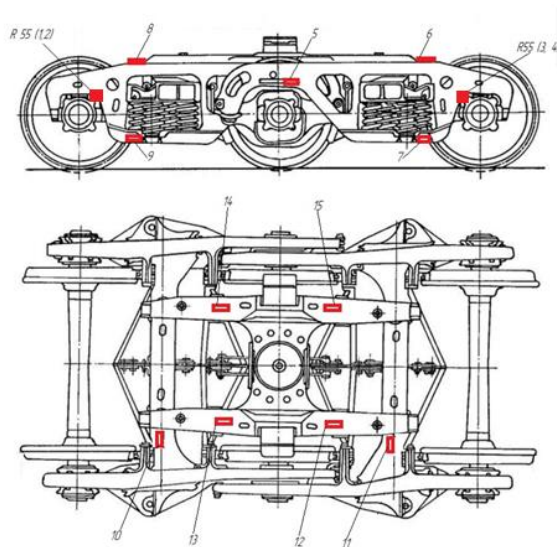


Fig. 6. Simplified scheme of installation of strain gages on the bogie 18-102

The following is a calculation of the fatigue resistance of the bogie frames.

Based on the processing of running strength tests, the experimental data are grouped by ranges of speeds, characteristic features of the road section (straight, curve, arrows, etc.), modes of movement (acceleration, braking) of the car and determines the amplitude-frequency composition of the stress-strain state in structural elements in the range from 0.3 Hz to 30.0 Hz, in order to estimate the coefficient of fatigue resistance according to the formula:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,3}} \geq [n], \quad (1)$$

where $\sigma_{a,N}$ – endurance limit (according to the amplitude) of the full-length part according to the symmetrical cycle and the set load mode;

$\sigma_{a,3}$ – the calculated value of the equivalent amplitude of the dynamic voltage in the real mode of operational random loads for the design life of the structure;

$[n]$ – allowable coefficient of fatigue resistance.

The results of the assessment of the coefficient of fatigue resistance for bogies KVZ-TsNII and 18-102 are given in table. 1, 2.

Table 1. The smallest calculated values of the coefficient [n] of the bogie 18-102

Loaded wagon (wagon weight 121 tons), maximum speed - 81 km / h	Fatigue resistance margin, n		
	zone 1-4 (transition radius R55 axle boxes)	zones 5-9 (upper and lower belts of side frames)	10-15 zone (over- spring beam)
	1,75	> 3	1,79

The recommended value of the coefficient of fatigue resistance for new bogie frames is $[n] = 1,8$. It is allowed to reduce the n - coefficient of fatigue resistance, depending on the accuracy of determining the parameters by calculation and experimental methods.

At speeds of 70 and above km / h the level of stresses in the most loaded zones of carts increases: for a zone R55 of lateral frames in 1,5... 1,8 times, for overspring beams to 2 times. The most loaded zone is the zone R55 of the last in the direction of movement of the axle section of the cart.

Given the running dynamic tests in real operating conditions (actual technical condition of trucks and tracks, which corresponds to the operating conditions) in a fully loaded condition, $n = 1,75$ with an estimated service life of 60 years inclusive (61 actual year) is satisfactory for further operation.

Table 2. The smallest calculated values of the coefficient [n] of the bogie KVZ-TsNII

Wagon weight 60 tons, maximum speed - 120 km / h	Fatigue resistance margin, n		
	zones 1–3, 5-7 (upper plane of the longitudinal beam of the frame)	zone 4, 8 (upper plane transverse beams of the frame)	zone 9 (lower plane of the longitudinal beam of the frame)
	3,37	1,7	1,85

The allowable value of the coefficient of fatigue resistance of the load-bearing structures of the bogie is $[n] = 1,7$. The smallest value of the coefficient of fatigue resistance corresponds to zone 4 (transverse beam of the bogie frame) and is equal to 1.7 with an estimated service life of 53 years. All other values of the fatigue resistance margin are 1.85 and higher.

This publication is part of the project: "Development of conceptual frameworks for restoring the efficient operation of obsolete freight cars (Development of conceptual frameworks for restoring the efficient operation of obsolete freight cars)" (Project registration

number: 2020.02 / 0122), funded by the National Research Foundation Of Ukraine at the expense of the state budget.

Conclusions. The input of theoretical research to determine the possibility of extending the service life of carriages of special cars operated on the railways of Ukraine, it was determined that the condition of the load-bearing metal structures of cars after long operation does not approach the limit. After analyzing the value of the average daily mileage of special cars, it was found that it is 60-70% less than the mileage of freight and passenger cars on the basis of which special cars are made. Given the above differences in the design of cars, features of operation and lower mileage, they must be taken into account when estimating the residual life.

During the calculations of the coefficients of the fatigue resistance of the frames of the carts, the following is established:

the lowest value of the coefficient of resistance to fatigue of the cart 18-102 in areas R55 is 1.75;

the smallest value of the coefficient of fatigue resistance of the cart KVZ-TsNII in zones 4, 8 is 1.7 with a permissible value of 1.7,

Thus, the obtained theoretical and practical results will allow to develop a set of works and measures to assess the residual life of the frames of bogies KVN-TsNII and 118-102, which are operated on the railways of Ukraine.

REFERENCES

1. Fomin O.V. (2012). Development of a method for the introduction of various profiles as components of carrier systems of freight cars. *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. Kharkiv. P. 29-33.
2. Kelrykh M., Fomin O. (2014). Perspective directions of planning carrying systems of gondolas. *Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry»*. № 6. P. 64-67.
3. N. Gorbunov, R. Domin, M. Kovtanec, K. Kravchenko. (2016). The multifunctional energy efficient method of cohesion control in the "wheel-braking pad-rail" system, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport. Międzynarodowej Konferencji Naukowej TRANSPORT XXI WIEKU*. Arłamów. P. 114–126.
4. Fomin O.V., Prokopenko P.M., Horbunov M.I. Saprionova S.U. (2017). Polipshennya nesuchoyi zdatnosti vahonakhopera dlya perevezennya zerna z metoyu pidvyshchennya oporu dynamichnym zusylyam. *Naukovyy zhurnal – Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalja. Syeverodonets'k*. № 5(235). P. 88-99 [in Ukrainian].
5. Saprionova S, Tkachenko V., Kramar N., Voron'ko A. (2008). Regularities of shaping of a wheel profile as a result of deterioration of the rolling surface in exploitation. *Transport Problems. International Scientific Journal*. №3(4). P. 47–57.
6. Fomin, O.V., Gostra A.V. (2015) Variations describe the structural designs of freight cars. *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series Transport systems and technologies*. Kyiv. № 26-27. P.137-147.
7. Myamlin, S., Neduzha, L., Ten, O., & Shvets, A. (2010). Spatial Vibration of Cargo Cars in Computer Modelling with the Account of Their Inertia Properties. *Mechanika. Proc. of 15th Intern. Conf*. P. 325-328.
8. Myamlin, S., Lunys, O., Neduzha, L., & Kyryl'chuk, O. (2017). Mathematical Modeling of Dynamic Loading of Cassette Bearings for Freight Cars. *Transport Means. Proc. of 21st Intern. Scientific Conf*. P. 973-976.
9. Moroz V.I. (2009). Mathematical notation of problem of optimizing design of open goods wagons by criterion of the minimum material capac-ity. *Collection of scientific papers. Kharkiv. Ukrainian State University of Railway Transport*. № 111. P. 121-131.
10. Kelrikh M. B., Moroz V. I. (2014). Strukturno-funktsionalne opysannia konstrukttsii modulja kuzova suchasnykh universalnykh napivvahoniv. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalja*. №2 (210). P. 94-103. [in Ukrainian].
11. Makarenko M. V. (2014). Comprehensive analysis of the economic impact of the life cycle of a modern gondola // *Naukovo-praktychnyzhurnal «Zaliznychnyi transport Ukrainy»*. Kyiv. №. 5. C. 107.
12. Moroz, V.I. (2008). Vyznachennia perspektyvnykh napriamkiv udoskonalennia konstrukttsii napivvahoniv vyrobnytstva DP «Ukrspetsvahon. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi Derzhavnoi Akademii Zaliznychnoho Transportu, P. 72-81. [in Ukrainian].
13. Kelrykh M. (2014). Perspective directions of planning carrying systems of gondolas. *Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry»*. № 6. P. 64-67
14. Fomin, A. V. (2012). The determination of the perspective directions of designing of bearing systems in cargo wagon building. *East European journal of advanced technologies*. Kharkiv. № 3/7(57). P. 32-35.

15. Fomin O.V. (2013). Teoretychni osnovy prohramnoho kompleksu vyznachennya ta vykorystannya matematychnykh modeley skladovykh vantazhnykh vahoniv. Naukovyy zhurnal «Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho». Kremenchuk. № 6(83). P. 87-91. [in Ukrainian].

16. Fomin, O. V. (2015). Vprovadzhennya of cruglic pipes in NESC systems napowan W zabezpecheny razvaliny pokaznikiv. The journal "Technology audit and production reserves". Kharkiv. № 4/1(24). P. 83-89. [in Ukrainian].

17. Lovs'ka A. O. (2018). Modelyuvannya navantazhenosti konteynera-tssystemny pry perevezenni u skladi kombinovanoho poyzda na zaliznychnomu poromi. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Dynamika i mitsnist' mashyn. № 33. P. 28 – 32. [in Ukrainian].

18. Lovs'ka A.O. (2018). Doslidzhennya mitsnosti nesuchoyi konstruktsiyi kuzova naprivvahona pry perevezenni na zaliznychnomu poromi. Zb. nauk. prats'. Kyiv. № 32, T. 1. P.71 – 80. [in Ukrainian].

Фомін Олексій¹, Прокопенко Павло¹, Кара Сергій², Володимир Фомін¹

¹ Кафедра вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій. вул. Кирилівська 9, м. Київ, Україна, 02000

² Науково-дослідний та дослідно-конструкторський інститут залізничного транспорту АТ «Укрзалізниця». вул. І. Федорова 39, м. Київ, Україна, 03036

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ ВІЗКІВ СПЕЦІАЛЬНИХ ВАГОНІВ З ЗАКІНЧЕНИМ ТЕРМІНОМ СЛУЖБИ

В даний час значна кількість одиниць спеціалізованих вагонів колії 1520 мм в Україні має термін служби, який перевищує призначений заводом – виробником. У той же час багаторічний досвід діагностування та аналіз експлуатації візків цих вагонів спеціалізованими організаціями, показує, що їх технічний стан після тривалої експлуатації показує, що зазначений в технічних умовах призначений строк служби у більшості випадків далекий від граничного. Багато в чому це пов'язано, як з істотним запасом міцності, який закладений при проектуванні, так і з особливостями експлуатації конкретного типу вагонів. В роботі розглянуті питання з оцінки експлуатації таких вагонів на прикладі візка вагоповірного вагона моделі 18-102, та візка пасажирського вагона моделі КВЗ-ЦНІИ який використовується у колійному господарстві для перевезення працівників. Середньодобовий пробіг таких вагонів на відсотків 60-70 менший за середньо експлуатаційні пробіги які закладені при розрахунку терміну служби призначеного заводом виробником. Виконано оцінку та описано методи визначення показників міцності рам візків спеціальних вагонів. Зроблено висновки за результатами проведеного аналізу з оцінки показників міцності візків спеціальних вагонів.

Ключові слова: візки, контрольні випробування, ресурс, технічне діагностування, запас міцності, оцінка ресурсу, міцність.

UDC 656.073

Alexander Krashenin¹, Olha Shapatina^{2}, Vitaliy Ponomarenko³*

¹ Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7462-3372>

² Senior Lecturer, Department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-6212>

³ Senior Lecturer, Department of foreign languages, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1820-4277>

* Corresponding author: shapatina@ukr.net

ESTIMATION OF VEHICLE OPERATING TIME TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF A NUMBER OF FACTORS

Modern vehicles operated on the railways of Ukraine have almost exhausted or exceeded their resource. The overuse of financial and material resources for their maintenance continues. The standard service life of vehicles was calculated on stable economic conditions of use of vehicles and their timely updating in process of aging.

The service life of modern vehicles is determined by the influence of many factors, the disregard of which can lead to significant costs, even in compliance with the standard service life.

For railway transport, these factors need modern clarification, as in operation their service life often exceeds the standard or, as for intermodal transport, the service life does not have a strict justification.

Accordingly, the article analyzes the issues of assessing the impact on the service life of vehicles of the components of the cost of its maintenance and average daily mileage.

It is shown that, firstly, the definition of the service life of vehicles must be linked to the cost of vehicle development, its creation, testing and production, the cost of operation and storage, as well as additional costs, and secondly, with the optimal average daily mileage, at which all the costs are minimal.

Keywords: *vehicle, optimal average daily mileage, service life, minimum reduced costs*

Introduction. In recent years, the railway has remained the main industry for the massive transport of passengers and goods. In modern conditions, it is increasingly difficult for the railways to ensure the transportation process, mainly due to the deterioration of the infrastructure and the slow renewal of the locomotive and wagon fleet.

Against this background, it becomes more and more difficult for a vehicle to compete with road transport not only in the carriage of passengers, but also in freight transport, especially for short and medium distances.

In these conditions, attention should be paid to modern vehicles, in particular, intermodal transport, the use of which in some foreign countries has reached 40% in the volume of cargo transportation by all means of transport. For our country, it represents a significant additional reserve in the use of the railway infrastructure. Already now it is necessary to formulate a policy of retaining new vehicles, taking into account the accumulated experience of railway transport.

Analysis of recent research and problem statement. The development and optimization of the work of new transport systems are devoted to the works of Aleshinskiy E.S., Butko T.V., Vernigora R.V., Demin Yu.V., Kirpa G.M., Kozachenko D.M., Kotenko A.M., Lomotko D. V., Postan M. Ya., Reser S. M., Shibaeva A. G., Yanovsky P. A. and others.

Considerable attention is paid to theoretical and practical issues of using new types of transport both in our country and abroad.

So, at the Department of Operation and Repair of Rolling Stock and Department of Cargo and Commercial work of UkrDUZT, a number of studies were carried out related to determining the efficiency of transportation by intermodal transport [1-4].

Abroad, these works have received practical meaning for a long time. So, in European countries, intermodal transportation is widely used due to their greater environmental friendliness, low cost and mobility [5-7]. Also, intermodal transport contributes to increasing the competitiveness of rail transport, while ensuring the delivery of goods "from door to door" [8-10].

The use of the technology of piggyback, container and bimodal routes allows to reduce the cost of transportation, helps to reduce the delivery time of goods and improve the quality of freight traffic [11-13].

UkrDUZT also carried out fundamental research to substantiate the timing of a more standardized use of traction rolling stock [14, 15], the accounting of which will allow to determine the optimal costs and quality indicators of the use of other vehicles.

The purpose and tasks of the study.

The purpose of this work is to assess and simulate the influence of a number of factors on the overall service life of a vehicle to ensure optimal reduced costs for their maintenance.

In accordance with this, the following tasks have been set:

- to determine the factors affecting the service life of the vehicle;
- to develop an algorithm for assessing the costs of these factors to ensure the optimal service life of the vehicle and the required average daily mileage of the vehicle;
- to evaluate the effectiveness of interaction of various types of transport.

Materials and methods of research.

The efficiency of a vehicle with a service life must be assessed taking into account a set of the following factors: the function of the need for a vehicle and the costs associated with the entire structure of the life cycle.

Let us formalize the problem as follows. Let the demand function of some argument be given: integral $F(x)$ or differential $f(x)$. There has been given the function of the cost of producing one vehicle from this argument $Z_0(x)$, the cost of developing, testing and delivering the vehicle production $Z_p(x)$, the cost of operating or storing the vehicle per unit of time $Z_p(x)$.

It is necessary to determine the optimal number of vehicle types and such values of their arguments, at which the total costs will be minimal.

It is important to select the types N , the arguments x_1, x_2, \dots, x_N of which, and each vehicle of the type K is applied in the range of the argument from x_{k-1} to x_k . Then the total costs can be determined by the formula.

$$C_N = \sum_{k=0}^N (F(x_{k+1}) - F(x_k)) \cdot Z_0(x_{k+1}) + \sum_{k=0}^N Z_p(x_{k+1}) + \int_0^T \sum_{k=0}^N Z_c(x_{k+1}) [F(x_{k+1}) - F(x_k)] dt \rightarrow \min \quad (1)$$

It is necessary to determine such a set x_k , including N , at which the value C_N will be minimal. The given problem is one-dimensional, since it has one parameter.

In practice, the fulfillment of the condition when the vehicle can be used with the argument values less than the corresponding type and more than the previous ones is not required. That is, a vehicle with a standard service life can be used in excess of the standard period, which is associated with additional costs.

The value of the argument x_k characterizes the given type of vehicle, and the value of the argument to which this type of vehicle is applied is denoted z_k . We denote the function of need $F(x)$, the cost of production of one vehicle $Z_0(x_k)$, the cost of development, testing and delivery of a vehicle for production $Z_p(x_k)$, the cost of operating or storing a vehicle per unit of time $Z_c(x_k)$, additional costs per vehicle per unit of time $Z_d\left(\frac{z}{x_k}\right)$. Then we have the formula (1) as follows

$$C_N = \sum_{k=0}^N (F(z_{k+1}) - F(z_k)) \cdot Z_0(x_{k+1}) + \sum_{k=0}^N Z_p(x_{k+1}) + \int_0^T \sum_{k=0}^N Z_c(x_{k+1}) [F(z_{k+1}) - F(z_k)] dt + \int_0^T \sum_{k=0}^N \int_{x_k}^{z_k} \varphi(x) Z_d\left(\frac{z}{x_k}\right) dx dt \rightarrow \min \quad (2)$$

Then the problem of determining such a set x_k, z_k for which the value will be minimal, arises.

The solution can be found by the random search method according to the structural diagram (Fig. 1).

In this way:

we define N ;

we get $N-1$ random numbers from a set of uniformly distributed from 0 to x_N . Adding x_N to them and arranging them in ascending order, we get the previous row z_k ;

getting N random numbers from the same population, and the previous ones, we have the previous row x_k ;

replacing the values x_k and z_k from the previous series in such a way that $z_k \geq x_k$, we get the series z_k and x_k for this attempt and perform the calculations C_N ;

we repeat the cycle many times, memorizing the best option for C_N ;

compare the results with $z_k = x_k$.

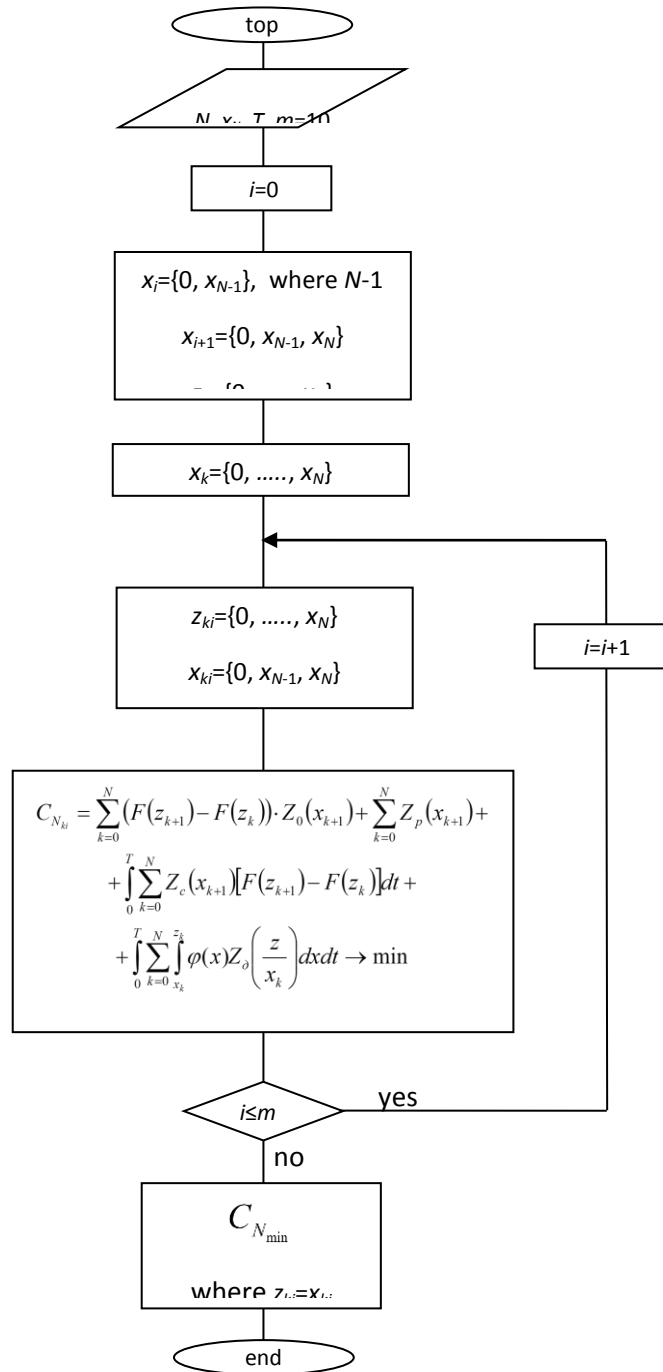


Fig. 1. Block diagram of the choice x_k , C_N

Practice shows that dependence $Z_o\left(\frac{z}{x_k}\right)$ can be of a different nature.

In the first case, it is a step function

$$\begin{aligned}
 Z_{\delta}\left(\frac{z}{x_k}\right) &= 0 \text{ where } \frac{z}{x_k} \leq 1; \\
 Z_{\delta}\left(\frac{z}{x_k}\right) &= Z *_{\delta} \text{ where } 1 \leq \frac{z}{x_k} \leq 2; \\
 Z_{\delta}\left(\frac{z}{x_k}\right) &= nZ *_{\delta} \text{ where } n \leq \frac{z}{x_k} \leq n+1.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

In the second case, it is a function of the following form

$$\begin{aligned}
 Z_{\delta}\left(\frac{z}{x_k}\right) &= 0 \text{ where } \frac{z}{x_k} \leq 1; \\
 Z_{\delta}\left(\frac{z}{x_k}\right) &= k_{\delta}\left(\frac{z}{x_k} - 1\right) \text{ where } \frac{z}{x_k} \geq 1.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

The second case is limiting with respect to the first case where $n \rightarrow \infty$.

In the first case, a heuristic method of solving the problem can be used. In the second case, we write the equation as follows

$$\begin{aligned}
 C_N = \sum_{k=0}^N [F(z_{k+1}) - F(z_k)] \cdot \left[Z_0(x_{k+1}) + \int_0^T Z_c(x_{k+1}) dt \right] + \sum_{k=0}^N Z_p(x_{k+1}) + \\
 + \sum_{k=0}^N \int_{x_k}^{v_k} f(x) \left(\frac{x}{x_k} - 1 \right) dx \int_0^T k_{\delta} dt \rightarrow \min,
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

where $v = \frac{z_k}{x_k}$.

Due to the fact that v is not a discrete quantity, it is very difficult to solve the problem. One of the possible methods of solution is a consistent search for v while solving the problem of choosing the optimal series for each v .

Consider one of the cases of solving this problem. We accept the following assumptions

$$\begin{aligned}
 F(x) &= bx \text{ where } 0 \leq x \leq x_N; \\
 F(x) &= 0 \text{ where } x \leq 0; \\
 F(x) &= bx_N \text{ where } x \geq x_N.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Let us estimate the change of expenses by the following dependences

$$\begin{aligned} Z_0(x) &= ax; \\ Z_p(x) &= cx; \\ Z_c(x) &= ex. \end{aligned} \tag{7}$$

Then

$$\begin{aligned} f(x) &= b \text{ where } 0 \leq x \leq x_N; \\ f(x) &= 0 \text{ where } x < 0 \text{ where } x \geq x_N. \end{aligned} \tag{8}$$

Let us simplify the problem so that it is necessary to choose such value x_k , assuming that one type of vehicles is used. In this case, $z_k = x_N$ and the expression (5) has the following form

$$\begin{aligned} C_N &= bx_N \left(ax_k + \int_0^T ex_k dt \right) + cx_k + \int_{x_k}^{x_N} b \left(\frac{x}{x_k} - 1 \right) dx \int_0^T k_o dt = \\ &= x_k \left[bx_N(a + eT) + c - \frac{1}{2} bk_o T \right] + \frac{bk_o T x_N^2}{2x_k} - bk_o T x_N \rightarrow \min. \end{aligned} \tag{9}$$

Differentiating the expression (9) using x_k , equating the derivative to zero and solving the equation, we find a formula for calculating the optimal value x_k .

$$y'(x_k) = bx_N(a + eT) + c + \frac{1}{2} bk_o T + \frac{bk_o T x_N^2}{2x_k} = 0 \tag{10}$$

$$x_k = x_N \sqrt{\frac{k_o T}{2x_N(a + eT) + 2\frac{c}{b} + k_o T}}. \tag{11}$$

If we get $x_k > x_N$, then we need to accept $x_k = x_N$.

To calculate the value x_{k_i} for different service life of vehicles, the following initial data is accepted:

costs of production of one vehicle $Z_0(x_k) = 10 \cdot 10^6$ hryvnia;

the cost of development, testing and installation for the production of vehicles $Z_p(x_k) = 10^6$ hryvnia;

cost of operation of vehicles per unit time hryvnia;

additional costs per vehicle per unit time $Z_o\left(\frac{z}{x_k}\right) = 0,3Z_c(x_k) = 0,3 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 10^6$ hryvnia.

The corresponding coefficients of equations (6), (7) are calculated for the standard service life $T = 20$ years. Thus recalculation of years of operation in kilometers of run was carried out as follows.

$$T_{км} = S_{\delta} \cdot t_{\delta/м} \cdot k_{м} \cdot T, \quad (12)$$

where S_{δ} – average daily mileage of vehicles, $S_{\delta} = 300$ km/per day;

$t_{\delta/м}$ – number of days per month, $t_{\delta/м} = 30,4$ per day;

$k_{м}$ – number of months in a year, $k_{м} = 12$ months;

T – regulatory service life of vehicles.

Thus $T_{км} = S_{\delta} \cdot t_{\delta/м} \cdot k_{м} \cdot T = 2,16 \cdot 10^6$ km.

The following service life of vehicles $T_1 = 10$ years ($1 \cdot 10^6$ км), $T_2 = 15$ years ($1,62 \cdot 10^6$ км), $T_3 = 20$ years ($2,16 \cdot 10^6$ км) were accepted for calculation.

The coefficients of equations (6), (7) were determined for the service life of $T_3 = 20$ years.

$$a = \frac{Z_0(x_k)}{T_3}; \quad a = \frac{10 \cdot 10^6}{2,16 \cdot 10^6} = 4,63 \text{ hryvnia /km};$$

$$c = \frac{Z_p(x_k)}{T_3}; \quad c = \frac{10^6}{2,16 \cdot 10^6} = 0,463 \text{ hryvnia /km};$$

$$e = \frac{Z_c(x_k)}{x_N \cdot T_3}; \quad e = \frac{20 \cdot 10 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 2,16 \cdot 10^6} = 0,093 \text{ hryvnia /km};$$

$$k_{\delta} = \frac{Z_{\delta}\left(\frac{x_N}{x_k}\right)}{T_3}; \quad k_{\delta} = \frac{0,3 \cdot 20 \cdot 10 \cdot 10^6}{2,16 \cdot 10^6} = 27,8 \text{ hryvnia /km},$$

where x_N – maximum range of cargo delivery, $x_N = 10^3$ km.

The value of the coefficient b is calculated for the entire period of operation of vehicles.

$$b = \frac{1}{T_3}; \quad b = \frac{1}{2,16 \cdot 10^6} \text{ km}^{-1}.$$

Values x_{k_i}, C_{N_i} for the service life T_i are calculated using Excel and are shown in Table 1.

Table 1. Values of quantities x_{k_i} , C_{N_i} for service life T_i

Service life T_i , year	10	15	20	25	30
Average daily mileage x_{k_i} , li	260	320	360	400	430
Total costs C_{N_i} , hryvnia	38816	43218	53116	55681	61913

Graphic representations in the form $C_N = f(T)$, $T = f(x_k)$ are shown in Fig. 2

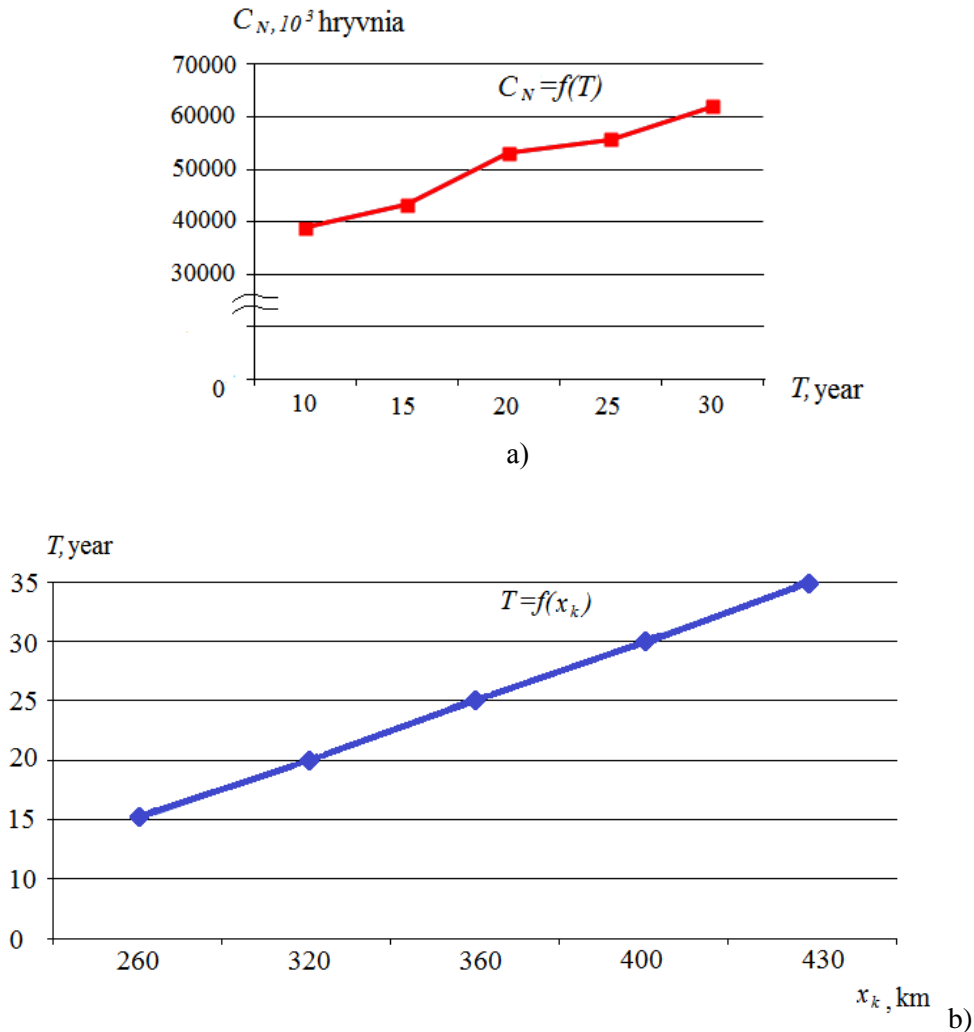


Fig. 2. Dynamics of dependencies a) $C_N = f(T)$, b) $T = f(x_k)$

As it can be seen from the above dependencies (Fig. 2), to ensure a given average daily range of traffic at the appropriate service life T , it is necessary to comply with the mileage x_k , taking into account the amount of costs C_N .

The nature of the change in costs from the service life at the optimal value according to 20 years increases, then slows down slightly to 25 years, but after this period increases again.

Conclusions

1. When assessing the optimal service life of vehicles, the following costs must be taken into account such as the development of the vehicle, its creation, testing and production, the cost of operation and storage, as well as additional costs.

2. By modeling with the help of the developed algorithm, the optimal values x_k and C_N for a given vehicle with a period of use are determined. As it can be seen from the obtained dependencies, where large T , the meaning in carrying out additional measures for the maintenance of the vehicle disappears due to a significant decrease in the increase in value x_k .

3. The above provisions make it possible to make optimal decisions regarding the expediency of interaction among various modes of transport to ensure the implementation of the required transportation distance.

REFERENCES

1. Kotenko, A.M., Krashenin, O.S., Shapatina, O.O. (2014). Udoskonalennia protsesu kombinovanykh perevezen vantazhiv [Improving the process of combined cargo transportation]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(70), 4–8 [in Ukrainian].
2. Panchenko, S., Lavrukhin, O., Shapatina, O. (2017). Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 1/3(85), 39–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.92203.
3. Lavrukhin, O., Zapara, V., Zapara, Y., Shapatina, O., Bogomazova, G. (2017). Investigation into the bimodal transportation process by modelling rail module states. *Transport Problems*, 12(2), 99–112. DOI: 10.20858/tp.2017.12.2.10.
4. Butko, T.V., Kostienikov, O.M., Prokhorov, V.M., Shapatina, O.O. (2019). Rozrobka avtomatyzovanoi tekhnolohii planuvannia intermodalnykh perevezen na osnovi vektornoj optymizatsii [Development of automated technology for planning of intermodal transportations on the basis of multiobjective optimization]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 188, 71–85 [in Ukrainian].
5. Dărăban, N.S., Ștefănescu, P., Crisan, P. (2012). Economic Benefits of Developing Intermodal Transport in the European Union. *Annals of the University of Oradea: Economic Science*, 1(2), 81–87.
6. Tadić, S., Zečević, S. (2012). Development of Intermodal Transport and Logistics in Serbia. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2(4), 380–390.
7. Mindur, L., Hajdul, M. (2011). The Concept of Intermodal Network Development in Poland Using Multi-Agent Systems. *Transport Problems: International Scientific Journal*, 6(3), 5–16.
8. Islam, D.M.Z. (2014). Barriers to and enablers for European rail freight transport for integrated door-to-door logistics service. Part 1: Barriers to multimodal rail freight transport. *Transport Problems: International Scientific Journal*, 9(3), 43–56.
9. Islam, D.M.Z. (2014). Barriers to and enablers for European rail freight transport for integrated door-to-door logistics service. Part 2: Enablers for multimodal rail freight transport. *Transport Problems: International Scientific Journal*, 9(4), 6–13.
10. Nobbe, A., Molinari, M., Mistrangelo, D., Keese, T. (2012). Metrocargo: ein innovatives Konzept für intermodalen Gütertransport von Tür zu Tür [Metrocargo: an innovative concept for the intermodal door-to-door transport of freight]. *Eisenbahntechnische Rundschau – Train Technology Review*, 3, 26–28 [In German].
11. Havenga, Jan, H., Simpson, Z., Fourie, P. F., A. de. Bod. (2011). Sustainable Freight Transport In South Africa: Domestic Intermodal Solutions. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 5(1), 149–169.
12. Congli, Hao, Yixiang, Yue. (2016). Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System. *Procedia Engineering*, 137, 382–390.
13. Kaderavek, P. (2012). RailRunner Looks to Europe. *Railvolution*, 4/12, 126.
14. Krashenin, O., Klymenko, O., Ponomarenko, O., Yakovlev, S. (2018). Justification of Statutory Service Life Extension of Locomotives on the Basis of Theory of Aging. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 174–178.
15. Tartakovskiy E.D., Ustenko O.V., Krashenin O.S., Oboznyi O.M. (2012). Otsinka pokaznykiv TO pry podovzheni terminu ekspluatatsii TRS po narobtsi [Performance assessment of MS during the extended operation life of the TRS]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu – Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 132, 5–11 [in Ukrainian].

Олександр Крашенінін¹, Ольга Шапатіна^{2}, Віталій Пономаренко³*

¹ Професор, Кафедра експлуатація та ремонт рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна

² Старший викладач, Кафедра управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна

³ Старший викладач, Кафедра іноземні мови, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна

ОЦІНКА ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ РЯДУ ЧИННИКІВ

Сучасні транспортні засоби (ТЗ), що експлуатуються на залізницях України, майже вичерпали свій ресурс або його перевищили. Продовжується перевитрата фінансових і матеріальних ресурсів на їх утримання. Нормативний термін експлуатації ТЗ був розрахований на стабільні економічні умови використання ТЗ і своєчасне їх оновлення у міру старіння.

Термін експлуатації сучасних транспортних засобів визначається впливом багатьох чинників, не врахування яких може привести до значних витрат навіть при дотриманні нормативного терміну експлуатації.

Для залізничного транспорту ці чинники потребують сучасного уточнення, оскільки в експлуатації термін їх роботи часто перевищує нормативний або, як для інтермодального транспорту, взагалі термін експлуатації не має строгого обґрунтування.

Відповідно до цього в статті проаналізовані питання щодо оцінки впливу на термін експлуатації ТЗ складових витрат на його утримання і середньодобового пробігу.

Показано, що, по-перше, визначення терміну експлуатації ТЗ необхідно ув'язувати з витратами на розробку ТЗ, його створення, випробування і постановку на виробництво, витратами на експлуатацію і зберігання, а також з додатковими витратами, а, по-друге, з оптимальним показником середньодобового пробігу, при якому всі наведені витрати мінімальні.

Ключові слова: транспортний засіб, оптимальний середньодобовий пробіг, термін експлуатації, мінімальні приведені витрати.

Твердомед Володимир Миколайович^{1}, Саяпіна Інна Олександрівна²,
Азарков Олександр Володимирович³, Бойко Володимир Дмитрович⁴*

¹Декан факультету інфраструктури і рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

²Доцент кафедри «Телекомунікаційні технології та автоматика», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1681>

³Доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8250-6280>

⁴Доцент кафедри «Залізнична колія та колійне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-9192-8394>

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

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ УЛАШТУВАННЯ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ В КРИВИХ ДІЛЯНКАХ РАДІУСА МЕНШЕ 350 МЕТРІВ

Традиційна конструкція верхньої будови колії на магістральних залізницях України в кривих ділянках радіуса менше 350 м – це ланкова конструкція колії з дерев'яними шпалами. Така конструкція колії не раціональна при діючих експлуатаційних умовах. Застосування більш прогресивної безстикової конструкції колії в кривих радіуса менше 350 м обмежене в першу чергу з умови забезпечення поперечної стійкості рейко-шпальної решітки. Для можливості розширення застосування безстикової конструкції колії в кривих ділянках радіуса менше 350 м, необхідно знати величини поперечних сил взаємодії конструкцій верхньої будови колії з рухомим екіпажем. Знаючи сили взаємодії, можна оцінити на яку величину буде забезпечуватися поперечна стійкість рейко-шпальної решітки та прийняти конструктивні рішення по її збільшенню.

У роботі наведена методика визначення поперечних горизонтальних сил взаємодії колії і рухомого екіпажу в кривих радіуса менше 350 м з урахуванням квазістатичних стискаючих сил в поїзді. Причини виникнення цих сил пов'язані з наявністю ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеплення в горизонтальній та вертикальній площині. За наведеною методикою проведені теоретичні розрахунки горизонтальних поперечних сил взаємодії та визначені коефіцієнти стійкості рейко-шпальної решітки в кривих ділянках.

Зроблені основні висновки щодо можливості експлуатації безстикової конструкції колії в кривих ділянках радіуса 350 м і менше.

Ключові слова: залізнична колія, безстикова конструкція колії, криві малого радіуса, поперечна стійкість, горизонтальні поперечні сили.

Вступ. Основна конструкція залізничної колії на залізницях України – безстикова колія температурно-напруженого типу без сезонної розрядки температурних напружень. На рис. 1 наведено застосування безстикової та ланкової конструкцій колії на залізницях України.

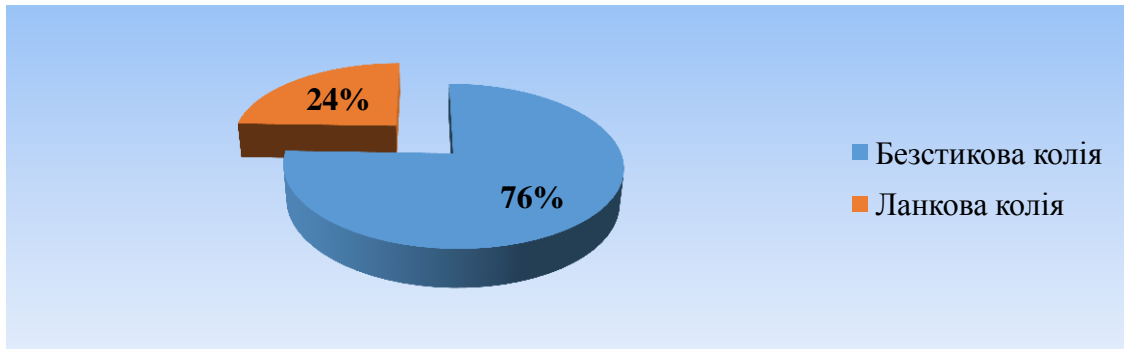


Рис. 1. Конструкція залізничної колії

Як видно з рис.1, ланкова конструкція залізничної колії на даний час експлуатується на четвертій частині розгорнутої довжини головних колій і складає 6479,3 км. Це переважно місця залізничної колії, де безстикова конструкція не може застосовуватися з конструктивних обмежень. До одних з таких місць відносяться ділянки колії, де радіус кривої становить менше 350 м. На рис. 2 наведено протяжність кривих ділянок на головних коліях.

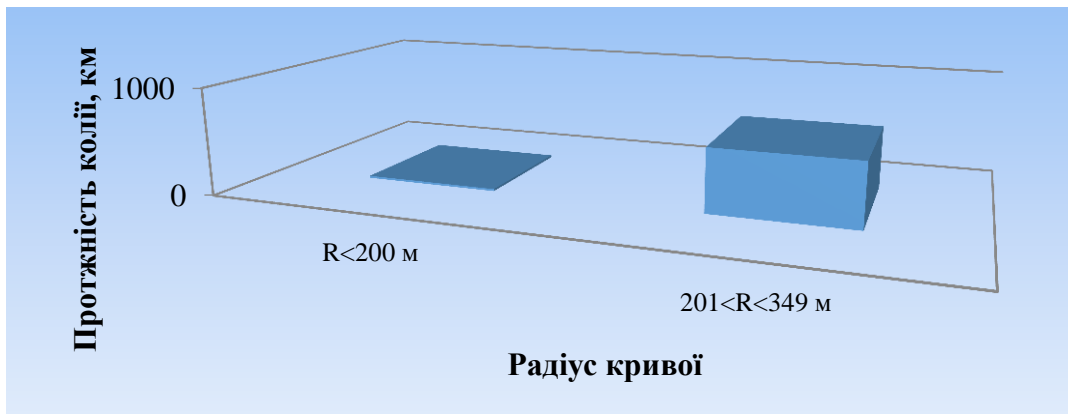


Рис. 2. Протяжність кривих ділянок на головних коліях залізниць України

Як видно, криві ділянки колії радіуса 200-349 м мають протяжність 593 км, що становить близько 2 % від загальної довжини головних колій. Але саме в цих ділянках спостерігається підвищений знос рейок, гребнів колісних пар та інтенсивне накопичення залишкових деформацій колії. До 25 % рейок, які мають дефекти контактної-втомного походження на поверхні кочення, в тому числі боковий знос головок рейок, знаходяться саме в таких кривих. Дерев'яні шпали, що застосовуються на таких ділянках, мають значно менший строк служби. Більшість кривих радіусів менше 350 м знаходяться в гірських районах, де взаємодія колії і рухомого складу ускладнюється наявністю значних поздовжніх сил, викликаних ухилами залізничних ліній.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Для збільшення ресурсу роботи рейок та інших конструктивних елементів в таких ділянках колії, необхідно зменшити сили взаємодії залізничної колії та рухомого екіпажу. Враховуючи, що в кривих радіуса менше 350 м застосовується ланкова колія на дерев'яних шпалах, то перехід на безстикову конструкцію колії із залізобетонними шпалами дозволить суттєво зменшити сили взаємодії між рейковими нитками та гребнями колісних пар,

подовжити ресурс роботи конструктивних елементів верхньої будови колії, зменшити опір руху поїзда та витрати на ремонт рухомого складу і рейкової колії [1].

Дослідження можливості збільшення ресурсу роботи залізничної колії в кривих ділянках за рахунок параметрів рейкової колії досліджувались в роботах [2-5].

Улаштування безстикової колії в кривих радіуса менше 350 м неможливе без удосконалення конструкції верхньої будови колії, що застосовуються в кривих більших радіусів. Потреба в застосування іншої конструкції залізничної колії викликана збільшенням дії силових факторів, які впливають на поперечну, поздовжню стійкість та міцність залізничної колії.

Для проектування нових конструкцій елементів верхньої будови колії чи удосконалення існуючих необхідно знати величини сил, які будуть діяти на конструкцію колії в кривій ділянці та чи буде забезпечена поперечна стійкість рейко-шпальної решітки.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є проведення теоретичних досліджень поперечної стійкості безстикової колії в кривих ділянках радіуса від 200 м до 300 м. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

проведення досліджень експлуатації кривих ділянок колії з радіусом $R < 350$ м;

визначення сумарних горизонтальних сил з урахуванням квазістатичної поздовжньої сили, що діє при гальмуванні поїзда, та конструктивних особливостей зчпних приладів;

визначення умови забезпечення поперечної стійкості колії в кривих ділянках $R < 350$ м.

Матеріали та методи дослідження. Поперечна стійкість колії залежить від конструкції верхньої будови колії, її стану, величини співвідношення силової взаємодії у вертикальній та горизонтальній площині та опору рейко-шпальної решітки поперечному зсуву. Опір зсуву решітки залежить від характеристик та стану поверхонь підрейкових опор, ступеня ущільненості і роду баласту, конструкції підрейкових опор, характеру передачі навантаження на опори. Суттєвий вплив на формування сумарного опору поперечного зсуву рейко-шпальної решітки має бокова жорсткість повороту рейки у вузлі рейкового скріплення.

При визначенні опору рейко-шпальної решітки під впливом на колію поїзного колісного навантаження слід враховувати як початковий опір шпал поперечним зміщенням W_0 , так і сили тертя шпал по баласту під впливом вертикального осьового навантаження $2P$. Граничний опір переміщенню групи шпал в баласті $W_{ш}$, що знаходяться під впливом горизонтальної рамної сили Y_p і вертикального осьового навантаження, можна визначити за формулою [6]:

$$W_{ш} = W_0 + f_{ш} 2P_{ос}, \quad (1)$$

де $2P_{ос}$ – значення осьового вертикального навантаження, яке слід брати рівним статичному навантаженню (збільшення опору за рахунок сил тертя від динамічних добавок від вертикальних сил можна не враховувати для запасу стійкості рейко-шпальної решітки);

$f_{ш}$ – коефіцієнт тертя шпал по баласту, що залежить від стану поверхонь, які труться, матеріалу баласту, його щільності, вологості, засміченості. Приймається для колії зі щебневим баластом $f_{ш}=0,3-0,5$, для колії з піщано-гравійним баластом $f_{ш}=0,3-0,45$;

W_0 – початковий опір групи шпал, що переміщуються, без врахування вертикального навантаження. Розрахунки і експериментальні дослідження показують, що в звичайних умовах при дії бокових сил від колісного навантаження в роботі активно беруть участь тільки 6-7 суміжних шпал, які знаходяться під цим навантаженням. На основі рекомендацій Бюро експериментальних досліджень Міжнародного союзу залізниць (МСЗ) можна приймати $W_0=10$ кН для колії з дерев'яними шпалами і $W_0=15$ кН для колії з залізобетонними шпалами.

Згідно з [6], умова забезпечення стійкості рейко-шпальної решітки буде виконуватись в тому випадку, коли максимальна горизонтальна рамна сила, Y_p^{\max} , що передається від колісної пари на рейки, не буде перевищувати граничного опору рейко-шпальної решітки поперечному зсуву $W_{ш}$, тобто повинна виконуватись нерівність:

$$Y_p^{\max} < W_{ш} \cdot [\varepsilon], \quad (2)$$

де $[\varepsilon]$ – коефіцієнт, що передбачає можливе зниження поперечного опору зсуву рейко-шпальної решітки безпосередньо після ремонту колії. Звичайно приймають $[\varepsilon]=0,85$ з урахуванням того, що після ремонту опір зрушенню зменшується до величини, що складає 70-80% від початкового і він відновлюється тільки після пропуску 1,0-1,5 млн. т вантажу бруто.

Силова взаємодія екіпажу і колії в горизонтальній площині при русі в кривих ділянках колії залежить від схеми вписування екіпажу в криву. При динамічному вписуванні слід розрізняти три принципово різні схеми вписування екіпажів в кривій: вільне, перекісне і хордове, що дають різноманітні схеми силової взаємодії. Величини горизонтальних поперечних сил, що діють на колію, можна визначити з розгляду кожної конкретної схеми вписування, при цьому значення їх в усіх випадках залежить від положення центру повороту екіпажу і відстані від нього до осі, що розглядається, а також від величини вертикального осьового навантаження та коефіцієнта тертя коліс по рейці. Всі перераховані фактори, які впливають на характеристику силової взаємодії колії та рухомого екіпажу, враховуються при визначенні бокових сил.

Для ілюстрації практичних розрахунків розглянемо приблизну схему перекосного вписування екіпажу в криву на рис. 3 і схему розподілення сил на колісній парі на рис. 4.

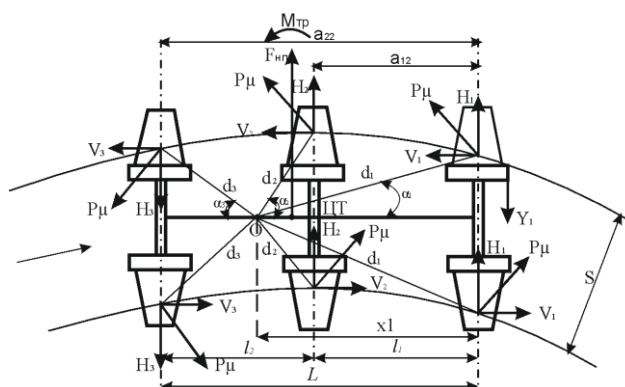


Рис. 3. Схема перекосного вписування 3-вісного візка в криву

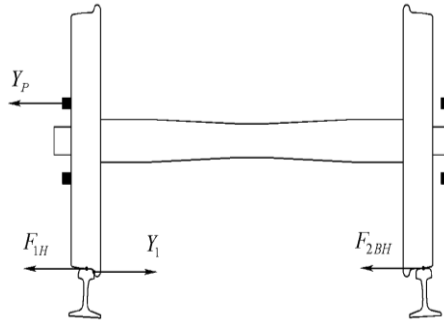


Рис. 4. Схема розподілення сил на колісній парі під час руху в кривій

У [8] наведені наближені формули для визначення поперечних сил, що передаються на зовнішню рейку через зовнішнє колесо передньої по ходу осі для різноманітних екіпажів. Для більш точного визначення значення силової бокової взаємодії колії та екіпажів при русі поїздів необхідно користуватися графік-паспортами.

Наведені формули [8] для визначення значень горизонтальних сил не враховують дію коливання надресорної та підресореної частини екіпажу під час руху. Для визначення максимальних динамічних сил з урахуванням інерційної дії коливання частин рухомого екіпажу слід використовувати коефіцієнти бокової динаміки, які можна визначити за наведеними формулами [8].

Поряд з перерахованими поперечними горизонтальними силами взаємодії колії та рухомого екіпажу виникають додаткові поперечні сили, які не були враховані у формулах наведених у [10].

Додаткові поперечні сили виникають при русі поїзда за рахунок розтягувань та стискань поїзда на прямих та кривих ділянках. Причини виникнення цих сил пов'язані з наявністю ексцентриситету закріплення хвостовика автозчеплення в горизонтальній та вертикальній площині. Значення ексцентриситету обумовлене відхиленням від нормального (проектного) положення хвостовика автозчеплення при виготовленні екіпажу на заводі, завантаженням вагону, зносом коліс, стисканням поїзда.

При квазістатичному стисканні поїзда його ланки L та $2a$ під час руху намагаються перекоситися. Утримують їх в основному положенні поперечні зв'язки, роль яких відіграють візки з ресорами та колісними парами. Із збільшенням квазістатичного стискання поїзда, перекося збільшуються, викликаючи збільшення бокової та вертикальної групової дії коліс візка на колію. Ці додаткові поперечні сили прикладені до візка та утворюють в горизонтальному напрямі додаткові бокові взаємодії коліс візка на колію. При цьому колеса суміжних візків діють на різні рейкові нитки, намагаючись розтиснути колію чи зсунути її суміжними візками в різні сторони.

В кривих ділянках колії горизонтальна складова H_R групової бокової дії коліс на колію при розтягуванні поїзда квазістатичною силою F залежить від цієї сили, радіуса кривої, довжини екіпажу між осями зчеплення автозчеплень та згідно [11] визначається формулою:

$$H_R = F_{\text{роз}} \cdot \sin \frac{90^\circ(L + 2a)}{\pi \cdot R}, \quad (3)$$

де $F_{\text{роз}}$ – квазістатична розтягуюча сила в поїзді;

L – відстань між хвостами автозчеплень рухомої одиниці;

a – довжина автозчеплення.

Сила H_R направлена в середину кривої при розтягуючих силах F . Із формули (3) слідує, що в прямих при $R = \infty$, $H_R = 0$. В кривих ділянках колії буде тим більша додаткова групова бокова взаємодія коліс візка на колію, обумовлена квазістатичною розтягуючою силою в поїзді, чим менший радіус кривої R та чим більша відстань між хвостовиками автозчеплення.

При квазістатичному стисканні рухомого поїзда силою F на прямих ділянках колії виникає групова бокова дія коліс візка на колію H_e , обумовлена ексцентриситетом e закріплення хвостовиків автозчеплень, та групової бокової взаємодії на колію H_δ , обумовлене горизонтальним поперечним переміщенням δ кузова в зоні візка із-за перекосів по схемі «ялинка». Зазначена сили за формулою:

$$H_{\delta e} = \frac{F_{смuc} \cdot L \cdot (\delta \cdot L + e \cdot l)}{a \cdot l^2} \quad (4)$$

Відмітимо, що сили H_e і H_δ направлені в сторону зовнішньої рейки кривої, що важливо при розрахунках стійкості колії в кривих.

У формулі 4 позначено:

l – довжина кузова між центрами повороту (шворнями) візків;

e – ексцентриситет кріплення автозчеплення;

δ – поперечне переміщення кузова в зоні візка із-за перекосу по схемі «ялинка»;

$F_{смuc}$ – квазістатична стискаюча сила в поїзді. Максимально можлива квазістатична стискаюча сила в автозчепленні, що з'єднує локомотив з поїздом, при русі по прямій площадці дорівнює силі зчеплення локомотивних коліс з рейками та визначається за формулою:

$$F_{сч.о} = n \cdot P_{ол} \cdot f_{сч}, \quad (5)$$

де n – кількість осей в локомотиві;

$P_{ол}$ – вертикальне навантаження від колісної пари локомотива на рейки;

$f_{сч}$ – коефіцієнт зчеплення коліс колісної пари з рейками при гальмуванні 0,22-0,25.

При русі поїзда по ухилу та в кривій, максимальна квазістатична сила стискання в автозчепленні, що з'єднує локомотив з поїздом, визначається за формулою:

$$F_{сч.о} = n \cdot P_{ол} \cdot f_{сч} \pm \Delta F_i + \Delta F_R, \quad (6)$$

де ΔF_i – додаткова гравітаційна складова поздовжньої квазістатичної сили в автозчепленні для екіпажів, що їдуть по ухилу i ;

ΔF_R – додаткова складова поздовжньої квазістатичної сили в автозчепленні екіпажу, що їде по кривій.

Поздовжня квазістатична сила в автозчепленні для екіпажів, що рухаються по ухилу i розраховується за формулою:

$$\Delta F_i = Q_n \cdot \varpi_i + Q_l \cdot \varpi_i, \quad (7)$$

де Q_l – маса локомотива;

Q_n – вага поїзда;

ϖ_i – питомий опір руху по кривій, що розраховується за формулою:

$$\varpi_i = i \cdot g, \quad (8)$$

де i – ухил колії;

g – прискорення сили тяжіння.

Поздовжня квазістатична сила в автозчепленні екіпажа, що рухається по кривій, розраховується за формулою:

$$\Delta F_R = Q_l \cdot \varpi_r + Q_n \cdot \varpi_r, \quad (9)$$

де ϖ_r – питомий опір руху від кривизни визначається за формулою:

якщо довжина поїзда дорівнює або менша за довжину кривої

$$\varpi_r = 3,5 \frac{\alpha^0}{S_{кр}} + 1,5 \cdot a \quad (10)$$

чи

$$\varpi_r = \frac{200}{R} + 1,5 \cdot a; \quad (11)$$

при довжині поїзда більшій за довжину кривої

$$\varpi_r = \left(\frac{200}{R} + 1,5 \cdot a \right) \cdot \frac{S_{кр}}{l_n} \quad (12)$$

чи

$$\varpi_r = \left(3,5 \cdot \frac{\alpha^0}{S_{кр}} + 1,5 \cdot a \right) \cdot \frac{S_{кр}}{l_n}; \quad (13)$$

де R – радіус кривої,

$S_{кр}$ – довжина кривої,

α^0 – кут повороту кривої в радіанах,

a – діюча величина непогашеного відцентрового прискорення в кривій.

Найгірші умови при розрахунках поперечної стійкості рейко-шпальної решітки будуть виникати при різкому гальмуванні поїзда в кривій ділянці колії, оскільки з'являється додаткова групова бокова дія коліс екіпажу на колію від стискаючої поздовжньої квазістатичної сили. Ця сила буде діяти за межами локомотива у поїзді і направлена в зовнішню сторону кривої. Значення додаткової бокової групової сили, розрахованої за формулою (4) вантажного та пасажирського поїзда, приводиться в табл. 1. Поперечна стійкості рейко-шпальної решітки проти бокового зсуву в горизонтальній площині за межами локомотиву в поїзді буде визначатися формулою:

$$Y_{\delta}^{\max} + H_{\delta e} < W_{\theta} \cdot [\varepsilon]. \quad (14)$$

Поперечну стійкість рейко-шпальної решітки можна оцінити коефіцієнтом стійкості за формулою:

$$K_{cm}^{p-w} = \frac{W_{\theta} \cdot [\varepsilon]}{Y_{\delta}^{\max} + H_{\delta e}}, \quad (15)$$

де $K_{ст}^{p-u}$ – коефіцієнт стійкості рейко-шпальної решітки повинен бути більше одиниці.

Таблиця 1. Додаткові бокові сили, що виникають за рахунок дії поздовжньої стискаючої квазістатичної сили

Поїзд \ Сила	R=200 м	R=250 м	R=300 м
	Нде, кН	Нде, кН	Нде, кН
Локомотив ВЛ80, вантажні вагони на візках ЦНП-ХЗ, вага поїзда 4500 т	29,73	27,56	26,82
Локомотив ВЛ80, вантажні вагони на візках ЦНП-ХЗ, маса поїзда 2500 т	27,14	25,5	24,12
Локомотив ЧС-8, вантажні вагони на візках КВЗ-ЦНП, маса поїзда 1600 т	23,73	20,35	18,47

За наведеною методикою були проведені розрахунки поперечної стійкості в горизонтальній площині рейко-шпальної решітки проти поперечного зсуву в кривій ділянці колії радіусів: 200 м, 250 м, 300 м. В розрахунках приймалась підкладкова конструкція колії з типовими скріпленнями СКД65-Б. Результати розрахунку коефіцієнтів стійкості наводяться у табл. 2. При визначенні рамних сил приймалася величина непогашеного прискорення для вантажного поїзда $0,3 \text{ м/с}^2$, для пасажирського $0,7 \text{ м/с}^2$.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів поперечної стійкості рейко-шпальної решітки

Екіпаж \ Радіус кривої, м	R=200 м	R=250 м	R=300 м
	Електровоз ВЛ 80 без зчленування візків	1,5	1,83	2,26
Вантажний вагон на 4-х вісних візках моделі ЦНП-ХЗ (без врахування поперечної сили від гальмування)	1,3	1,5	1,89
Вантажний вагон на 4-х вісних візках моделі ЦНП-ХЗ (з врахування поперечної сили від гальмування)	1,02	1,17	1,3

Висновки

1. Із наведеного технічного стану залізничної колії, розміщеної в кривих радіусів 350 м і менше, видно що є гостра необхідність застосування більш надійних конструкцій верхньої будови колії, особливо на вантажонапружених ділянках із затяжними підйомами, розташованими в гірських районах.

2. Підвищити надійність залізничної колії в кривих малого радіусу можна шляхом заміни дерев'яних шпал на залізобетонні з одночасним улаштуванням безстикової конструкції колії температурно-напруженого типу.

3. Улаштування безстикової конструкції колії температурно-напруженого типу в кривих радіуса 350 і менше можливе із збільшенням опору поздовжньому переміщенню рейко-шпальної решітки в баластовому шарі.

4. На основі проведених теоретичних розрахунків поперечної стійкості конструкції колії на залізобетонних шпалах з типовими скріпленнями СКД65-Б можна зробити наступні висновки:

4.1. В кривих ділянках колії із зменшенням радіусу кривої зменшується поперечна стійкість рейко-шпальної решітки. При русі вантажного вагону на візках моделі ЦНП-ХЗ по колії з рейковим скріпленням СКД65-Б при епюрі укладання шпал 1840 шт/км в кривій радіуса 200 м поперечна стійкість рейко-шпальної решітки зменшується на 10 % порівняно з кривою радіуса 300 м.

4.2. Додаткова дія поперечної горизонтальної сили, яка виникає при різкому гальмуванні поїзда, зменшує поперечну стійкість колії в цілому на 30%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Duan YF, Ni QB, Zhu Y., Gao BQ (2012) Моніторинг стану здоров'я та профілактика захворювань кривих доріжок. У: Ni YQ., Ye XW. (ред.) Матеріали 1-го міжнародного семінару з питань швидкісних та міжміських залізниць. Конспект лекцій з електротехніки, том 148. Спрингер, Берлін, Гейдельберг. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27963-8_37
2. Даренский А.Н., Тулей Ю.Л., Потапов Д.А. Численные исследования влияния параметров рельсовой колеи на боковой износ рельсов в кривых // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2016. № 6 (121). С. 36–42.
3. Alexander Darenskiy, Dmitry Potapov, Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskaya. Revisiting the reasons for contact fatigue defects in rails // Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering MATEC Web of Conf. Vol. 116, 03001, 2017.
4. Włodzimierz Bednarek. Longitudinal displacements of railway jointless track due to local temperature difference on its length. Transportation overview, 2020, № 2, P. 11-27. DOI: 10.35117/A_ENG_20_02_02.
5. Dominik Pokropski. Influence of the ballast resistance on the stability of continuous welded rail. Safety Engineering of Anthropogenic Objects, 2020, № 4, P.1-13.
6. Проектування та розрахунки конструкцій залізничної колії Підручник для вищих навчальних закладів в 2-х томах: / за ред. Е.І. Даніленка. Т.1 К.: «Хай-Тек Прес», 2019. 344 с.
7. Проектування та розрахунки конструкцій залізничної колії Підручник для вищих навчальних закладів в 2-х томах: / за ред. Е.І. Даніленка. Т.2 К.: «Хай-Тек Прес», 2019. 344 с.
8. Даніленко Е.І. Залізнична колія /Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом/Підручник для вищих навчальних закладів Київ, Інпрес,2010. Том 1 528 с.
9. Даніленко Е.І. Залізнична колія /Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом/Підручник для вищих навчальних закладів Київ, Інпрес,2010. Том 2 456 с.
10. Твердомед В.М., Возненко А.Д., Бойко В.Д. Розрахунок поперечних горизонтальних сил у кривих ділянках рейкової колії [Текст] / В.М. Твердомед, // Зб. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». Київ, 2016. – Вип. 29. – С. 134-147.
11. Лысюк В.С. Надежность железнодорожного пути. М.: Транспорт, 2001. 287с.
12. Лысюк В.С. Прочность пути и его горизонтальная жесткость // Путь и путей. хоз-во. – 2004. - №5. – С. 12-16.
13. Твердомед В.М. Вплив конструктивного оформлення вузла рейкового скріплення на забезпечення поздовжньої стійкості безстикової колії / В.М. Твердомед, С.Л. Карпінський, О.О. Сорока // Зб. наук. праць УкрДУЗТ. Х.: УкрДАЗТ, 2017, Вип. 169, С. 47-54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2017_169_8
14. Rybkin V. V., Nastechik N. P., Marcul R.V. Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius $R \leq 300$ m. // Sciences in Cold and Arid Region. Beijing, 2013. Vol. 5, Iss. 654. P. 658. DOI: 10.3724/SP.J.1226.-2013.00654
15. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К.:Транспорт України, 2005. – 119 с.

REFERENCES

1. Duan YF, Ni QB, Zhu Y., Gao BQ (2012) Моніторинг стану здоров'я та профілактика захворювань кривих доріжок. У: Ni YQ., Ye XW. (ред.) Матеріали 1-го міжнародного семінару з питань швидкісних та міжміських залізниць. Конспект лекцій з електротехніки, том 148. Спрингер, Берлін, Гейдельберг. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27963-8_37
2. Darenskiy A.N., Tuley Yu.L., Potapov D.A. (2016). Chislennyye issledovaniya vliyaniya parametrov relsovoy kolei na bokovoy iznos relsov v krivykh [Numerical studies of the influence of the parameters of the rail track on the lateral wear of

the rails in the curves]. *Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zallznicnomu transporti – Information and control systems for railway transport*, 6 (121), 36–42. [in Russian]

3. Alexander Darenkiy, Dmitry Potapov, Yuseph Tuley, Natalia Bugaets, Alina Malishevskaya (2017). Revisiting the reasons for contact fatigue defects in rails. *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering MATEC Web of Conf.* Vol. 116, 03001.

4. Włodzimierz Bednarek (2020). Longitudinal displacements of railway jointless track due to local temperature difference on its length. *Transportation overview*, 2, 11-27. DOI: 10.35117/A_ENG_20_02_02.

5. Dominik Pokropski (2020). Influence of the ballast resistance on the stability of continuous welded rail. *Safety Engineering of Anthropogenic Objects*, 4, 1-13.

6. Danilenko E.I. (Eds) (2019). *Proektuvannya ta rozrahunki konstruksiy zaliznichnoyi koliiyi [Design and calculations of railway track structures]*. Kyiv: «High Tech Press», Vol. 1, 344 p. [in Ukrainian]

7. Danilenko E.I. (Eds) (2019). *Proektuvannya ta rozrahunki konstruksiy zaliznichnoyi koliiyi [Design and calculations of railway track structures]*. Kyiv: «High Tech Press», Vol. 2, 344 p. [in Ukrainian]

8. Danilenko E.I. (2010). *Zaliznichna koliiya. Ulashtuvannya, proektuvannya i rozrahunki, vzaemodiya z ruhomim skladom [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]*. Kyiv: Inpress, Vol. 1 [in Ukrainian]

9. Danilenko E.I. (2010). *Zaliznichna koliiya. Ulashtuvannya, proektuvannya i rozrahunki, vzaemodiya z ruhomim skladom [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]*. Kyiv: Inpress, Vol. 2 [in Ukrainian]

10. Tverdomed V.M., Voznenko A.D., Boyko V.D. (2016). *Rozrahunok poperechnih gorizontálnih sil u krivih dilyankah reykovoyi koliiyi [Calculation of transverse horizontal forces in curved sections of rail track]*. *Zbirnyk. naukovih. prats DETUT. Seriya «Transportni sistemi i tehnologiyi» – Collection of scientific works DETUT. Transport Systems and Technologies series*, 29. 134-147. [in Ukrainian]

11. Lysyuk V.S. (2001). *Nadezhnost zheleznodorozhnogo puti [Railway track reliability]*. Moscow:Transport, 287 p.

12. Lysyuk V.S. (2004). *Prochnost puti i ego gorizontalnaya zhestkost [The strength of the track and its horizontal stiffness. household]*. *Put i putevoe hozyaystvo – Track and track facilities*. 5. 12-16. [in Russian]

13. V.M. Tverdomed, S.L. Karpinskiy, O.O. Soroka (2017). *Vpliv konstruktivnogo oformlennya vuzla reykovogo skriplennya na zabezpechennya pozdovzhnoyi stiykosti bezstikovoyi koliiyi [Influence of constructive design of rail fastening unit on providing longitudinal stability of seamless track]*. *Zbirnyk. naukovih. prats UkrDUZT – Collection of scientific works UkrDUZT*, 169. 47-54. [in Ukrainian]

14. Rybkin V. V., Nastechik N. P., Marcul R.V. (2013). Stability issues of the continuous welded rail track on the concrete sleepers on the curves with radius $R \leq 300$ m. *Sciences in Cold and Arid Region*, Vol. 5, Iss. 654. P. 658. DOI: 10.3724/SP.J.1226.-2013.00654

Tverdomed Volodymyr¹, Saiapina Inna², Aharkov Olsandr³, Boiko Volodymyr⁴

¹ Dean of Infrastructure and Rolling Stock of Railways Faculty, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

² Associate professor, Telecommunication Technologies and Automation Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

³ Associate professor, Theoretical And Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

⁴ Associate professor, Railway Track And Track Facilities Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

THEORETICAL RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF JOINTLESS TRACK ARRANGEMENT IN CURVED SECTIONS OF RADIUS LESS THAN 350 METERS

The traditional structure of the upper structure of the track on the main railways of Ukraine in curved sections with a radius of less than 350 m is a link structure of the track with wooden sleepers. This track design is not rational under current operating conditions. The use of a more advanced jointless track design in curves with a radius of less than 350 m is limited primarily by the condition of ensuring the transverse stability of the rail-sleeper lattice. To be able to expand the use of jointless track construction in curved sections with a radius of less than 350 m, it is necessary to know the values of the transverse forces of interaction of the structures of the upper track structure with the moving carriage. Knowing the forces of interaction, it is possible to estimate by what value the

transverse stability of the rail-sleeper lattice will be provided and to make constructive decisions on its increase.

The method of determination of transverse horizontal forces of interaction of track and moving carriage in curves of radius less than 350 m taking into account quasi-static compressive forces in a train is given. The reasons for these forces are related to the presence of eccentricity of the auto-clutch shank in the horizontal and vertical planes. Theoretical calculations of horizontal transverse forces of interaction are carried out according to the given technique and coefficients of stability of a rail-sleeper lattice in curved sites are defined.

The main conclusions concerning the possibility of operation of the jointless track structure in curved sections with a radius of 350 m and less are made.

Keywords: *railway track, jointless track construction, small radius curves, transverse stability, horizontal transverse forces.*

Андрій Сулим^{1*}, Олександр Устенко², Олександр Мельник³, Андрій Ломонос⁴, Сергій Мужичук⁵, Валерій Соловей⁶

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

² Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3071-0332>

³ Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6111-7128>

⁴ Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5001-1280>

⁵ Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, м. Кременчук, 39621, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2653-1622>

⁶ Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, м. Кременчук, 39621, Україна.

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

ПРОЦЕДУРА ВИБОРУ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

В статті обґрунтовано необхідність використання асинхронного тягового електроприводу на рухомому складі метрополітену. Сформульовано переваги використання асинхронного тягового електроприводу у порівнянні з колекторним на базі двигунів постійного струму. Проаналізовано характеристики сучасного інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим електроприводом вітчизняного та закордонного виробництва. Сформульовано особливості вибору асинхронного тягового електроприводу з частотно-регульованим керуванням для інноваційного рухомого складу та наведено існуючий типовий алгоритм здійснення такого вибору. Розглянуто основні причини нераціонального вибору тягового асинхронного електроприводу для рухомого складу метрополітену та проаналізовано наслідки такого вибору. Запропоновано удосконалити процедуру вибору тягового асинхронного електроприводу з частотно-регульованим керуванням для рухомого складу метрополітену в частині врахування такого важливого експлуатаційного показника як питомі витрати електроенергії на тягу. Виконано вибір раціональних параметрів асинхронного тягового електроприводу з частотно-регульованим керуванням за запропонованою процедурою для заданих характеристик рухомого складу метрополітену. Визначено резерви економії енергоресурсів для заданих умов за рахунок впровадження на інноваційному рухомому складі асинхронного тягового електроприводу з раціональними параметрами. Встановлено, що характеристика коефіцієнта корисної дії тягового асинхронного двигуна в значній мірі впливає на показник питомих витрат електроенергії на тягу рухомого складу метрополітену та експлуатаційні витрати.

Ключові слова: асинхронний тяговий електропривод, вагон, метрополітен, рухомий склад, питомі витрати електроенергії на тягу, частотно-регульоване керування.

Вступ та постановка проблеми. Метрополітен є досить важливим видом громадського транспорту в містах-мегаполісах, на який припадає значна частина пасажирських перевезень (наприклад, в Києві близько 60 % від загального обсягу міських перевезень

забезпечує метрополітен). На даний час в Україні діє три метрополітени (Київський, Харківський, Дніпровський), які постійно розвиваються та розширюють свою мережу. Тому, в Україні розвиток метрополітенів є досить актуальною та пріоритетною задачею.

Однак, у вітчизняних метрополітенах залишається достатньо питань, які потребують нагального вирішення. Перш за все, це питання розвитку та оновлення вагонів метрополітену, підвищення енергоефективності рухомого складу під час експлуатації, покращення ресурсозбереження на рухомому складі.

Аналіз останніх досліджень. В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію як новостворений, так і модернізований рухомий склад. Найбільше оновлення рухомого складу здійснено у 2014–2015 рр. в КП "Київський метрополітен" в рамках виконання робіт з комплексної модернізації вагонів типу Є та їх модифікацій шляхом заміни колекторного тягового двигуна постійного струму на асинхронний електропривод. Ці роботи виконано на ПАТ "КВБЗ" за участі як вітчизняних, так і іноземних компаній (TOSHU, KNORR-BREMSE, Fuji-Electric, Mitsubishi electric Co., НВП "Хартрон-Експрес ЛТД" та інших). На даний час за цим проектом модернізовано та експлуатується 135 вагонів [1].

Головними відмінностями даного рухомого складу є покращений інтер'єр та екстер'єр, створення умов для перевезення осіб з особливими потребами, впровадження на ньому енергозберігаючого обладнання, насамперед систем рекуперації, мікропроцесорної системи керування, ефективного асинхронного приводу.

В цій роботі пропонується більш детально зупинитись саме на застосуванні ефективного асинхронного електроприводу з частотним керуванням. Для цього спираючись на досвід експлуатації колекторних та асинхронних двигунів в складі тягового рухомого складу виконано їх порівняльний аналіз.

За результатами порівняльного аналізу встановлено наступне [2–4]:

тангенціальна сила, віднесена до одиниці площі поверхні ротора, для асинхронного тягового двигуна (АТД) в 1,5-2 рази більше;

потужність, віднесена до одиниці площі поверхні ротора, для АТД в 1,5-2 рази більше;

лінійна швидкість ротора АТД може досягати 80-90 м/с, що перевищує допустимі значення лінійної швидкості для колекторних машин;

при збереженні частоти обертання ротора АТД на рівні частоти обертання якоря колекторного двигуна можливе збільшення моменту АТД на рівні 50 %;

за питомою потужністю АТД в 2,5-3 рази перевищує колекторні тягові двигуни, а його коефіцієнт корисної дії на 1,5-2 % вище колекторних.

Серед основних недоліків застосування колекторних двигунів слід зазначити:

низька надійність колекторного вузла та щіткового апарату;

обмеження за умовами комутації та механічної міцності потужності у відведених габаритах;

значні витрати на технічне обслуговування і ремонт під час експлуатації;

підвищена маса двигуна за умов низьких значень обертового моменту, що обмежує використання опорно-осьового підвішування двигуна;

підвищені витрати кольорових металів та активних матеріалів.

За умов застосування АТД на рухомому складі метрополітену можливо реалізувати наступні переваги:

1) значне спрощення тягового двигуна та підвищення надійності у порівнянні з колекторним (відсутня необхідність щоденного огляду колекторно-щіткового вузла);

2) підвищення надійності кузовного електричного обладнання внаслідок застосування безконтактних пристроїв перетворення потужності;

3) покращення тягових властивостей рухомого складу метрополітену завдяки використанню жорсткої тягової характеристики під час боксування. Існують дослідні результати, які показують збільшення коефіцієнту зчеплення на 20-40 % [2, 5];

4) збільшення потужності та моменту тягового двигуна за умов однакових габаритних розмірів (відсутній колектор, обмотки додаткових полюсів та компенсаційна обмотка);

5) підвищення продуктивності та експлуатаційних характеристик внаслідок реалізації переваг за попередніми пунктами.

Перелічені переваги не залишають сумніву в доцільності впровадження АТД на залізничному рухомому складі, зокрема вагонах метрополітену. Цьому питанню присвячено чимало робіт як вітчизняних, так і закордонних вчених [2–19]. Такі дослідження виконувались за участю Гетьмана Г.К., Євстаф'єва А.М., Курбасова А.С., Любарського Б.Г., Мнацаканова В.А., Ротанова Н.А., Хвороста М.В., Ishikawa K., Asada T., Ortega D. та інших вчених. Аналіз цих досліджень дозволив встановити, що в сучасних умовах розвитку інноваційного залізничного транспорту існує тенденція активного впровадження АТД з частотно-регульованим керуванням як на рухомому складі метрополітену, так і на іншому типі електрорухомого складу.

За умов активного впровадження АТД на рухомому складі метрополітену, в цій роботі пропонується розглянути технічні характеристики існуючого інноваційного рухомого складу з АТД та більш детально зосередити увагу на особливостях здійснення вибору параметрів АТД на етапі його проектування. Це питання є досить актуальним, оскільки завдяки правильному вибору параметрів електроприводу з частотно-регульованим керуванням буде забезпечуватись ефективна експлуатація рухомого складу метрополітену завдяки підвищенню його енергоефективності та мінімізації витрат перевізного процесу.

Мета – проаналізувати технічні характеристики сучасного інноваційного рухомого складу з АТД та частотно-регульованим керуванням; розробити процедуру раціонального вибору параметрів АТД на етапі проектування рухомого складу.

Матеріал та результати досліджень. Аналіз сучасного інноваційного рухомого складу метрополітену з АТД, який виготовляється на підприємствах країн СНД, дозволив встановити основні моделі вагонів з яких формується цей рухомий склад. Аналіз виконано за результатами розгляду технічної документації на моделі вагонів, науково-технічних статей та відкритих джерел [16, 17, 20–23]. Результати проведення цього аналізу та основні технічні характеристики рухомого складу метрополітену з АТД, наведено в табл. 1. Зовнішній вигляд зазначених поїздів метрополітені з АТД зображено на рис. 1-5.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики рухомого складу метрополітену з асинхронним приводом

Назва показників	П'ятивагонний поїзд виробництва ПАТ «КВБЗ»	Модернізований поїзд за проектом Фонду Зелених інвестицій	Чотиривагонний поїзд «Русич»	Шестивагонний рухомий склад «Нева»	П'ятивагонний поїзд «Stadler»
1	2	3	4	5	6
Конструктивні показники рухомого складу					
Моделі вагонів, з яких сформовано рухомий склад	81-7036 81-7037	81-7080 81-7081 81-7081-01	81-740 81-741	81-556 81-557 81-558	M110, M111
Схема формування зчепу	Гм+Пм+Пм+ +Пм+Гм	Гн+Пм+Пм+ +Пм+Гн	Двосекційний	Гм+Пм+Пн+ +Пн+Пм+Мг	Гм+2Пм+Гм

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Продовження таблиці 1

Підприємство-виробник	ПАТ «КВБЗ»	ПАТ «КВБЗ»	ВАТ «Метровагонмаш»	ЗАТ «Вагонмаш» спільно з «Skoda Transportation s.r.o.»	ЗАТ «Штадлер Мінськ»
Середня маса тари вагона, т	32,1	29,2	48,2	26,8	36,5
Маса тари рухомого складу, т	160,7	146,1	192,8	160,8	182,5
Маса рухомого складу при максимальному завантаженні, т	278,2	262,0	344,6	273,0	213,8
Максимальний струм споживання вагона, А	1475	1620	1000	1350	–
Відсоток моторних вагонів	100	60	67	67	100
Місткість рухомого складу, пасажирів	1658	1651	1428	1594	–
Маса тари на одного пасажера, кг	96,9	88,5	135	101	–
Конструкційна швидкість, км/год	90	90	90	90	90
Час розгону поїзда до швидкості, с: 30 км/год 60 км/год 80 км/год	6,5 13,7 21,2	7,1 18,1 32,9	11,0 24,0 39,0	8,0 18,0 29,0	– – –
Прискорення до швидкості 33 км/год, м/с ²	1,36	1,22	0,92	1,35	1,2
Сповільнення зі швидкості 90 км/год, м/с ²	1,19	1,1	1,1	1,4	1,3
Показники АТД					
Тип АТД	STDa280-4B	MB-5149-A	4-EFA18-32B	MLU3839K/4	–
Фірма виробник АТД, країна	EMIT S.A., Польща	Mitsubishi Electric Co, Японія	Alstom, Франція	Skoda Transportation s.r.o., Чехія	Starler Rail Group, Швейцарія
Номінальна потужність АТД, кВт	180	150	160	167	120
Маса АТД, кг	590	513	730	577	–
Питома потужність споживання на одиницю маси в номінальному режимі роботи АТД, кВт/т	305	294	219	289	–
Показники тягового інвертору					
Тип тягового інвертору, фірма-виробник	FT 350-750, MEDCOM, Польща	MAP-154-75V-256 Mitsubishi Electric Co, Японія	–	8МКМ-1,2	Starler Rail Group, Швейцарія
Маса тягового інвертора, кг	1300	780	–	2100	–
Експлуатаційні показники рухомого складу					
Питомі витрати електроенергії на тягу, Вт·год/т·км	36,8*)	31,0*)	41,0**)	58,0***)	49,4****)

Рік початку виробництва	2012	2013	2002	2011	2019
Рік введення в експлуатацію	2015	2015	2003	2013	2020
Країна, в якій експлуатується рухомий склад	Україна	Україна	Росія, Болгарія	Росія	Білорусь
Термін служби, років	31	20	–	–	50

Примітка. Позначка «—» означає про відсутність значення показника у відкритих джерелах інформації.

*)Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 42 км/год під час максимального завантаження 10 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення без урахування часу зупинки на станції).

**)Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 42 км/год під час завантаження 6,6 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення з урахуванням часу зупинки на станції 25 с).

**)Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 48 км/год під час максимального завантаження 10 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення з урахуванням часу зупинки на станції 25 с).

**)Показник отримано за умов руху на прямолінійному перегоні довжиною 1700 м зі швидкістю сполучення 48 км/год під час максимального завантаження 10 пас/м² без урахування рекуперованої енергії до контактної мережі (швидкість сполучення без урахування часу зупинки на станції).



Рис. 1. Загальний вигляд поїзда, що складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037



Рис. 2. Загальний вигляд поїздів, що складаються з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01



Рис. 3. Загальний вигляд поїзда «Русич», що складається з вагонів моделей 81-740, 81-741



Рис. 4. Загальний вигляд поїзда «Нева», що складається з вагонів моделей 81-556, 81-557, 81-558



Рис. 5. Загальний вигляд поїзда «Stadler», що складається з вагонів моделей M110, M111

Аналіз технічних характеристик наведеного рухомого складу метрополітену з АТД дозволив встановити, що середня маса тари вагонів знаходиться в межах від 26,8 т до 46,8 т; максимальний струм споживання вагона – від 1000 А до 1620 А; маса тари на одного пасажера – від 88,5 кг до 135,0 кг; пускове прискорення – від $0,92 \text{ м/с}^2$ до $1,36 \text{ м/с}^2$; сповільнення під час гальмування – від $1,1 \text{ м/с}^2$ до $1,4 \text{ м/с}^2$. За результатами аналізу технічних характеристик АТД, встановлено, що їх номінальна потужність знаходиться в межах від 120 кВт до 180 кВт; маса АТД – від 513 кг до 730 кг; питома потужність споживання на одиницю маси в номінальному режимі роботи АТД – від 219 кВт/т до 305 кВт/т.

Режими навантажень АТД для рухомого складу метрополітену визначаються умовами їх експлуатації. Слід зазначити, що для рухомого складу метрополітену притаманні специфічні умови експлуатації (обмеження потужності, часті прискорення і гальмування, незначна відстань між станціями, часто змінюваний профіль колії тощо), які обов'язково необхідно враховувати під час вибору параметрів АТД. До рухомого складу метрополітену застосовуються специфічні вимоги за потужністю. В тяговому режимі пускова потужність P_n , кВт зазвичай обмежена пропускною здатністю пристроїв енергозабезпечення (максимальним струмом споживання на один вагон). Це обумовлює відношення швидкостей $V_{max}/V_{ном}=2,5-3,5$. В режимі електричного гальмування відсутні жорсткі обмеження за пристроями енергозабезпечення, оскільки рекуперована електроенергія використовується іншими споживачами або розсіюється у вигляді теплової енергії. Крім того, бажано забезпечити інтенсивне гальмування на високих швидкостях з тим, щоб гранично зменшити час руху на перегоні (потужність АТД в гальмівному режимі має перевищувати пускову потужність тягового режиму). При цьому швидкість початку інтенсивного гальмування зазвичай перевищує швидкість виходу на пускову потужність у тяговому режимі, оскільки граничні тягові та гальмівні зусилля мають бути приблизно однаковими. За швидкості V_{max} іноді може знадобитись зниження потужності в тяговому та гальмівному режимах за умовою статичної стійкості АТД. Таким чином, під час проектування тяги рухомого складу метрополітену перелічені особливості мають бути враховані.

Наведені на рис. 6 криві дають уявлення про навантаження АТД рухомого складу метрополітену в штатному режимі експлуатації.

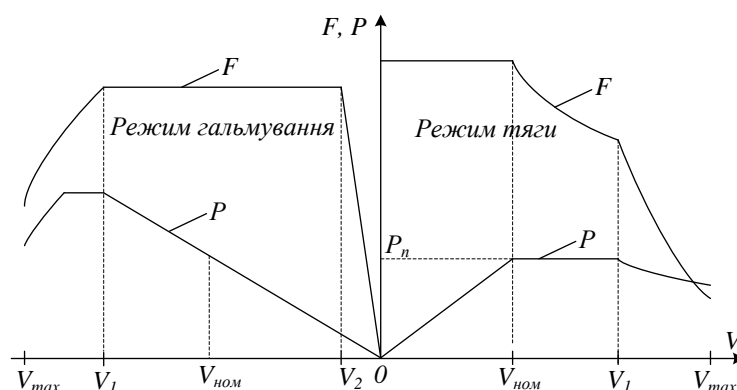


Рис. 6. Характерні криві потужності та сили тяги для рухомого складу метрополітену

На рис. 6 прийнято такі позначення: P – потужність; F – сила тяги; $V_{ном}$ – номінальна швидкість руху; $V_{ном}$ – максимальна швидкість руху; V_1 – швидкість руху, за якої відбувається зміна характеру кривих потужності та сили тяги (гальмування); V_2 – швидкість руху, за якої відбувається заміна електричного гальмування пневматичним.

Крім вищенаведених обмежень, мають бути враховані нормативні вимоги за умовами темпу розгону та гальмування рухомого складу з метою забезпечення високої пропускної здатності на перегонах та комфортності перебування пасажирів у салоні. При цьому під час проектування та здійснення вибору АТД враховуються маса рухомого складу при різному завантаженні та накладаються певні обмеження на реалізацію максимальної сили тяги за зчепленням та максимальним пусковим моментом тягового двигуна.

З урахуванням вищенаведеного, на рис. 7 представлено в загальному вигляді існуючий типовий алгоритм вибору асинхронного тягового електроприводу для поїзда метрополітену.

Однак під час застосування типового підходу із множини можливих рішень можливе здійснення нераціонального вибору АТД. Як правило, під час застосування типового підходу для виробника рухомого складу головним критерієм є мінімальна ціна АТД за умов забезпечення встановлених обмежень. Далі розглянемо основні фактори, які призводять до нераціонального вибору АТД та можливі наслідки такого вибору під час застосування типового підходу.

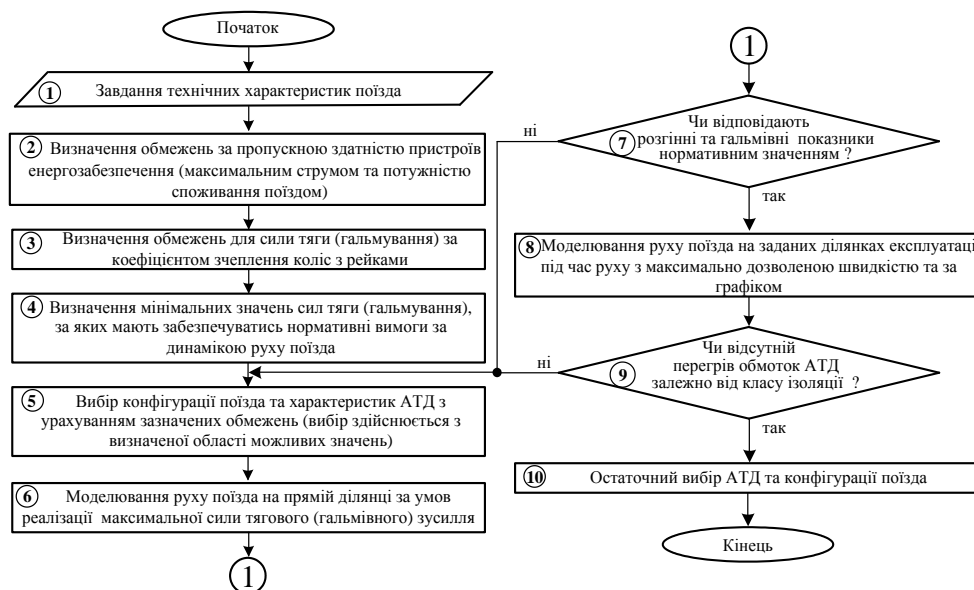


Рис. 7. Типовий алгоритм вибору АТД для поїзда метрополітену

Вибір АТД зі значною потужністю та пусковим моментом. Типовий алгоритм виключає можливість вибору АТД з недостатньою потужністю та направлений на недопущення цього факту. Як правило, відбувається вибір АТД зі значним запасом за потужністю та силою тяги (гальмування). На практиці вибір АТД зі значним запасом досить розповсюджене явище. Основними негативними наслідками такого вибору є: завищена маса рухомого складу; нераціональне використання ресурсу тягового двигуна; низька ефективність його роботи внаслідок зниження ККД, оскільки він не працює в номінальному режимі, підвищена кількість споживання енергії.

Вибір АТД з характеристиками коефіцієнта корисної дії та $\cos\phi$ низької ефективності. Цей випадок зазвичай притаманний, коли обирається АТД минулого покоління. При проектуванні інноваційного рухомого складу потрібно обирати АТД останнього покоління, який виготовляється за сучасними технологіями та має інноваційні рішення, внаслідок чого покращуються його техніко-економічні характеристики у порівнянні з попередніми поколіннями. За умов реалізації однакової механічної енергії на валу АТД останнього та попередніх поколінь, у останніх спостерігається більші масогабаритні показники, підвищена електрична потужність та кількість спожитої електроенергії з мережі. Результатом вибору АТД з характеристиками низької

ефективності є завищення маси рухомого складу, значні втрати в тяговому двигуні, внаслідок чого підвищується кількість споживання електроенергії.

Характер зміни характеристик коефіцієнта корисної дії та $\cos\phi$ залежно від швидкості. Характер зміни цих характеристик може здійснювати значний вплив на кількість спожитої електроенергії з мережі. За однакової механічної потужності на валу двигунів та рівних значеннях коефіцієнтів корисної дії і $\cos\phi$ в номінальному режимі роботи АТД перевага має надаватись тим характеристикам, які виходять на високі значення ефективності і $\cos\phi$ на якомога менших швидкостях руху і зберігають підвищені значення до максимальної швидкості руху поїзда метрополітену. Основним недоліком вибору АТД з незадовільним характером зміни характеристик ККД і $\cos\phi$ є підвищення кількості споживання електроенергії з мережі та, як наслідок, збільшення експлуатаційних витрат.

Реалії сьогодення такі, що під час вибору АТД потрібно враховувати експлуатаційні витрати на поїзд протягом його життєвого циклу. Тому в цій роботі пропонується інший алгоритм вибору АТД, який дозволить враховувати перелічені фактори та виключить можливість вибору неефективного асинхронного тягового електроприводу, що дозволить на етапі проектування рухомого складу метрополітену покращити характеристики поїзда.

Вибір раціональних параметрів АТД запропоновано за процедурою, в основі якої покладено вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію.

Узагальнений математичний опис цільової функції запропонованого критерію з визначення раціонального АТД можна представити у наступному вигляді:

$$F(\bar{X}) \rightarrow \text{extremum}, \bar{X} \in D_1 \dots D_k, \quad (1)$$

де $F(\bar{X})$ – головний критерій раціональності; D – область можливих рішень, яка визначається межами відповідних значень (параметричні обмеження); k – кількість прийнятих обмежень для пошуку раціонального рішення.

Як головний критерій обрано мінімальне значення показника питомих витрат електроенергії на тягу, на інші критерії встановлено обмеження – максимальні значення струму та потужності споживання поїзда, реалізація максимального коефіцієнта зчеплення коліс з рейками, забезпечення необхідної динаміки руху поїзда. З урахуванням обраного критерію формулювання задачі раціоналізації: знайти такі параметри АТД, за яких забезпечаться нормативні вимоги за динамікою розгону поїзда та мінімальні питомі витрати електроенергії в процесі експлуатації:

$$a_{\text{пит.тягу}} = F(P, I, F_{\text{тягу}}, F_{\text{гал}}, k_{\psi}, b, I_{\text{эф}}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Питомі витрати електроенергії $a_{\text{пит.тягу}}$, Вт·год/т·км, на тягу поїзда метрополітену визначають за формулою [24, 25]:

$$a_{\text{пит.тягу}} = \frac{\sum \bar{U} \cdot \bar{I} \cdot \Delta t}{m \cdot L \cdot 3600}, \quad (3)$$

де \bar{U} – значення напруги на струмоприймачі, В; \bar{I} – значення струму споживання поїзда за час Δt , А; Δt – час руху, с; m – маса поїзда метрополітену, т; L – довжина перегону, км.

Причому для цільової функції встановлені граничні значення параметрів: $P \in [0 \dots P_{\max}]$; $I \in [0 \dots I_{\max}]$; $F_{\min} \leq F_{\text{тяги}} \leq F_{\psi \max}$; $F_{\min} \leq F_{\text{зал}} \leq F_{\psi \max}$; $\psi \in [0 \dots \psi_{\max}]$, $\psi \rightarrow \psi_{\max}$; $b \in [0 \dots b_{\max}]$; $I_{\text{еф}} \in [0 \dots I_{\text{еф} \max}]$,

де P_{\max} , I_{\max} – максимальні значення потужності та струму споживання поїздом відповідно; F_{\min} – мінімальне необхідне значення сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення); $F_{\text{тяги}}$ ($F_{\text{зал}}$) – сила тяги (гальмування) поїзда; $F_{\psi \max}$ – максимальне значення сили тяги (гальмування) поїзда за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками; ψ_{\max} – максимальне значення коефіцієнта зчеплення коліс з рейками за нормальних умов; b_{\max} – максимальне значення темпу прискорення (сповільнення) під час руху поїзда в режимах тяги (гальмування); $I_{\text{еф} \max}$ – максимальне ефективне значення струму тягового двигуна.

За умов, якщо цільова функція має декілька екстремальних (мінімальних) значень питомих витрат електроенергії на тягу, то обирається АТД з найменшою вартістю.

Алгоритм вибору АТД, в якому запропоновано здійснювати відбір методом головного критерію, яким обрано критерій мінімальних питомих витрат електроенергії на тягу рухомого складу, зображено на рис. 8.

Перший етап (завдання характеристик поїзда). З використанням запропонованого алгоритму далі виконано вибір АТД з частотно-регульованим керуванням для заданих показників рухомого складу метрополітену (табл. 2).

Другий етап (обмеження за енергозабезпеченням). Прийнято, що за пропускну здатністю системи енергозабезпечення метрополітену поїзд має обмеження за струмом споживання 9000 А та за потужністю 7000 кВт.

Третій етап (обмеження сили тяги (гальмування) за зчепленням коліс з рейками. Обмеження для сили тяги (гальмування) за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками визначено за формулою:

$$F_{\psi \max} = G_{\text{зч}} \cdot \psi \cdot N \quad (4)$$

$G_{\text{зч}}$ – сила тяжіння (зчіпна вага), яка припадає на моторний вагон поїзда, кН;

ψ – розрахункове значення коефіцієнта зчеплення за нормальних умов;

N – кількість моторних вагонів в поїзді, шт.

Примітка. Розрахункове значення коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою для поїзда метрополітену з асинхронним тяговим приводом за нормальних умов обирається для режиму тяги на рівні 0,22; для режиму гальмування – 0,2 [24, 25].

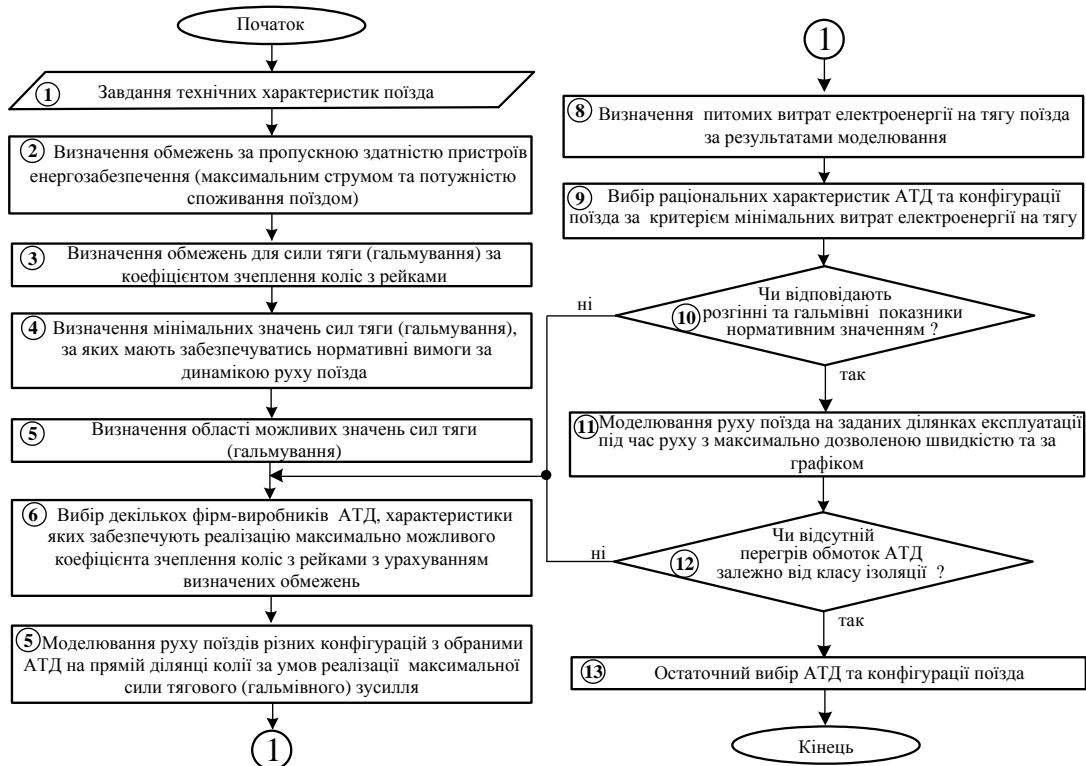


Рис. 8. Алгоритм вибору АТД для поїзда метрополітену методом прийнятого головного критерію

Таблиця 2. Технічні характеристики поїзда метрополітену

№ п/п	Параметр	Значення
1	Маса поїзда метрополітену (m, т)	
	– в порожньому стані;	155,3
	– за номінального завантаження;	246,9
	– за максимального завантаження	262
2	Зчїпна вага моторного вагона ($G_{зч}$, кН)	
	– в порожньому стані;	312,0
	– за номінального завантаження;	494,4
	– за максимального завантаження	543,5
3	Кількість вагонів (Q, шт)	5
4	Конструкційна швидкість (V_k , км/год)	90
5	Максимальна експлуатаційна швидкість (V, км/год)	80
6	Діаметр колеса (D_k , м)	0,825
7	Напруга на струмоприймачі вагона ($U_{ст}$, В)	
	– в режимі тяги;	825
	– в режимі вибігу;	875
	– в режимі гальмування;	908
8	Коефіцієнт інерції обертових мас ($1+\gamma$)	
	– в порожньому стані;	1,1
	– за номінального завантаження;	1,08
	– за максимального завантаження;	1,06
9	Передаточне число редуктора (μ)	6,95
10	Коефіцієнт корисної дії редуктора ($\eta_{ред}$, %)	98
11	Коефіцієнт корисної дії інвертора ($\eta_{інв}$, %)	96
12	Маса АТД, не більше ($m_{аб}$, кг)	700

Результати розрахунків максимально можливої сили тяги (гальмування) за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками для різних модифікацій поїзда, виконаних за формулою (4), наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Максимальне значення сили тяги (гальмування) поїзда, кН			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	343	544	598
4М+1П	275	435	478
3М+2П	206	326	359
Режим гальмування			
5М	312	494	544
4М+1П	250	396	435
3М+2П	187	297	326

За отриманими даними (табл. 3) встановлено, що максимальна сила тяги за зчепленням в розрахунку на один АТД повинна становити: для порожнього стану – 17,2 кН; номінального завантаження – 27,2 кН; максимального завантаження – 29,9 кН; сила гальмування для порожнього стану – 15,6 кН; номінального завантаження – 24,7 кН; максимального завантаження – 27,2 кН.

Четвертий етап (визначення мінімальних значень сил тяги (гальмування) для забезпечення необхідної динаміки руху). Діючим нормативним документом [26] встановлено вимоги до динаміки розгону (гальмування) поїзда метрополітену. Згідно цього документу під час розгону поїзда від 0 до 33 км/год повинно забезпечуватись середнє прискорення не менше ніж 1,2 м/с², а також при гальмуванні поїзда зі швидкості 90 км/год до 0 – середнє сповільнення не менше ніж 1,15 м/с² за умов його номінального завантаження. З урахуванням зазначеного, потрібно визначити мінімально допустиму силу тяги (гальмування), за яких мають відповідати значення прискорення та сповільнення нормативним вимогам. Розрахунок необхідної мінімальної сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення), виконується за формулою [24, 25]:

$$F_{\min} = m \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W, \quad (5)$$

де m – маса поїзда, т;

$(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції оберткових мас поїзда;

a – нормоване значення прискорення (сповільнення), м/с²;

W – основний опір руху поїзда, кН.

Основний опір руху поїзда розраховано за формулою модифікованого рівняння Девіса:

$$W = 6,4 \cdot m + 130 \cdot n + 0,14 \cdot m \cdot V + (0,046 + 0,0065(Q - 1)) \cdot A \cdot V^2, \quad (6)$$

де n – загальна кількість осей на поїзді, шт;

V – швидкість руху поїзда, км/год;

A – площа передньої поверхні, м² (прийнято, що вона дорівнює 10 м²).

Примітка. Прийнято, що основний опір руху в режимі гальмування поїзда дорівнює нулю.

Результати розрахунку мінімально необхідної сили тяги (гальмування) для забезпечення необхідної динаміки руху поїзда, представлено в табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Мінімально потрібне значення сили тяги (гальмування) поїзда, кН			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	210	332	352
4М+1П	206	326	346
3М+2П	203	320	340
Режим гальмування			
5М	196	312	331
4М+1П	193	307	325
3М+2П	189	301	319

За отриманими даними (табл. 4) встановлено, що мінімально необхідна сила для забезпечення вимог щодо динаміки руху в розрахунку на один АТД повинна становити залежно від конфігурації поїзда:

- а) для режиму тяги:
 - в порожньому стані – 10,5...16,9 кН;
 - за номінального завантаження – 16,6...26,7 кН;
 - за максимального завантаження – 17,6...28,3 кН;
- б) для режиму гальмування:
 - в порожньому стані – 9,8...15,8 кН;
 - за номінального завантаження – 15,6...25,1 кН;
 - за максимального завантаження – 16,6...26,6 кН.

П'ятий етап (визначення області можливих значень сил тяги (гальмування) для вибору АТД). Область можливих значень сил тяги (гальмування), яку має забезпечувати АТД, знаходиться між максимально можливим значенням сили за зчепленням та мінімально необхідним значенням за умов забезпечення вимог щодо динаміки руху. Вибір АТД необхідно виконувати з урахування можливості реалізації максимально можливого розрахункового коефіцієнта зчеплення коліс з рейками та обмежень за темпом прискорення (сповільнення). За темпом прискорення в режимі тяги та сповільнення в режимі гальмування необхідно, щоб виконувалась умова $b \leq 0,6 \text{ м/с}^3$ [26]. Як показує практика, для виконання цієї умови потрібно, щоб максимальне значення прискорення (сповільнення) не перевищувало $1,5 \text{ м/с}^2$. Таким чином, потрібно встановити граничне значення сили тяги (сповільнення) додатково за цим показником.

Середнє прискорення (сповільнення) для різних конфігурацій поїзда розраховується за формулою [24, 25]:

$$a = \frac{F_{\max} - W}{m(1 + \gamma)}. \quad (7)$$

Результати розрахунків значень прискорень (сповільнень) для різних модифікацій поїзда, виконаних за формулою (7), наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Результати розрахунків прискорень (сповільнень)

Значення прискорення (сповільнення) поїзда, м/с ²			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	1,98	1,98	2,05
4М+1П	1,61	1,61	1,67
3М+2П	1,22	1,22	1,27
Режим гальмування			
5М	1,83	1,82	1,89
4М+1П	1,49	1,48	1,54
3М+2П	1,14	1,13	1,17

Уточнені максимальні значення сили тяги (гальмування) з урахуванням додаткової перевірки за темпом прискорення (сповільнення), представлено в табл. 6.

Таблиця 6. Результати розрахунків сили тяги (гальмування)

Максимальне значення сили тяги (гальмування) поїзда, кН			
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження
Режим тяги			
5М	261	413	439
4М+1П	257	406	431
3М+2П	206	326	359
Режим гальмування			
5М	256	407	432
4М+1П	250	396	424
3М+2П	187	297	326

Таким чином, за результатами аналізу результатів розрахунків встановлено, що для реалізації прискорення 1,5 м/с² за конфігурації поїзда 5М обраний АТД має забезпечувати силу тяги на ободі колеса рівну 21,2 кН; для 4М+1П – 26,4 кН; для 3М+2П – 29,9 кН.

Шостий етап (вибір АТД з раціональними характеристиками). В даному випадку для аналізу та подальшого вибору АТД пропонується розглянути характеристики від трьох різних фірм-виробників (кількість АТД для розгляду та аналізу їх характеристик алгоритмом не обмежується). Технічні характеристики обраних для аналізу АТД, представлено в табл. 7–9. Залежності загального коефіцієнта корисної дії обраних тягових двигунів залежно від їх завантаження наведено на рис. 9, 10. Слід зазначити, що залежності коефіцієнта корисної дії АТД від другого та третього виробників ідентичні.

Таблиця 7. Технічні характеристики АТД від першого виробника

№ п/п	Параметр	Значення
1	2	3
1	Номінальна потужність, (P _н , кВт)	180
2	Номінальна напруга живлення, (U _н , В)	500±5%
3	Номінальна частота (f _н , Гц)	63±2%
4	Номінальний струм (I _н , А)	264
5	Номінальна частота обертання (n _н , об/хв)	1854
6	Максимальна частота обертання (n _{тах} , об/хв)	4200
7	Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,84
8	Коефіцієнт корисної дії (η, %)	94
9	Номінальний момент (M _н , Н·м)	927
10	Максимальний пусковий крутний момент в режимі тяги, (M _п , Н·м)	1510

Закінчення таблиці 7

11	Максимальний крутний момент в режимі гальмування, (Мг, Н·м)	1380
12	Клас ізоляції	Н
13	Робоча температура, °С	-40...+50
14	Маса, кг	590

Таблиця 8. Технічні характеристики АТД від другого виробника

№ п/п	Параметр	Значення
1	Номінальна потужність, (Рн, кВт)	150
2	Номінальна напруга живлення, (Un, В)	610
3	Номінальна частота (fn, Гц)	50
4	Номінальний струм (In, А)	178
5	Номінальна частота обертання (пн, об/хв)	1480
6	Максимальна частота обертання (пmax, об/хв)	4200
7	Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,92
8	Коефіцієнт корисної дії (η, %)	94
9	Номінальний момент (Мн, Н·м)	968
10	Максимальний пусковий крутний момент в режимі тяги, (Мп, Н·м)	1940
11	Максимальний крутний момент в режимі гальмування, (Мг, Н·м)	1570
12	Клас ізоляції	Н
13	Робоча температура, °С	-35...+40
14	Маса, кг	650

Таблиця 9. Технічні характеристики АТД від третього виробника

№ п/п	Параметр	Значення
1	Номінальна потужність, (Рн, кВт)	150
2	Номінальна напруга живлення, (Un, В)	610
3	Номінальна частота (fn, Гц)	65
4	Номінальний струм (In, А)	185
5	Номінальна частота обертання (пн, об/хв)	1900
6	Максимальна частота обертання (пmax, об/хв)	4200
7	Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,9
8	Коефіцієнт корисної дії (η, %)	92
9	Номінальний момент (Мн, Н·м)	930
10	Максимальний пусковий крутний момент в режимі тяги, (Мп, Н·м)	1633
11	Максимальний крутний момент в режимі гальмування, (Мг, Н·м)	1520
12	Клас ізоляції	Н
13	Робоча температура, °С	-35...+40
14	Маса, кг	560

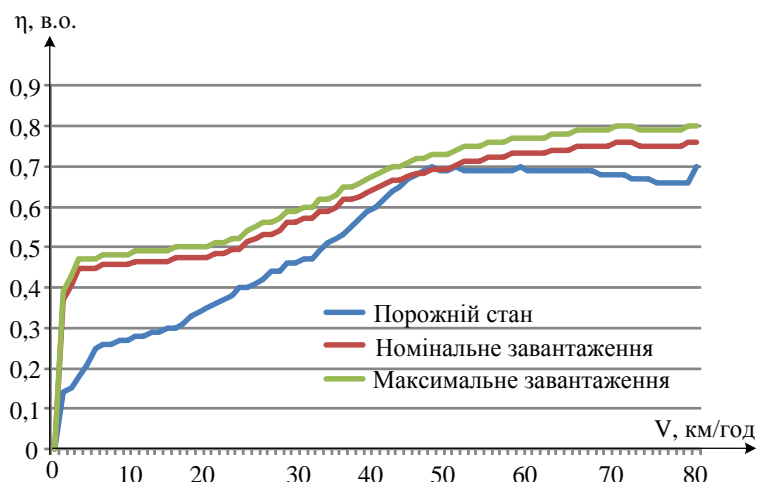


Рис. 9. Залежності коефіцієнта корисної дії АТД від першого виробника

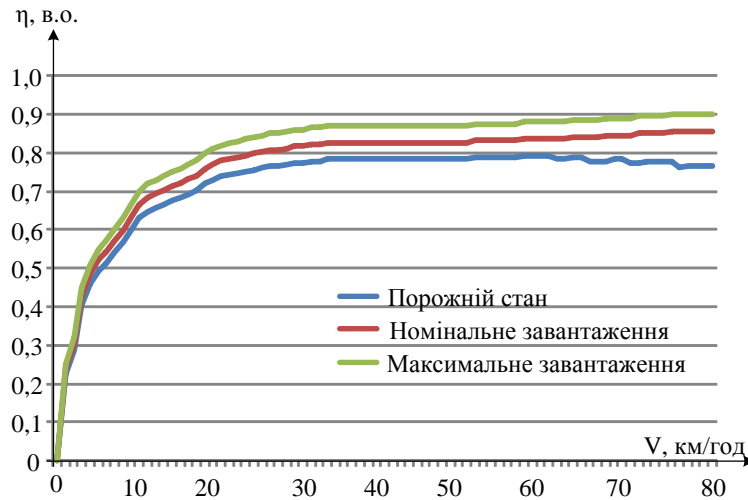


Рис. 10. Залежності коефіцієнта корисної дії АТД від другого та третього виробників

Після вибору характеристик АТД виконано перевірку їх можливості реалізовувати максимально розраховану силу тяги на ободі колеса. Для цього визначається пускова сила тяги двигуна за формулою:

$$F_{n \max} = \frac{2 \cdot M_n \cdot \mu \cdot \eta_{ред}}{D}, \quad (8)$$

За результатами розрахунків визначено, що за своїми характеристиками АТД від першого виробника може реалізувати максимальне значення пускового моменту, яке дорівнює 24,9 кН; від другого виробника – 32,0 кН; від третього виробника – 27,0 кН. В подальшому при виконанні моделювання та розрахунків цей факт потрібно враховувати.

За результатами уточнених розрахунків встановлено, що для конфігурації поїзда 3М+2П за умов застосування АТД від першого виробника не виконуються вимоги за динамікою розгону і гальмування, тому цей варіант в подальшому виключається з досліджень. Для конфігурації поїзда 3М+2П за умов застосування АТД від другого або третього виробників з метою виконання вимог за динамікою гальмування потрібно впроваджувати комбіноване гальмування. В подальших дослідженнях, зокрема під час моделювання руху поїзда, в зазначеній конфігурації це враховано.

Сьомий етап (моделювання руху поїздів різних модифікацій з обраними АТД). Моделювання руху поїзда на прямій ділянці колії виконувалось за допомогою спеціалізованого атестованого програмного забезпечення за умов реалізації розрахункових максимальних тягових (гальмівних) зусиль для двох випадків:

- розгін до конструкційної швидкості та гальмування до повної зупинки поїзда на прямолінійному перегоні без ухилів;
- розгін, вибіг та гальмування під час руху на прямолінійному перегоні загальної довжини 1700 м без ухилів за умов реалізації середньої швидкості сполучення на перегоні 42 км/год.

В програмному забезпеченні, за допомогою якого здійснювалось моделювання, прийнято наступні припущення: поїзд розглядається як матеріальна точка з центром

тяжіння по середині; напруга контактної мережі для заданих режимів тяги, вибігу, рекуперативного гальмування є величиною незмінною. При цьому математична модель дозволяє враховувати конструктивні та технічні особливості поїзда, зміну ККД тягового двигуна залежно від швидкості руху, а також досліджувати енергетичні процеси в режимі рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену.

За результатами моделювання визначено динамічні та енергетичні характеристики руху поїзда.

Восьмий етап (визначення питомих витрат електроенергії на тягу за результатами моделювання). Результати обробки змодельованих режимів руху поїздів різних конфігурацій, за яких визначено питомі витрати електроенергії на тягу, подано в табл. 10.

Таблиця 10. Результати розрахунків питомих витрат

Значення питомих витрат електроенергії на тягу поїзда, м/с ²				
Конфігурація поїзда	Порожній стан	Номінальне завантаження	Максимальне завантаження	Економічний ефект, %
АТД від першого виробника				
5М	43,5	33,8	32,1	–
4М+1П	43,9	32,7	31,6	–
3М+2П	–	–	–	–
АТД від другого виробника				
5М	28,6	25,0	23,8	34,3
4М+1П	29,1	24,6	23,4	33,7
3М+2П	28,7	24,2	23,0	34,6
АТД від третього виробника				
5М	28,6	25,0	23,8	34,3
4М+1П	29,1	24,6	23,4	33,7
3М+2П	28,7	25,2	23,9	34,6

Дев'ятий етап (визначення раціональних характеристик АТД та конфігурації поїзда). За результатами аналізу отриманих значень питомих витрат електроенергії на тягу встановлено, що найбільш раціональним є конфігурація поїзда 3М+2П за умов використання АТД від другого виробника.

Десятий етап (перевірка відповідності встановленим нормативним показникам динаміки руху). Згідно технічних вимог рухомий склад метрополітену має забезпечувати в номінальному режимі завантаження наступне:

- розгін до швидкості 30 км/год: не більше 12 с;
- розгін до швидкості 60 км/год: не більше 26 с;
- розгін до швидкості 80 км/год: не більше 35 с.

За результатами аналізу отриманих значень часу розгону поїзда до зазначених швидкостей в процесі моделювання встановлено, що поїзд конфігурації 3М+2П з АТД від другого виробника відповідає встановленим технічним вимогам (забезпечується розгін поїзда до швидкості 30 км/год за 6,8 с; до швидкості 60 км/год – 14,8 с; до швидкості 80 км/год – 23,1 с).

Одинадцятий етап передбачає моделювання руху поїзда на заданих ділянках експлуатації за умов руху з максимально дозволеною швидкістю та в режимі графікового руху під час максимального завантаження з метою перевірки дотримання умов за нагріванням обмоток АТД. Моделювання виконано з урахуванням реального профілю колії. Як дослідну ділянку для розрахунків обрано Святошинсько-Броварську лінію КП "Київський метрополітен", яка має часто змінюваний профіль з численними "шкідливими" підйомами та спусками.

За результатами моделювання визначається ефективне значення струму на тяговому двигуні за формулою (перевірка потужності за методом еквівалентного струму) [24, 25]:

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i}, \quad (9)$$

де T – загальний час руху на дослідній ділянці; I_i – середній струм під час руху в режимах тяги або гальмування; Δt_i – час руху в режимах тяги або гальмування; n – кількість включень контролера машиніста в режим тяги та гальмування.

Після чого, отримане значення порівнюється з номінальним значенням струму АТД. Якщо отримане значення ефективного струму менше за номінальне значення струму АТД, то умова по нагріву АТД виконується і його можна обирати.

Результати розрахунку ефективного значення струму двигуна за результатами моделювання поїзда метрополітену конфігурації 3М+2П з АТД від другого виробника, зображено в табл. 11.

Таблиця 11. Результати розрахунків значень ефективного струму

Конфігурація поїзда	Дослідна ділянка	Загальний час руху (Т, хв)	Значення ефективного струму (I_{ef})
Моделювання зі швидкістю за графіком руху			
3М+2П	Академмістечко – Лісова	38,47	146
	Лісова – Академмістечко	38,4	141
	Академмістечко – Лісова – Академмістечко	76,87	144
Моделювання руху з максимально дозволеною швидкістю			
3М+2П	Академмістечко – Лісова	31,55	178
	Лісова – Академмістечко	31,37	174
	Академмістечко – Лісова – Академмістечко	62,92	176

Дванадцятий етап (перевірка умови за нагрівом обмоток АТД). За результатами аналізу отриманих даних видно, що умова за нагрівом виконується, тому обраний АТД від другого виробника для конфігурації поїзда 3М+2П можна застосовувати.

За результатами моделювання руху поїздів метрополітену для заданих умов встановлено, що тільки за рахунок визначення раціональної конфігурації поїзда та вибору раціональних параметрів АТД можливо досягти економії електроенергії до 34,6 %. При цьому за даними табл. 10 помітно, що основним фактором впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу є параметри обраних АТД. Конфігурація поїзда також здійснює вплив на показник питомих витрат електроенергії на тягу, проте цей вплив незначний (на рівні 1,0-3,4 %). Таким чином, вибір раціональної конфігурації поїзда метрополітену та застосування на ньому АТД з раціональними параметрами дозволить досягти значного економічного ефекту за рахунок зменшення кількості моторних вагонів, підвищення енергоефективності та енергозбереження на рухомому складі, зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт, що в цілому сприятиме зменшенню витрат як під час виготовлення поїзда, так і зменшенню експлуатаційних витрат протягом його життєвого циклу.

Висновки

1. За результатами аналізу встановлено основні характеристики сучасного інноваційного рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим електроприводом вітчизняного та закордонного виробництва.

2. Запропоновано та розроблено процедуру вибору раціонального асинхронного тягового двигуна та конфігурації поїзда, в основі якої покладено вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію. Як головний критерій обрано мінімальне значення показника питомих витрат електроенергії на тягу, на інші критерії встановлено обмеження – максимальні значення струму та потужності споживання поїзда, реалізація максимального коефіцієнта зчеплення коліс з рейками, забезпечення необхідної динаміки руху поїзда.

3. Здійснено вибір раціонального типу АТД за запропонованою процедурою, який дозволив встановити, що для заданих умов раціональною є конфігурація поїзда 3М+2П з використанням АТД від другого виробника.

4. Результати досліджень свідчать, що за рахунок впровадження оптимальної конфігурації поїзда та раціонального вибору АТД можливо зекономити до 34,6 % електроенергії, що витрачається на тягу, та в цілому зменшити експлуатаційні витрати в метрополітені під час перевезення пасажирів.

5. Рівень впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу в значній мірі здійснює залежність коефіцієнта корисної дії обраного АТД порівняно з обраною конфігурацією поїзда.

Подальші дослідження необхідно зосередити на визначенні резервів зменшення експлуатаційних витрат за рахунок впровадження поїзда оптимальної конфігурації з раціональними параметрами АТД, а також проаналізувати фактори впливу на показник питомих витрат електроенергії на тягу та визначити рівень такого впливу кожного з факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Павленко Ю.С., Єжов Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку парку рухомого складу метрополітену в Україні. *Залізничний транспорт України*. 2019. №3/2019. С. 14-20
2. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко : Под ред. Н.А. Ротанова. М.: Транспорт. 1991. 336 с.
3. Калинин В.К. Электровозы и электропоезда. М.: Транспорт. 480 с.
4. Амелин В.М. Электропоезда. Механическая часть, тяговые двигатели и вспомогательные машины. Системы обслуживания и ремонта / В.М. Амелин, Ю.М. Иньков, М.И. Озеров, В.Н. Ротанов, А.А. Рубцов, Е.К. Рыбников, Я.И. Шур / Под общ. ред. В.М. Амелина, Ю.М. Инькова. М.: Изд-во НЦ ЭНАС. 2000. 200 с.
5. Хворост М.В., Шпіка М.І., Бесараб А.І. Тяговий асинхронний електропривод для міського електротранспорту. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 3. С. 7-10.
6. Устенко О.В., Пасько О.В. Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. № 1. С. 65-68.
7. Любарський Б.Г. Раціональні швидкісні режими руху приміського електропоїзда з асинхронними тяговими двигунами. *Вісник НТУ «ХП»*. 2015. № 8 (1127). С. 86-92.
8. Курбасов А.С. Асинхронный привод электровоза: эффективность перевозок, технологичность производства. *Транспорт Российской Федерации*. 2008. № 6 (19). С. 51-53.
9. Hetman H.K., Marikutsa S.L. Selection of rational parameters of the nominal mode electric trains with asynchronous traction drive. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2017. Issue 3 (69). P. 56–65. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104767>
10. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 1. *Транспорт Российской Федерации*. 2018. № 6 (79). С. 40-44.
11. Petrenko O., Liubarskiy V., Pliugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 6. P. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>

12. Ле Суан Хонг. Перспективы внедрения асинхронных тяговых двигателей на тяговом подвижном составе. VII Всероссийская конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». 2014 С. 256-258.
13. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarsky B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Issue 1/9 (97). P. 48–57. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
14. Terasawa K., Ishikawa K., Asada T., Koneko T., Endo M., Yoshida T. Development of lightweight traction systems to reduce energy consumption. 2018. Vol 67. No. 7. P. 38-43.
15. Abouzeid A.F., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. Control strategies for induction motors in railway traction applications. Energies. 2020. 13 (3), 700. P. 1-22. <https://doi.org/10.3390/en13030700>
16. Мнацаканов В.А. К истории отечественного метровагоностроения. Метро и тоннели. 2015. № 3. С. 28-33.
17. Мнацаканов В.А. Инновационный метропоезд «Нева». Тягово-энергетические испытания. Метро и тоннели. 2014. № 1. С. 30-34.
18. Goolak S., Sapronova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Issue 6/5 (108), p. 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>.
19. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. Transport. 2020. 35(6), 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.
20. 556.00.00.000-01 РЭ. Вагоны метрополитена моделей 81-556, 81-557, 81-558. Руководство по эксплуатации. 86 с.
21. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метрополітену моделей 81-7036 та 81-7037, обладнаних асинхронним приводом Том 4. Випробування електрообладнання, випробування на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку, тягово-енергетичні випробування, випробування системи автоматичного регулювання швидкості, систем вентиляції, випробування з визначення параметрів мікроклімату в кабіні керування та рівнів шуму й інфразвуку вагонів метро моделей 81-7036 і 81-7037 / ДП «УкрНДІВ»; керівник Ольгард Леонід Семенович; викон. Донченко А.В., Ільчишин В.В., Распопін В.Р. [та ін.]. Кременчук. 2012. 105 с. ДР 0112U006006. Інв. № 1325.
22. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метро, виготовлених в рамках комплексної модернізації для Комунального підприємства «Київський метрополітен». Випробування електрообладнання, випробування на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку, тягово-енергетичні випробування, випробування системи автоматичного регулювання швидкості, випробування з визначення параметрів мікроклімату в кабіні управління та рівнів шуму й інфразвуку вагонів метро / ДП «УкрНДІВ»; керівник Хозя Павло Олександрович; викон. Донченко А.В., Речкалов С.Д., Шмаков С.В. [та ін.]. Кременчук. 2014. 154 с. ДР 0114U006350. Інв. № 1501.
23. Stadler M110/M111 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Stadler_M110/M111. Назва з екрану.
24. Байрыева Л.С. Теория электрической тяги. Методическое пособие / Л.С. Байрыева, А.В. Прокопович. М.: Издательство МЭИ. 2004. 40 с.
25. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров : Под ред. И.П. Исаева. М.: Транспорт. 1995. 294 с.
26. СОУ МПП 45.060-253:2008 Вагоны метрополитену. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-01-01] Вид. офіц. Київ: Міністерство промислової політики України. 2008. 29 с.

REFERENCES

1. Sulym, A.O., Muzhychuk, S.O., Khozia, P.O., Pavlenko, Yu.S., & Yezhov, Yu.V. (2019). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku parku rukhomoho skladu metropolitenu v Ukraini [Current state and prospects of metro rolling stock development in Ukraine]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 3, 14-20 [in Ukrainian]
2. Rotanov, N.A., Kurbasov, A.S., Byikov, Yu.G., & Litovchenko, V.V. (1991). Elektropodvizhnoy sostav s asinhronnymi tiagovymi dvigateliami [Electric rolling stock with asynchronous traction motors]. N.A. Rotanov (Ed.). М. : Transport, p. 336 [in Russian].
3. Kalinin, V.K. Elektrovozy i elektropoezda [Electric locomotives and electric trains]. М. : Transport [in Russian].
4. Amelin, V.M., Inkov, Yu.M., Ozerov, M.I., Rotanov, V.N., Rubtsov, A.A., Rybnikov, E.K. et al. (2000). Elektropoezda. Mehanicheskaia chast, tiagovyie dvigateli i vspomogatelnye mashyny. Sistemy obsluzhivaniia i remonta [Electric trains. Mechanical part, traction motors and auxiliary machines. Maintenance and repair systems]. V.M. Amelin, Yu.M. Inkov (Ed.), 200 [in Russian].
5. Hvorost M.V., Shpika M.I., Besarab A.I. (2012). Tiagovyie asinhronnyi elektroprivod dlia miskogo elektrotransportu [Traction asynchronous electric drive for urban electric transport]. *Energoberezhenie. Energetika. Enerhoaudit - Energy saving. Energy. Energy audit*, 3, 7-10
6. Ustenko O.V., Pasko O.V. (2013). Tendencii razvitiia tiagovykh dvigatelej podvizhnogo sostava. [Development trends for the development of traction motors of rolling stock]. *Elektrotehnika i elektromekhanika - Electrical engineering and electromechanics*, 1, 65-68 [in Russian].

7. Liubarskyi B.G. (2015). Ratsionalni shvydkisni rezhymy rukhu prymiskogo elektrovozida z asinkhronnymy tiagovymy dvygunamy [Rational speed modes of metro electric train with asynchronous traction motors], *Visnyk NTU «KhPI» - Bulletin of the NTU "KhPI"*, 8 (1127), 86-92 [in Ukrainian]
8. Kurbasov A.S. (2008). Asinkhronnyi privod elektrovoza: effektivnost perevozok, tekhnologichnost proizvodstva [Asynchronous electric locomotive drive: traffic efficiency, manufacturability], *Transport Rossiiskoi Federacii - Transport of the Russian Federation*, (19), 51-53 [in Russian].
9. Hetman H.K., Marikutsa S.L. (2017). Selection of rational parameters of the nominal mode electric trains with asynchronous traction drive. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. Issue 3 (69), 56–65. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2017/104767>
10. Titova T.S., Evstafiev A.M., Izvarin M.YU., Sychugov A.N. (2018). Perspektivy razvitiia tiahovogo podvizhnogo sostava. Chast 1 [Prospects for the development of traction rolling stock.]. *Transport Rossiiskoi Federacii - Transport of the Russian Federation*, 6 (79), 40-44 [in Russian]
11. Petrenko O., Liubarskiy B., Plugin V. (2017). Determination of railway rolling stock optimal movement modes, *Elektrotehnika i elektromekhanika - Electrical engineering and electromechanics*, 6, 27-31. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
12. Le Suan Khong. (2014). Perspektivy vnedreniia asinkhronnykh tiagovykh dvigateliei na tiahovom podvizhnom sostavie. [Prospects for the introduction of asynchronous traction motors on traction rolling stock]. VII Vserossiiskaia konferencia «Nauchnaya iniciativa inostrannykh studentov i aspirantov rossiiskikh vuzov» - VII All-Russian Conference "Scientific Initiative of Foreign Students and Postgraduates of Russian Universities". (pp. 256-258).
13. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarsky B., Veretennikov I., Glebova M. (2019). Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Issue 1/9 (97), p. 48–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>.
14. Terasawa K., Ishikawa K., Asada T., Koneko T., Endo M., Yoshida T. (2018). Development of lightweight traction systems to reduce energy consumption. Vol 67. No. 7. p. 38-43.
15. Abouzeid A.F., Guerrero J.M., Endemaño A., Muniategui I., Ortega D., Larrazabal I., Briz F. (2020). Control strategies for induction motors in railway traction applications. *Energies*. 13 (3), 700. p. 1-22. <https://doi.org/10.3390/en13030700>
16. Mnatsakanov V.A. (2015). K istorii otechestvennogo metrovagonostroeniia [Concerning the history of domestic metro car building]. *Metro i tonneli - Metro and tunnels*, 3, 28-33 [in Russian]
17. Mnatsakanov V.A. (2014). Innovacionnyi metropolezd «Neva». Tiahovo-enerheticheskie ispytaniia [Innovative metro train "Neva". Traction and energy tests]. *Metro i tonneli - Metro and tunnels*, 1, 30-34 [in Russian]
18. Goolak S., Saponova S., Tkachenko V., Riabov I., Batrak Y. (2020). Improvement of the model of power losses in the pulsed current traction motor in an electric locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Issue 6/5 (108), p. 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>.
19. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. (2020). Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 35(6), 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.
20. Rukovodstvo po ekspluatatsii 556.00.00.000-01. Vagony metropolitena modelei 81-556, 81-557, 81-558 [Metro car models 81-556, 81-557, 81-558. Manual], 86 [in Russian].
21. Olhard L.S., Donchenko A.V., Ilchyshyn V.V., Raspopin V.R et.al. (2012). Naukovo-eksperimentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vagoniv metropolitenu modelei 81-7036 ta 81-7037, obladnanykh asinkhronnym pryvodom. Vyprovuvannia elektroobladnannia, vyprovuvannia na elektromagnitnu sumisnist z prystroiamy syhnalizatsii ta zviazku, tiahovo-enerhetychni vyprovuvannia, vyprovuvannia systemy avtomatychnoho rehuliuвання shvydkosti, system ventyliatsii, vyprovuvannia z vyznachennia parametriv mikroklimatu v kabini keruvannia ta rivniv shumu i infrazvuku vagoniv metro modelei 81-7036 i 81-7037 [Scientific and experimental studies of technical characteristics of metro cars of models 81-7036 and 81-7037, equipped with asynchronous drive. Vol. 4. Tests of electrical equipment, tests for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices, traction and energy tests, tests of automatic speed control system, ventilation systems, tests to determine the parameters of the microclimate in the drive cabin and noise and infrasound levels of metro cars models 81-7036 and 81-7037. Olhard L.S. (Eds.). Kremenchuk: DP «UkrNDIV», 105 [in Ukrainian].
22. Khozia P. O., Donchenko A.V., Rechkalov S.D., Shmakov S.V. et al. (2014). Naukovo-eksperimentalni doslidzhennia tekhnichnykh kharakterystyk vagoniv metro, vyhotovlenykh v ramkakh kompleksnoi modernizacii dlia Komunalnogo pidpriemstva «Kiiivskii metropoliten». Vyprovuvannia elektroobladnannia, vyprovuvannia na elektromagnitnu sumisnist z prystroiamy syhnalizacii ta zviazku, tiahovo-enerhetychni vyprovuvannia, vyprovuvannia systemy avtomatychnoho rehuliuвання shvydkosti, vyprovuvannia z vyznachennia parametriv mikroklimatu v kabini upravlinnia ta rivniv shumu i infrazvuku vagoniv metro [Scientific and experimental studies of technical characteristics of metro cars manufactured as part of a comprehensive modernization for the Municipal Enterprise "Kyiv Metro". Tests of electrical equipment, tests for electromagnetic compatibility with signaling and communication devices, traction and energy tests, tests of the automatic speed control system, tests to determine the parameters of the microclimate in the control cabin and noise and infrasound levels of metro cars. Khozia P. O. (Eds.). Kremenchuk: DP "UkrNDIV", 154 [in Ukrainian]
23. Stadler M110/M111. Retrieved from https://ru.wikipedia.org/wiki/Stadler_M110/M111.
24. Bairyeva L.S., Prokopovich A.V. (2004) *Teoriia elektricheskoi tiahii [Theory of electric traction]*. M.: Izdatelstvo MEI, 40.
25. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I. (1995). *Teoriia elektricheskoi tiahii [Theory of electric traction]*. M.: Transport, 294.

26. *Vagoni metropolitenu. Zahalni tekhnichni vimogi. [Metro cars. General technical requirements]* (2008). SOU MPP 45.060-253:2008. Kyiv: Ministerstvo promyslovoi polityky Ukrainy, 29.

Andrii Sulym^{1*}, Oleksandr Ustenko², Oleksandr Melnyk¹, Andrii Lomonos³, Serhii Muzhychuk⁴, Valerii Solovey⁴

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

² Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

³ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva St., Kremenchuk, 39600, Ukraine

⁴ Public Joint Stock Company "Kryukovsky Railway Car Building Works", 139, I. Prikhodko St., Kremenchuk, 39621, Ukraine

A METHODOLOGY TO SELECT ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC DRIVE FOR INNOVATIVE METRO ROLLING STOCK

The paper deals with the justification of the need to use an asynchronous traction electric drive on the metro rolling stock. The advantages of using an asynchronous traction electric drive in comparison with a DC commutator motor drive are formulated. The characteristics of modern innovative metro rolling stock with asynchronous traction electric drive of domestic and foreign production are analyzed. Aspects of the choice of a variable frequency asynchronous traction electric drive for innovative rolling stock are formulated and the existing typical algorithm of such choice is given. The main reasons for the irrational choice of traction asynchronous electric drive for the metro rolling stock are considered and the consequences of such a choice are analyzed. It is proposed to improve the methodology for selecting a variable frequency traction asynchronous electric drive for the metro rolling stock in terms of such an important operational factor as the specific cost of electrical energy for traction. The rational parameters of the variable frequency asynchronous traction electric drive according to the proposed procedure for the specified characteristics of the metro rolling stock are specified. The reserves of energy savings for the given conditions due to the introduction of an asynchronous traction electric drive with rational parameters on the innovative rolling stock are determined. It is established that the efficiency factor of the asynchronous traction motor significantly affects the specific electric energy consumption for the metro rolling stock traction and operating costs.

Keywords: asynchronous traction electric drive, car, metro, rolling stock, specific electricity consumption for traction, variable frequency.

УДК 539.3

Олена Шидула^{1*}

¹ Професор кафедри Комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, вулиця Солом'янська, 7, Київ, 03110, Україна. ORCID: 0000-0002-7385-2816

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

МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ БАГАТОСПРЯМОВАНОГО АРМУВАННЯ З РОЗОРІЄНТОВАНИМИ ВОЛОКНАМИ

Запропоновано модель деформування волокнистих матеріалів багатоспрямованого армування з розорієнтованими волокнами. Розв'язок задачі будується в два етапи. На першому етапі за відомими властивостями волокон і матриці визначаються ефективні термopружні властивості і напружено-деформований стан підсистеми з волокнами, орієнтованими відносно основної системи координат певним чином. В основу покладено стохастичні диференційні рівняння теорії термopружності із застосуванням методу умовних моментів. На другому етапі за допомогою заданої функції розподілу на основі схеми Фойхта будується модель деформування всієї системи за визначеними властивостями підсистем. Отримані криві деформування для простого навантаження і досліджено деформування матеріалів при рівномірному розорієнтуванні волокон. Встановлено, що волокнистий композитний матеріал з розорієнтованими волокнами в макрооб'ємі є ізотропним, а його ефективні термopружні постійні суттєво залежать від об'ємного вмісту волокон.

Ключові слова: *волокнистий матеріал багатоспрямованого армування, рівномірне розорієнтування волокон, напружено-деформований стан, ефективні термopружні властивості, комп'ютерна реалізація.*

Вступ. Композитні матеріали на основі безперервних волокон і зв'язуючої їх матриці за характером орієнтації волокон можна розділити на три групи: односпрямовані, різноспрямовані в одній площині і просторово-орієнтовані. Багатоспрямованість волокон дозволяє забезпечити необхідну жорсткість і міцність композиту в різних напрямках, що вигідно відрізняє ці матеріали від односпрямованих. Тому волокнисті матеріали з волокнами, розорієнтованими в площині, тобто шарувато-волокнисті матеріали, а також більш пріоритетні і менш досліджені просторово розорієнтовані матеріали знаходять широке застосування в багатьох галузях, де потрібні легкі та міцні конструкції, зокрема в будівництві транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Прогнозування властивостей матеріалів, армованих просторово-орієнтованими волокнами, в теоретичному плані є задачею, значно складнішою в порівнянні з односпрямованими волокнистими матеріалами. Застосування методів регуляризації структури [1, 2] в цьому випадку призводить до необхідності розв'язування просторових задач механіки і задоволення граничних умов на суттєво складній границі сполучення компонентів. Тому в більшості розрахунків користуються двома наближеними підходами [3-5]. Один з них заснований

на послідовному застосуванні моделі односпрямованого волокнистого матеріалу. Відповідно до цього підходу на першому етапі визначаються ефективні властивості композиту, утвореного початковою матрицею і волокнами одного напрямку. Цей композит служить матрицею для розрахунку ефективних властивостей на другому етапі, де враховуються волокна наступного напрямку, і т.д.

Другий наближений підхід заснований на застосуванні модифікованої схеми Фойхта або Рейса, згідно з якою просторово-армований матеріал розглядається як сукупність підсистем, кожна з яких є односпрямованим волокнистим композитом. На першому етапі визначаються властивості підсистем по відомим властивостям волокон і матриці, на другому за схемою Фойхта або Рейса – властивості всієї системи по відомим властивостям підсистем. В обох підходах обчислення властивостей односпрямованого волокнистого матеріалу, як правило, проводять на основі схеми Фойхта або Рейса, що вносить додаткові похибки.

В роботах Л.П. Хорошуна і О.М.Шикили [6, 7] побудована модель деформування просторово-армованих матеріалів при характерних видах просторового армування: волокна розташовані паралельно координатним осям, по діагоналях куба, а також уздовж сторін рівностороннього трикутника і по нормалі до нього. Наближене визначення ефективних пружних характеристик просторово-армованих матеріалів проводилося в два етапи. На першому етапі визначалися властивості підсистем, орієнтованих певним чином щодо осей основної системи координат. Розв'язання задачі першого етапу здійснювалося на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичної структури [7-11]. На другому етапі за схемою Фойхта або Рейса визначалися властивості всієї системи по відомим властивостям підсистем.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження деформування просторово-армованих матеріалів з розорієнтованими волокнами. Завданнями дослідження є побудова моделі деформування просторово-армованих матеріалів з розорієнтованими волокнами, визначення напружено-деформованого стану і ефективних термопружних властивостей таких композитних матеріалів, а також дослідження залежності деформування композиту від об'ємного вмісту компонентів.

Розв'язок задачі будується в два етапи. На першому етапі за відомими властивостями волокон і матриці визначаються властивості підсистеми з волокнами, орієнтованими щодо основної системи координат певним чином. В основу покладено стохастичні диференційні рівняння теорії пружності із застосуванням методу умовних моментів [7, 12, 13]. На другому етапі за допомогою заданої функції розподілу визначаються ефективні властивості всієї системи за обчисленими властивостями підсистем. Розв'язок базується на схемі Фойхта.

Матеріали і методи дослідження. Розглянемо просторово армований волокнистий матеріал стохастичною структури, що є системою волокон N напрямків, пов'язаних матрицею. Цей матеріал будемо розглядати як багатокомпонентний, вважаючи, що матриця і волокна кожного напрямку є окремими компонентами. Будемо вважати, що в кожному напрямку є досить велика кількість статистично розташованих волокон, матеріал волокон - трансверсально-ізотропний з віссю симетрії уздовж волокон, матеріал матриці - ізотропний. Волокна k -го напрямку характеризуються напрямними косинусами (рис. 1)

$$\begin{aligned} \gamma_1^{(k)} &= \sin \theta_k \cos \varphi_k; \gamma_2^{(k)} = \sin \theta_k \sin \varphi_k; \gamma_3^{(k)} = \cos \theta_k \\ (0 \leq \theta_k &\leq \pi/2; 0 \leq \varphi_k \leq 2\pi; k = 1, 2, \dots, N). \end{aligned} \quad (1)$$

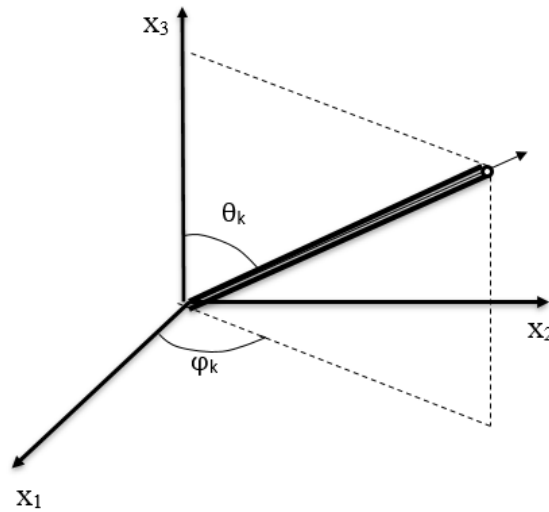


Рис. 1. Напрявні косинуси волокон k -го напрямку

Нехай об'ємні вмісти волокон k -го напрямку і матриці дорівнюють відповідно c_{1k} і c_2 . Загальна концентрація волокон $c_1 = \sum_{k=1}^N c_{1k}$, причому $c_1 + c_2 = 1$. Визначення ефективних постійних матеріалу будемо проводити в два етапи. На першому етапі визначаються ефективні властивості підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом, утвореним волокнами k -го напрямку і частиною матриці з об'ємним вмістом $c_{2k} = \frac{c_2}{c_1} c_{1k}$. На другому етапі визначаємо ефективні властивості всієї системи за обчисленими властивостями підсистем. Розв'язання задачі першого етапу будемо проводити на основі моделі односпрямованого волокнистого матеріалу стохастичною структури, другого - на основі схеми Фойхта.

Визначення ефективних термопружних властивостей підсистеми, що є односпрямованим волокнистим матеріалом. Нехай макрооб'єм волокнистого матеріалу просторового армування знаходиться в умовах однорідних навантаження і нагріву. Позначимо термопружні постійні волокон k -го напрямку $\lambda_{ij}^{(k)}$, $\beta_i^{(k)}$, а матриці λ_2 , μ_2 , β_2 . Будемо виходити з рівнянь рівноваги в мікроточці

$$\sigma_{ij,j}^{(k)} = 0, \quad (2)$$

співвідношень термопружності

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^{(k)} &= (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \varepsilon_{pq}^{(k)} + (\lambda_{12}^{(k)} \varepsilon_{rr}^{(k)} + \lambda_{13}^{(k)} \varepsilon_{33}^{(k)}) \delta_{pq} - \beta_1^{(k)} \theta \delta_{pq}; \\ \sigma_{33}^{(k)} &= \lambda_{13}^{(k)} \varepsilon_{rr}^{(k)} + \lambda_{33}^{(k)} \varepsilon_{33}^{(k)} - \beta_3^{(k)} \theta; \quad \sigma_{p3}^{(k)} = 2\lambda_{44}^{(k)} \varepsilon_{p3}^{(k)} \quad (p, q, r = 1, 2), \end{aligned} \quad (3)$$

і співвідношень Коші

$$\varepsilon_{ij}^{(k)} = u_{(i,j)}^{(k)} = \frac{1}{2} (u_{i,j}^{(k)} + u_{j,i}^{(k)}). \quad (4)$$

Підставивши (3), (4) в (2), приходимо до статистично нелінійних рівнянь рівноваги відносно переміщень $u_i^{(k)}$ в підсистемі

$$\begin{aligned} & [(\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)})u_{m,r}^{0(k)}]_{,r} + [(\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)})u_{r,r}^{0(k)}]_{,m} = \\ & = -2[\lambda_{12}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr} \rangle^{(k)} \delta_{ml} + (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \langle \varepsilon_{ml} \rangle^{(k)} \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{33} \rangle^{(k)} \delta_{ml} - \beta_1^{(k)} \theta \delta_{ml}]_{,l}; \\ & (\lambda_{44}^{(k)} (u_{3,r}^{0(k)})_{,r} = -(2\lambda_{44}^{(k)} \langle \varepsilon_{m3} \rangle^{(k)})_{,m} \quad (m, l, r = 1, 2, p = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (5)$$

Флуктуації переміщень дуже малі в порівнянні з їх середніми значеннями при $x_j \rightarrow \infty$, тому на нескінченності флуктуації переміщень приймаємо рівними нулю.

Усереднюючи співвідношення (3), отримуємо вирази для середніх напружень у вигляді

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{pq} \rangle^{(k)} & = c_1^{(k)} (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \langle \varepsilon_{pq}^1 \rangle^{(k)} + c_1^{(k)} (\lambda_{12}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr}^1 \rangle^{(k)} + \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{33}^1 \rangle^{(k)}) \delta_{pq} + \\ & + c_2^{(k)} \lambda_2 \langle \varepsilon_{ss}^2 \rangle^{(k)} \delta_{pq} + 2c_2^{(k)} \mu_2 \langle \varepsilon_{pq}^2 \rangle^{(k)} - \beta_1^{(k)} \theta \delta_{pq}; \\ \langle \sigma_{33} \rangle^{(k)} & = c_1^{(k)} \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr}^1 \rangle^{(k)} + c_1^{(k)} \lambda_{33}^{(k)} \langle \varepsilon_{33}^1 \rangle^{(k)} + c_2^{(k)} \lambda_2 \langle \varepsilon_{ss}^2 \rangle^{(k)} + 2c_2^{(k)} \mu_2 \langle \varepsilon_{33}^2 \rangle^{(k)} - \beta_3^{(k)} \theta; \\ \langle \sigma_{p3} \rangle^{(k)} & = 2c_1^{(k)} \lambda_{44}^{(k)} \langle \varepsilon_{p3}^1 \rangle^{(k)} + 2c_2^{(k)} \mu_2 \langle \varepsilon_{p3}^2 \rangle^{(k)} \quad (p, q, r = 1, 2, s = 1, 2, 3), \end{aligned} \quad (6)$$

Скориставшись функцією Гріна, рівняння (5) можна привести до інтегральної форми. За допомогою методу умовних моментів [7, 12, 13], усереднюючи ці рівняння за умовною щільністю, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь відносно середніх деформацій компонентів в підсистемі. Визначимо з цієї системи середні деформації компонентів в підсистемі $\langle \varepsilon_{ij}^1 \rangle^{(k)}$ і $\langle \varepsilon_{ij}^2 \rangle^{(k)}$ як функції середніх деформацій композиту $\langle \varepsilon_{ij} \rangle^{(k)}$ і підставимо в вираз (6). В результаті отримаємо залежність макронапружень в підсистемі від макродеформацій в ній і температури

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{pq} \rangle^{(k)} & = (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) \langle \varepsilon_{pq} \rangle^{(k)} + (\lambda_{12}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr} \rangle^{(k)} + \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{33} \rangle^{(k)}) \delta_{pq} - \beta_1^{(k)} \theta \delta_{pq}; \\ \langle \sigma_{33} \rangle^{(k)} & = \lambda_{13}^{(k)} \langle \varepsilon_{rr} \rangle^{(k)} + \lambda_{33}^{(k)} \langle \varepsilon_{33} \rangle^{(k)} - \beta_3^{(k)} \theta; \\ \langle \sigma_{p3} \rangle^{(k)} & = 2\lambda_{44}^{(k)} \langle \varepsilon_{p3} \rangle^{(k)} \quad (p, q, r = 1, 2), \end{aligned} \quad (7)$$

а вирази для ефективних постійних підсистеми мають вигляд [7-11]

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{*(k)} + \lambda_{12}^{*(k)} & = c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k (\lambda_2 + \mu_2) - \frac{c_1^k c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)^2}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\ \lambda_{11}^{*(k)} - \lambda_{12}^{*(k)} & = c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k \mu_{2p} - \frac{c_1^k c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)} - 2\mu_2)^2}{2c_1^k \mu_{2p} + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + \frac{2m^{(k)} n^{(k)}}{n^{(k)} + 2m^{(k)}}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_{13}^{*(k)} &= c_1^k \lambda_{13}^{(k)} + c_2^k \lambda_2 - \frac{c_1^k c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)(\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\
 \lambda_{33}^{*(k)} &= c_1^k \lambda_{33}^{(k)} + c_2^k (\lambda_2 + 2\mu_2) - \frac{2c_1^k c_1^k (\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)^2}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\
 \lambda_{44}^{*(k)} &= c_1^k \lambda_{44}^{(k)} + c_2^k \mu_2 - \frac{c_1^k c_2^k (\lambda_{44}^{(k)} - \mu_2)^2}{c_1^k \mu_2 + c_2^k \lambda_{44}^{(k)} + s^{(k)}}; \\
 \beta_1^{*(k)} &= c_1^k \beta_1^{(k)} + c_2^k \beta_2 - \frac{c_1^k c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)} - 2\lambda_2 - 2\mu_2)(\beta_1^{(k)} - \beta_2)}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \\
 \beta_3^{*(k)} &= c_1^k \beta_3^{(k)} + c_2^k \beta_2 - \frac{2c_1^k c_1^k (\lambda_{13}^{(k)} - \lambda_2)(\beta_1^{(k)} - \beta_2)}{2c_1^k (\lambda_2 + \mu_2) + c_2^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2m^{(k)}}; \tag{8}
 \end{aligned}$$

де

$$2m^{(k)} = c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k \mu_2; \quad 2n^{(k)} = c_1^k (\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}) + 2c_2^k (\lambda_2 + \mu_2); \quad s^{(k)} = c_1^k \lambda_{44}^{(k)} + c_2^k \mu_2, \tag{9}$$

якщо жорсткість матриці більше жорсткості волокон, і

$$2m^{(k)} = \left(\frac{c_1^k}{\lambda_{11}^{(k)} - \lambda_{12}^{(k)}} + \frac{c_2^k}{2\mu_2} \right)^{-1}; \quad 2n^{(k)} = \left(\frac{c_1^k}{\lambda_{11}^{(k)} + \lambda_{12}^{(k)}} + \frac{c_2^k}{2(\lambda_2 + \mu_2)} \right)^{-1}; \quad s^{(k)} = \left(\frac{c_1^k}{\lambda_{44}^{(k)}} + \frac{c_2^k}{\mu_2} \right)^{-1}, \tag{10}$$

якщо жорсткість волокон більше жорсткості матриці.

Якщо властивості волокон всіх напрямків однакові, то

$$\lambda_{ij}^{(k)} = \lambda_{ij}^1; \quad \beta_i^{(k)} = \beta_i^1 \tag{11}$$

і вирази (8) – (10) від індексу k не залежать.

Визначення ефективних термопружних властивостей системи, що є волокнистим матеріалом просторового армування. Ефективні постійні (8) - (10) є компонентами тензорів модулів пружності і термічних напружень в локальній системі координат $x_i^{(k)}$, де вісь $x_3^{(k)}$ паралельна волокнам k -го напрямку. Перейдемо до загальної системи координат згідно перетворенню

$$x_i = \alpha_{ij}^{(k)} x_j^{(k)}; \quad x_i^{(k)} = \alpha_{ji}^k x_j; \tag{12}$$

де

$$\begin{aligned}
 \alpha_{11}^{(k)} &= \cos \theta_k \cos \varphi_k; & \alpha_{12}^{(k)} &= -\sin \varphi_k; & \alpha_{13}^{(k)} &= \sin \theta_k \cos \varphi_k; \\
 \alpha_{21}^{(k)} &= \cos \theta_k \sin \varphi_k; & \alpha_{22}^{(k)} &= \cos \varphi_k; & \alpha_{23}^{(k)} &= \sin \theta_k \sin \varphi_k; \\
 \alpha_{31}^{(k)} &= -\sin \theta_k; & \alpha_{32}^{(k)} &= 0; & \alpha_{33}^{(k)} &= \cos \theta_k.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Тоді тензори модулів пружності $\lambda_{ijmn}^{*(k)}$ і термічних напружень $\beta_{ij}^{*(k)}$ в загальній системі координат виражаються через відповідні тензори $\lambda_{ijmn}^{*(k)'}$, $\beta_{ij}^{*(k)'}$ в локальній системі координат співвідношеннями

$$\lambda_{ijmn}^{*(k)} = \alpha_{ip}^{(k)} \alpha_{jq}^{(k)} \alpha_{mr}^{(k)} \alpha_{ns}^{(k)} \lambda_{pqrs}^{*(k)'}, \quad \beta_{ij}^{*(k)} = \alpha_{ip}^{(k)} \alpha_{jq}^{(k)} \beta_{pq}^{*(k)'}. \tag{14}$$

Ефективні постійні всієї системи відповідно до схеми Фойхт визначаються формулами

$$\lambda_{ijmn}^{**k} = \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_{1k} \lambda_{ijmn}^{*(k)}; \quad \beta_{ij}^{**k} = \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_{1k} \beta_{ij}^{*(k)}. \quad (15)$$

Підставляючи (15) в (14) і переходячи до матричних позначень, отримуємо

$$\begin{aligned} \lambda_{ijmn}^{**} &= \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_{1k} \{ [\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \\ &+ \frac{1}{2} (\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)})] \lambda_{11}^{*(k)} + \\ &+ [\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} \alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)} - \\ &- \frac{1}{2} (\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)} + \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)})] \lambda_{12}^{*(k)} + \\ &+ \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} \lambda_{33}^{*(k)} + [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)} + \alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)})] \lambda_{13}^{*(k)} + \\ &+ [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)}) (\alpha_{m1}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} + \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n1}^{(k)}) + (\alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) (\alpha_{m2}^{(k)} \alpha_{n3}^{(k)} + \alpha_{m3}^{(k)} \alpha_{n2}^{(k)})] \lambda_{44}^{*(k)} \}; \\ \beta_{ij}^{**} &= \frac{1}{c_1} \sum_{k=1}^N c_{1k} [(\alpha_{i1}^{(k)} \alpha_{j1}^{(k)} + \alpha_{i2}^{(k)} \alpha_{j2}^{(k)}) \beta_1^{*(k)} + \alpha_{i3}^{(k)} \alpha_{j3}^{(k)} \beta_3^{*(k)}]. \quad (16) \end{aligned}$$

Формули (8) - (10), (16) визначають ефективні термопружні властивості просторово армованого матеріалу через властивості волокон і матриці. Якщо властивості волокон і їх об'ємний вміст в кожному напрямку однакові, то

$$c_{1k} = \frac{c_1}{N}; \quad \lambda_{ij}^{*(k)} = \lambda_{ij}^*; \quad \beta_i^{*(k)} = \beta_i^*, \quad (17)$$

що спрощує обчислення.

Визначення ефективних термопружних властивостей волокнистих матеріалів просторового армування з розорієнтованими волокнами. В випадку, коли волокна розорієнтовані в просторі з функцією розподілу $f(\theta, \varphi)$, ефективні термопружні постійні визначаються за формулами

$$\begin{aligned} \lambda_{ijmn}^{**} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi) \lambda_{pqrs}^* d\theta d\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi) \alpha_{ip}^{(k)} \alpha_{jq}^{(k)} \alpha_{mr}^{(k)} \alpha_{ns}^{(k)} \lambda_{pqrs}^{*'} d\theta d\varphi; \\ \beta_{ij}^{**} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi) \beta_{pq}^* d\theta d\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi) \alpha_{ip}^{(k)} \alpha_{jq}^{(k)} \beta_{pq}^{*'} d\theta d\varphi; \quad (18) \end{aligned}$$

Якщо волокна рівномірно розорієнтовані в просторі, то функція розподілу має вигляд

$$f(\theta, \varphi) = 1. \quad (19)$$

Підставляючи (19) в (18) з урахуванням (16) отримуємо ізотропний матеріал, у якого залежності макронапружень від макродеформацій і температури визначаються за формулами

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \lambda^{**} \langle \varepsilon_{pp} \rangle \delta_{ij} + 2\mu^{**} \langle \varepsilon_{ij} \rangle - \beta^{**} \theta \delta_{ij}, \quad (20)$$

де пружні постійні мають вигляд

$$\begin{aligned} \lambda^{**} &= \frac{1}{45} [9(\lambda_{11}^* + \lambda_{12}^*) - 12(\lambda_{44}^* + \lambda_{66}^*) + 24\lambda_{13}^* + 3\lambda_{33}^*]; \\ \mu^{**} &= \frac{1}{30} [(\lambda_{11}^* + \lambda_{12}^*) + 12(\lambda_{44}^* + \lambda_{66}^*) - 4\lambda_{13}^* + 2\lambda_{33}^*]; \end{aligned} \quad (21)$$

а λ_{11}^* , λ_{12}^* , λ_{13}^* , λ_{33}^* , λ_{44}^* , λ_{66}^* визначаються за формулами (8) – (11), (17).

Чисельне дослідження деформування волокнистих композитних матеріалів з розорієнтованими волокнами. За допомогою комп'ютерного моделювання було проведено чисельне дослідження залежності деформування волокнистого композиту з рівномірно розорієнтованими волокнами від об'ємного вмісту компонентів. Як компоненти взяті відповідно високомодульні вуглецеві волокна з характеристиками [14]

$$E_1^1 = 8 \text{ ГПа}; \quad E_3^1 = 226 \text{ ГПа}; \quad \nu_{12}^1 = 0,3; \quad \nu_{13}^1 = 0,2; \quad G_{13}^1 = 60 \text{ ГПа}; \quad (22)$$

об'ємним вмістом $c_1 = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ і епоксидна матриця з характеристиками [15]

$$E_2 = 3 \text{ ГПа}; \quad \nu_2 = 0,35, \quad (23)$$

де E_2 , ν_2 – відповідно модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матриці; E_1^1 і E_3^1 , ν_{12}^1 і ν_{13}^1 , G_{12}^1 і G_{13}^1 – відповідно поперечний і поздовжній модулі Юнга, коефіцієнти Пуассона і модулі зсуву волокон, які пов'язані з λ_{11}^1 , λ_{12}^1 , λ_{13}^1 , λ_{33}^1 , λ_{44}^1 формулами

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1 &= E_1^1 E_3^1 \left[E_3^1 \left(2 - \frac{E_1^1}{2G_{12}^1} \right) - 2E_1^1 (\nu_{13}^1)^2 \right]^{-1}; \quad \lambda_{11}^1 - \lambda_{12}^1 = G_{12}^1; \\ \lambda_{13}^1 &= \nu_{13}^1 (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1); \quad \lambda_{33}^1 = (\lambda_{11}^1 + \lambda_{12}^1) \frac{E_3^1}{E_1^1} \left(2 - \frac{E_1^1}{2G_{12}^1} \right); \quad \lambda_{44}^1 = G_{13}^1. \end{aligned} \quad (24)$$

На рис. 2 показані графіки залежностей макронапруження $\langle \sigma_{11} \rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ для різних об'ємних вмістів волокон c_1 . На рис. 3-5 показані криві залежностей відповідно ефективних модуля Юнга E^{**} , коефіцієнта Пуассона ν^{**} і модуля зсуву G^{**} від c_1 . Графіки показують, що залежності $\langle \sigma_{11} \rangle / \mu_2$ від $\langle \varepsilon_{11} \rangle$, криві E^{**} , ν^{**} , G^{**} істотно залежать від об'ємного вмісту волокон c_1 .

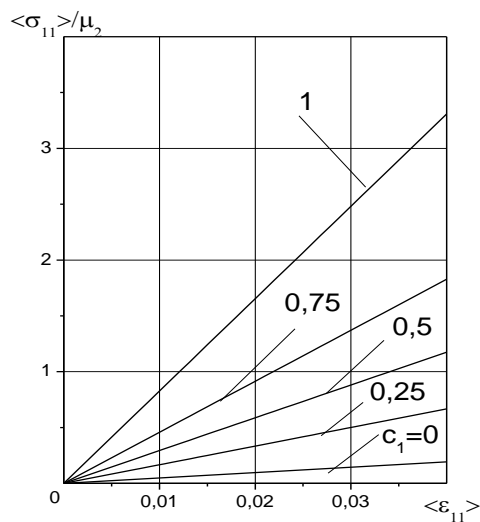


Рис. 2. Залежності макронапруження $\langle \sigma_{11} \rangle / \mu_2$ від макродеформації $\langle \varepsilon_{11} \rangle$ для різних об'ємних вмістів волокон c_1

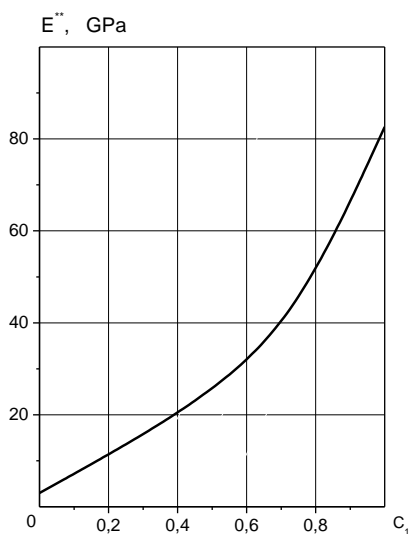


Рис. 3. Залежність ефективного модуля Юнга E^{**} від об'ємного вмісту волокон c_1

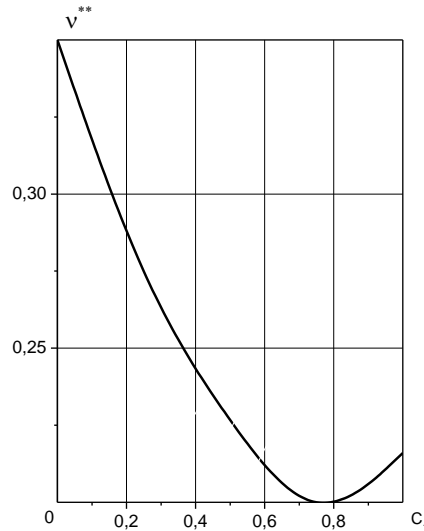


Рис. 4. Залежність ефективного коефіцієнту Пуассона ν^{**} від об'ємного вмісту волокон c_1

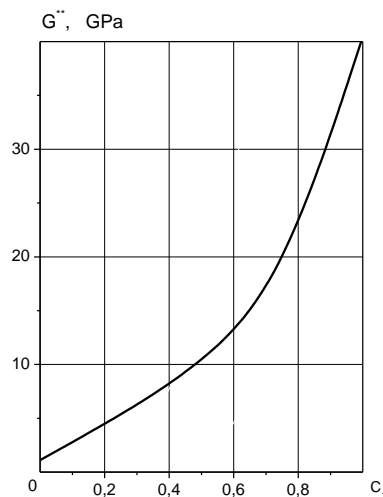


Рис. 5. Залежність ефективного модуля зсуву G^{**} від об'ємного вмісту волокон c_1

Висновки. В даній роботі побудовано модель деформування просторово-армованих матеріалів з розорієнтованими волокнами, визначено напружено-деформований стан та ефективні термопружні властивості таких композитних матеріалів, а також досліджено залежності деформування композиту від об'ємного вмісту волокон. Встановлено, що волокнистий композитний матеріал з розорієнтованими волокнами в макрооб'ємі є ізотропним, а його ефективні термопружні постійні істотно залежать від об'ємного вмісту волокон.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ванін Г.А. Микромеханика композиционных материалов. URL: https://www.studmed.ru/vanin-g-a-mikromehanika-kompozicionnyh-materialov_cbf1b78c52e.html (дата звернення 26.04.2021).
2. Головчан В.Т. Анизотропия физико-механических свойств композитных материалов. Киев, Наук.думка, 2007. 301 с.
3. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Т.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. <https://www.twirpx.com/file/1302249/grant/> (дата звернення 26.04.2021).
4. Скудра А.М., Булавс В.Я. Прочность армированных пластиков. Рига, Зинатне, 2001. 240 с.
5. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно армированные композиционные материалы. URL: <https://www.twirpx.com/file/461655/> (дата звернення 26.04.2021).
6. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Thermoelastic properties of spatially reinforced materials // *International Applied Mechanics*. 2011. Vol. 47, N 1. P. 13-20. .
7. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Шикула Е.Н., Назаренко Л.В. Механика композитов: В 12-х т. / под общ. ред. А.Н.Гузя / Т.3 Статистическая механика и эффективные свойства материалов. К.: Наук. думка, 2003. 390 с.
8. Хорошун Л. П., Шикула Е.Н. Нелинейные деформативные свойства дисперсно-упрочненных материалов // *Механика композитных материалов*. 2002. Т. 38, № 4. С. 473-486.
9. Khoroshun L.P., Shikula E.N. Deformation and long-term damage of physically nonlinear fibrous materials // *International Applied Mechanics*. 2014. Vol. 50, N 1. P. 58-67.
10. Хорошун Л. П., Шикула Е.Н. Ефективні деформівні властивості волокнистих композитних матеріалів при нелінійному деформуванні компонентів // *Доповіді Національної академії наук України*. 2016. № 6. С. 47 – 55.
11. Шикула Е.Н., Хорошун Л. П. Нелинейное деформирование волокнистых материалов // *Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного*. К.: КДАВТ, 2016. № 2 (25). С. 29 - 36.
12. Хорошун Л.П. Методы теории случайных функций в задачах о макроскопических свойствах микронеоднородных сред. URL: <https://www.twirpx.com/file/1118540/grant/> (дата звернення 26.04.2021).
13. Хорошун Л.П. Метод условных моментов в задачах механики композитных материалов // *Прикладная механика*. 2007. Т. 43, № 10. С. 100–108.
14. Крегерс А. Ф. Математическое моделирование термического расширения пространственно армированных композитов // *Механика композитных материалов*. 2008. № 3. С. 433-441.
15. Гузь А.Н., Хорошун Л.П., Михайлова М.И., Бабич Д.В., Шикула Е.Н. Механика композитов: В 12 т. / под общ. ред. А.Н.Гузя / Т. 12: Прикладные исследования. К: «А.С.К.», 2003. 398 с.

REFERENCES

1. Vanin G.A. *Mikromehanika kompozicionnyh materialov*. [Micromechanics of composite materials]. Retrieved from https://www.studmed.ru/vanin-g-a-mikromehanika-kompozicionnyh-materialov_cbf1b78c52e.html (rus). Pdf (Accessed 28 December 2012).
2. Golovchan V.T. (2007) *Anizotropija fiziko-mehaničeskikh svojstv kompozitnyh materialov*. [Anisotropy of the physical and mechanical properties of composite materials]. Kiev, Nauk.dumka.
3. Malmejster A.K., Tamuzh V.P., Teters T.A. *Soprotivlenie polimernyh i kompozitnyh materialov*. [Resistance of polymer and composite materials]. Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/1302249/grant/> (rus). Djvi (Accessed 13 December 2013).
4. Skudra A.M., Bulavs V.Ja. (2001) *Prochnost' armirovannyh plastikov*. [Strength of reinforced plastics]. Riga, Zinatne.
5. Tarnopol'skij Ju.M., Zhigun I.G., Poljakov V.A. *Prostranstvenno armirovannye kompozicionnye materialy*. Retrieved from <https://www.twirpx.com/file/461655/> (rus). Djvi (Accessed 21 Marth 2019).
6. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2011) Thermoelastic properties of spatially reinforced materials // *International Applied Mechanics*. Vol. 47, 1, 13-20. (in English)
7. Khoroshun L.P., Maslov B.P., Shikula E.N., & Nazarenko L.V. (2003) *Mehanika kompozitov*. (Vols. 1-12). Vol. 3. *Statističeskaya mehanika i effektivnyie svojstva materialov* [Mechanics of composites. (Vols. 1-12). Vol. 3. Statistical mechanics and effective properties of materials]. K.: Nauk. Dumka.
8. Khoroshun L. P., Shikula E.N. (2002) Nelinejnye deformativnye svojstva dispersno-uprochnennyh materialov [Nonlinear deformation properties of dispersion-hardened materials] // *Mehanika kompozitnyh materialov*. Vol. 38, 4, 473-486.
9. Khoroshun L.P., Shikula E.N. (2014) Deformation and long-term damage of physically nonlinear fibrous materials // *International Applied Mechanics*. Vol. 50, 1, 58-67. (in English)
10. Khoroshun L.P., Shikula O.M. (2016) Efektivni deformivni vlastyivosti voloknystykh kompozytnykh materialiv pry nelinejnomu deformuvanni komponentiv [Effective deformable properties of fibrous composite materials in nonlinear deformation of components] // *Dopovidi Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy - Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 6, 47-55.

11. Shikula E.N., Khoroshun L. P. (2016) Nelinejnoe deformirovanie voloknistykh materialov [Nonlinear deformation of fibrous materials] // *Vodnij transport. Zbirnik naukovih prac' Kiïvs'koï derzhavnoï akademii vodnogo transportu imeni get'mana Petra Konashevicha-Sagajdachnogo. K.: KDAVT. Vol 25, 2, 29-36.*
12. Khoroshun L.P. *Metody teorii sluchaynykh funktsiy v zadachah o makroskopicheskikh svoystvah mikroneodnorodnykh sred [Methods of the theory of random functions in problems of macroscopic properties of microinhomogeneous media]*. Retrieved from : <https://www.twirpx.com/file/1118540/grant/> (rus). Djvi (Accessed 03 Juny 2018).
13. Khoroshun L.P. (2007). Metod uslovnnykh momentov v zadachah mehaniki kompozitnykh materialov [The method of conditional moments in the problems of mechanics of composite materials]. *Prikladnaya mehanika - Applied Mechanics*. Vol. 43, 10, 100-108.
14. Kregers A. F. (2008). Matematicheskoe modelirovanie termicheskogo rasshirenija prostranstvenno armiro-vannykh kompozitov // *Mehanika kompozitnykh materialov*. Vol. 24, 3, 433-441.
15. Guz A.N., Khoroshun L.P., Mihaylova M.I., Babich D.V., Shikula E.N. (2003) *Mehanika kompozitov. (Vols. 1-12). Vol. 12. Prikladnye issledovaniya [Mechanics of composites. (Vols. 1-12). Vol. 12. Applied research]*. K: «A.S.K.»

Elena Shikula^{1*}

¹ Professor of the Department of Computer Science, State University of Telecommunications, Solomenska Street, 7, Kyiv, 03110, Ukraine

*Correspondent author: ensh@ukr.net

MODEL OF DEFORMATION OF FIBROUS MATERIALS OF MULTIDIRECTIONAL REINFORCEMENT WITH NONORIENTED FIBERS

A model of deformation of multidirectional reinforcement fibrous materials with differently oriented fibers is proposed. The solution to the problem is built in two stages. At the first stage, the known properties of fibers and binder are used to determine the effective thermoelastic properties and stress-strain state of the subsystem with fibers oriented in a certain way relative to the main coordinate system. It is based on stochastic differential equations of the physically nonlinear theory of elasticity using the method of conditional moments. At the second stage, using a given distribution function based on the Voigt scheme, a model of deformation of the entire system is constructed from the calculated properties of the subsystems. Strain curves are obtained for simple loading, and the deformation of materials at uniform orientation of fibers is investigated. It was found that a fibrous composite material with differently oriented fibers in a macrovolume is isotropic, and its effective thermoelastic constants substantially depend on the volumetric content of fibers.

Keywords: *fibrous material of multidirectional reinforcement, uniform orientation of fibers, stress-strain state, effective thermoelastic properties, computer implementation.*

Олександр Герцій¹, Наталія Бутрик^{2*}

¹ Завідувач кафедри, Кафедра Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8634-5880>

² Аспірант, Кафедра Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0520-645X>

*Автор, відповідальний за листування: by3nyatko@meta.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОМПАКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

В статті проаналізовано основні характеристики методів стиснення графічної інформації із втратами та без втрат (RLE, LZW, метод Хаффмана, DEFLATE, JBIG, JPEG, JPEG 2000, Lossless JPEG, фрактальний та Wavelet). Ефективна передача та збереження зображень в комунікаційних системах на залізничному транспорті зараз є важливим завданням, оскільки великі розміри зображень потребують великих ресурсів для зберігання. Це завдання стало дуже актуальним останніми роками, оскільки стали актуальними проблеми передачі інформації по телекомунікаційних каналах зв'язку транспортної інфраструктури, а також є велика потреба у проведенні відеоконференцій, де завданням є ефективне стиснення відеоданих, тому що чим більший обсяг даних, тим більша вартість передачі інформації відповідно. Тому застосування методів стиснення зображень, які передбачають зменшення розміру файлу є вирішенням цього завдання. В результаті дослідження виділено переваги та недоліки методів стиснення. Здійснено порівняльний аналіз основних можливостей методів стиснення графічної інформації. Актуальність полягає в ефективній передачі та збереженні графічної інформації, оскільки великі дані вимагають великих ресурсів для зберігання. Практичне значення полягає у вирішенні завдання ефективного зменшення розмірів даних шляхом застосування відомих методів стиснення.

Ключові слова: стиснення, метод, зображення, перетворення, характеристики.

Вступ. Зараз існує досить багато методів компактного представлення графічної інформації. Основою будь-яких методів стиснення даних є використання природної надмірності вихідної інформації. Методи стиснення графічної інформації розроблені для зниження обсягу вихідної інформації за допомогою перетворення без втрат або перетворення з втратами. Тому такі методи поділяють на стиснення з втратами та стиснення без втрат [7].

Стиснення з втратами (англ. Lossy compression) – це перетворення вхідних даних у вихідні дані, які повторюють зовнішні характеристики вхідних даних з різницею у обсязі. Ступінь подібності вхідних і вихідних даних визначається ступенем відповідності певних властивостей зображення, що представляється заданим потоком інформації. Методи стиснення з втратами дозволяють отримати істотно більші коефіцієнти стиснення. Але при цьому відбувається спотворення вихідного зображення, погіршення його якості. Тому при порівнянні різних методів стиснення

необхідно враховувати якість відновлення зображення. Стиснення із втратами найчастіше використовується для мультимедійних даних, особливо для потокової передачі даних та телефонії. Методи з втратами зазвичай застосовуються для стиснення зображень і аудіо [7, 11].

Стиснення без втрат (англ. Lossless) – це перетворення вхідних даних у вихідні дані, де закодована інформація може бути відновлена з точністю до біта. Методи стиснення без втрат застосовуються для зменшення розміру даних. З використанням цих методів можливо в точності відновити початкові дані. Для кожного з типів цифрової інформації, як правило, існують свої методи стиснення без втрат [11]. Результатом стиснення без втрат завжди є зниження обсягу вихідного потоку інформації без зміни його інформативності, тобто без втрати інформаційної структури. Методи стиснення без втрат використовуються у сферах, де важливі точність даних та швидкість їх передавання між вузлами системи. Наприклад у наукових і медичних прикладних програмах, коли втрата інформації неприпустима або самі шуми зображення є головною інформацією. Практичне значення має саме його апаратна реалізація. Такі кодери використовують в охоронних системах, системах збирання інформації, супутникових, підводних та інших системах фото- та відеоспостережень, а також в астрономічних інструментах і телескопах [7, 10].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Першими для стиснення зображень стали застосовуватися звичні методи, що використовуються в системах резервного копіювання, при створенні дистрибутивів. Ці алгоритми стискали інформацію без змін. Великі компанії використовували методи стиснення для зберігання великих масивів даних. Із появою інтернету виникла необхідність у вдосконаленні існуючих методів стиснення, оскільки пропускна здатність каналів була надзвичайно вузькою [1]. Тому були створені формати ZIP, GIF і PNG. Перший успішний архіватор ARC дозволяв стискати кілька файлів в архів, до того ж вихідні її були відчинені. ARC використовувала модифікований метод LZW. З розвитком комп'ютерної техніки, на заміну методу LZW став метод DEFLATE. Серед нових можливостей була функція розбиття архіву на томи. Ця версія досі повсюдно використовується, незважаючи на поважний вік. Формат зображень GIF (Graphics Interchange Format) підтримує стиснення зображення без втрат, і обмежений палітрою в 256 кольорів. Він до цих пір популярний, особливо в зв'язку з підтримкою анімації. Зараз DEFLATE найпопулярніший алгоритм стиснення. Оскільки останнім часом все частіше використовують нові класи зображень, старі методи перестали задовольняти вимогам, що представляються до стиснення. Це привело до створення нового типу алгоритмів – стискаючих з втратою інформації [6]. Як правило, коефіцієнт архівації, і отже, величину втрат якості в них можна задавати. При цьому досягається компроміс між розміром і якістю зображень. Однією із суттєвих проблем стиснення зображень є відсутність адекватних критеріїв оцінки втрати якості, тому що якість може погіршуватись на будь-якій стадії обробки (при оцифруванні, при переводі в обмежену палітру кольорів, при переведенні в іншу систему представлення кольорів для друку, при стисненні із втратами).

Відомо, що майже вся графічна інформація, яка піддається стиску, призначена для подальшого аналізу людиною. Краще всього втрату якості зображень оцінювати візуально, за допомогою зору. Відмінним вважається стиснення, коли неможливо візуально відрізнити початкове зображення та відновлене після стиснення; нормальним, коли

початкове та відновлене після стиснення зображення можна відрізнити тільки порівнюючи два зображення.

На практиці, навіть при відмінному збереженні якості, в зображення можуть бути внесені регулярні специфічні зміни. Тому методи стиснення з втратами не рекомендується використовувати при стисненні зображень, які надалі необхідно друкувати з високою якістю, або обробляти програмами розпізнавання образів [4]. Неприємні ефекти з такими зображеннями, можуть виникнути навіть при простому масштабуванні [2, 12, 15].

Мета і завдання дослідження. На сьогодні актуальним завданням ефективною передачі та збереження зображень в комунікаційних системах, оскільки великі розміри графічних зображень вимагають великих ресурсів для зберігання. Застосування методів стиснення зображень, які передбачають зменшення розміру файлу є вирішенням цього завдання. Існує багато розроблених методів стиснення графічної інформації, серед яких розрізняють методи спрямовані на компресію та декомпресію і методи спрямовані на ступінь стиснення. Та зазвичай такі методи розробляють для визначених типів графічної інформації. І, відповідно, для проведення аналізу різних методів стиснення зображень необхідно знати на який клас зображень треба орієнтуватися (монохроматичне, напівтонове, кольорове, зображення з неперервним тоном, дискретно-тонове зображення, зображення, в яких присутні великі області одного кольору). Тому складно розмежувати та скласти універсальний опис відомих методів. Це можна зробити тільки для типових методів за умови використання типових методів на типових платформах [15].

Матеріали та методи дослідження. До основних методів стиснення інформації без втрат належать метод RLE, метод LZW, метод Хаффмана, метод JBIG, метод Lossless JPEG та метод DEFLATE. Розглянемо їх детальніше.

1. *Метод RLE (Run Length Encoding)* – один із найстаріших і найпростіших методів стиснення. Даний метод простий у реалізації, оскільки не вимагає додаткової пам'яті при компресії/декомпресії. Метод орієнтований на зображення з невеликою кількістю кольорів або зображення з більш великими областями кольору, який повторюється. RLE має високу швидкодію та не вимагає додаткової пам'яті при стисненні. RLE має низький ступінь стиснення. Застосування даного методу ефективно при стисненні растрових тонових зображень (BMP, PCX, TIFF), оскільки вони містять довгі серії повторюваних послідовностей байтів [7, 11, 15]. Головною перевагою RLE є його більш низька розрахункова складність з більш простими етапами кодування та декодування. Це сприяє швидкій реалізації в порівнянні з іншими методами кодування для кращої роботи стиснення без спотворень [3].

2. *Метод LZW (Lempel, Ziv, Welch – метод Лемпеля-Зіва-Велча)*. Це універсальний метод стиснення без втрат орієнтований на 8-бітові зображення. Стиснення забезпечується однаковими підланцюжками байтів у потоці. Процес стиску виглядає досить просто: послідовно зчитуються символи вхідного потоку й перевіряється, чи є такий рядок в створеній таблиці рядків. Якщо рядок є, то зчитується наступний символ, а якщо рядок відсутній, то в потік заноситься код для попереднього знайденого рядка, у таблицю заноситься рядок й починається пошук знову. LZW універсальний, оскільки саме його варіанти використовуються в звичайних архіваторах. Він реалізований у форматах GIF, TIFF і TGA. Основним недоліком цього методу є низький ступінь стиснення у порівнянні зі схемою двоступеневого кодування [7, 11, 15].

3. *Метод Хаффмана* – класичний метод стиску інформації, актуальний для текстових файлів, де символи тексту замінюються ланцюжками біт різної довжини, і забезпечує однозначну побудову коду з найменшим для даного розподілу ймовірностей середнім числом символів на літеру. Метод Хаффмана практично не застосовується до зображень у чистому вигляді. Зазвичай використовується як один з етапів компресії в більш складних схемах. Це єдиний метод, що не збільшує розміру вихідних даних у найгіршому разі (якщо не вважати необхідності зберігати таблицю перекодування разом з файлом) [7, 11, 15].

4. *Метод DEFLATE* базується на комбінації алгоритмів LZW (Лемпеля-Зіва-Велч) та Хаффмана. Метод DEFLATE достатньо простий у реалізації, швидкий, широко використовується у програмному забезпеченні. Недоліком методу є низька ефективність кодування незначного обсягу даних. Порівняно із методами RLE, LZW та Хаффмана, метод DEFLATE є оптимальним за співвідношенням якості втрати. Тому доцільно розробити новий підхід до стиснення зображень на основі методу DEFLATE з використанням етапу попередньої обробки. На цьому етапі повинні підготуватися дані, які по-перше, мають повторювані фрагменти, по-друге, мають велику кількість однакових пікселів на зображенні. Етап попередньої обробки може включати наступні основні алгоритми: визначення кольору фону; визначення наявності зображення; аналіз можливості відділення фрагментів зображення; доведення фрагментів до прямокутної форми; безпосередня обробка фрагментів зображення. Додатково збільшити коефіцієнт стиснення можливо за рахунок вибору кольорової моделі. Так як алгоритм DEFLATE стискає за рахунок різної частоти з'явлення пікселів у зображенні, то доцільно використовувати кольорорізнлицеву модель, в якій у двох кольорових компонентів знижений динамічний діапазон даних для фрагментів зображення з однотипними рядками [11].

5. *Метод JBIG (Joint Bi-level Experts)* розроблений групою експертів ISO (Joint Bi-level Experts Group) спеціально для стиснення однобітних чорно-білих зображень (наприклад, для факсів або відсканованих документів), і може застосовуватися і до 2-х, і до 4-х бітових зображень, розбиваючи їх на окремі бітові площини. Метод JBIG так само як метод Хаффмана, використовує для частих символів короткі ланцюжки, для рідких — довгі. Однак на відміну від нього в методі JBIG використовуються послідовності символів. JBIG дозволяє керувати порядком розбиття зображення на бітові площини, шириною смуг в зображенні, рівнями масштабування. Останнє дозволяє легко орієнтуватися в базі великих за розмірами зображень, переглядаючи спочатку їх зменшені копії. Налаштування означених параметрів дозволяє при отриманні зображення по мережі або по будь-якому іншому каналу, пропускна здатність якого мала в порівнянні з можливостями процесора, розпаковувати зображення на екрані поступово, що забезпечує оператору аналіз картинки задовго до кінця процесу розархівування. Характерною особливістю JBIG є різке зниження ступеню стиснення при підвищенні рівня шумів вхідного зображення [7, 11, 15].

6. *Метод Lossless JPEG* розроблений групою експертів з фотографії (Joint Photographic Expert Group). JPEG-LS створено на основі методу стиснення LOCO-I. Він істотно відрізняється від методів JPEG та JPEG2000, хоча назва схожа. На відміну від JBIG, Lossless JPEG орієнтований на повнокольорові 24-бітові та 8-бітові зображення без палітри (в градаціях сірого). Він представляє собою спеціальну реалізацію JPEG без втрат. JPEG включає два способи стиснення – без втрат і з втратою якості. Цей метод рекомендується використовувати в системах з доволі обмеженими ресурсами,

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

наприклад, космічних станціях чи веб-камерах. Метод JPEG-LS складається з трьох основних етапів виконання: моделювання, прогнозування та кодування. Основною його відмінністю від інших алгоритмів є модуль прогнозування та робота з контекстом [7, 10, 11, 15] Для порівняння методів стиску графічної інформації без втрат розглянемо таблицю 1.

Таблиця 1. Порівняння основних характеристик методів стиснення графічної інформації без втрат

Назва методу	Основні характеристики методу	Переваги та недоліки методу
Метод RLE (Run Length Encoding)	Суть полягає у кодуванні повторюваних значень кольорів	<i>Переваги:</i> простий в реалізації, корисний для надлишкових даних, таких як картинки із великою кількістю пікселів
		<i>Недоліки:</i> стиск призводить до збільшення розміру файлу
LZW (метод Лемпеля-Зіва-Велча)	Повторення однотипних послідовностей кольорів	<i>Переваги:</i> простий в реалізації, висока швидкість стиску, не потребує додаткової пам'яті
		<i>Недоліки:</i> малий коефіцієнт стиску
Хаффмана	Різна частота появи кольорів	<i>Переваги:</i> висока швидкість стиску, актуальний для текстових файлів, забезпечує однозначну побудову коду з найменшим для даного розподілу ймовірностей середнім числом символів на літеру
		<i>Недоліки:</i> практично не застосовується до зображень у чистому вигляді
DEFLATE	Стиснення відбувається за рахунок різкої частоти з'явлення пікселів у	<i>Переваги:</i> простий у реалізації, швидкий, широко використовується у програмному забезпеченні
DEFLATE	зображенні та їх однотипних рядків	<i>Недоліки:</i> низька ефективність кодування незначного обсягу даних
JBIG	Стиснення однобітних чорно-білих зображень	<i>Переваги:</i> дозволяє керувати порядком розбиття зображення на бітові площини, шириною смуг в зображенні, рівнями масштабування (можливо переглядати зображення через їх зменшені копії)
		<i>Недоліки:</i> зниження ступеню стиску при підвищенні рівня шумів вхідних даних
Lossless JPEG	Орієнтований на повнокольорові 24-бітові та 8-бітові зображення без палітри	<i>Переваги:</i> універсальний
		<i>Недоліки:</i> низький коефіцієнт стиску (при стиску зображення без втрат)

Отже, наведені вище методи стиснення інформації без втрат є універсальними та охоплюють всі типи зображень, проте мають занадто маленький коефіцієнт стиску. Використовуючи один з методів стиску без втрат, можна забезпечити стиснення зображення приблизно у два рази, хоча це і багато в чому залежить від характеристик зображення. Методи стиснення з втратами найбільш ефективні, проте вимагають також оцінювання за означеними вище критеріями, оскільки важливим в методах репродукування - забезпечення раціонального відтворення оригіналу (аналогового чи цифрового) з повним набором кольорових і тонових характеристик [7, 11].

Тому, проаналізуємо основні методи стиснення графічної інформації з втратами. До основних методів стиснення інформації з втратами належать метод JPEG, метод JPEG 2000, фрактальний метод, Wavelet (рекурсивний метод). Розглянемо їх детальніше.

1. *Алгоритм JPEG* – один з найпоширеніших і достатньо потужних методів. На сьогодні він є стандартом для повнокольорового зображення. Він оперує областями 8x8, на яких яскравість і колір міняються порівняно плавно.

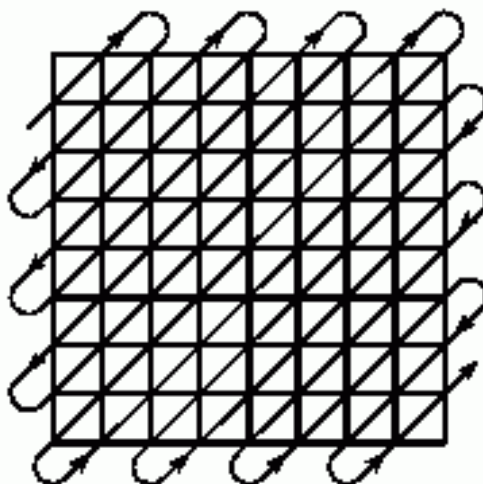


Рис. 1. Область зображення 8x8

Внаслідок цього, при розкладанні матриці такої області в подвійний ряд по косинусах значущими виявляються тільки перші коефіцієнти. Стиснення в JPEG здійснюється за рахунок плавності зміни кольорів в зображенні [11, 12, 15].

Метод охоплює повнокольорові 24 бітні зображення (24 біта на 1 точку) або зображення в градаціях сірого без різких переходів кольорів (фотографії). Симетричність: 1 [11, 15].

Схема алгоритму стиснення зображень за стандартом JPEG наведена на рис. 2.



Рис. 2. Схема алгоритму стиснення зображень JPEG (Джерело: [7])

Стиснення зображень за стандартом JPEG має таку послідовність кроків:

1) Кольорове зображення переводиться з простору RGB в простір YCrCb.

У зображеннях формату RGB є суттєва кореляція між кольоровими компонентами. Компоненти R, G і B перетворюються в компоненту Y і дві різнокольорові компоненти U і V, формату YUV, де Y – сигнал яскравості, U і V – різницеві колірні сигнали. Перетворення виконується від пікселя до пікселя за такими формулами:

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \tag{1}$$

$$U = -0.15R - 0.29G + 0.44B \quad (2)$$

$$V = 0.62R - 0.52G - 0.1B \quad (3)$$

де R, G, B – колірні сигнали зображення (червоний, зелений і синій відповідно).

Представлення кольорового зображення в системі YUV дає можливість використати особливості зорового сприйняття зображень людиною – низьку чутливість до точності представлення кольорів [7, 12].

2) Кольорове зображення розбивається на крупні пікселі. Пікселі кожної кольорової компоненти збираються у блоки 8×8 , які називаються одиницями даних;

3) Застосовується дискретне косинус-перетворення до кожної одиниці даних та отримують блоки 8×8 частот одиниць даних (для зменшення надлишковості даних зображення);

4) Квантування кожного блоку коефіцієнтів ДКП: кожна з 64 компонент частот одиниць даних ділиться на спеціальне число – коефіцієнт квантування (QC), яка округляється до цілого. Виконання ДКП є найбільш важким для реалізації. Процес кодування із застосуванням ДКП: зображення розбивається на блоки розміром 8×8 (при кодуванні кольорових зображень кожна компонента обробляється незалежно).

В межах кожного блоку виконується двовимірне ДКП відповідно до виразу:

$$F(u,v) = \frac{1}{4} C(u)C(v) \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 f(i,j) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right), \quad (4)$$

$$\text{де } C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & x = 0 \\ 1 & x \neq 0 \end{cases} \quad x = 0, \quad u, v = 0, 1, 2 \dots 7.$$

При декодуванні обчислюється зворотне ДКП:

$$F(i,j) = \frac{1}{4} \sum_{u=0}^7 \sum_{v=0}^7 C(u)C(v) F(u,v) \cos\left(\frac{(2i+1)u\pi}{16}\right) \cos\left(\frac{(2j+1)v\pi}{16}\right), \quad (5)$$

$$\text{де } i, j = 0, 1, 2 \dots 7.$$

5) Кодування результувальних коефіцієнтів із застосуванням статичного кодування Хаффмана: усі 64 квантованих частотних коефіцієнта кожної одиниці даних кодуються з допомогою комбінації RLE і алгоритму Хаффмана. На етапі статичного кодування крім алгоритму Хаффмана, специфікація JPEG допускає застосування інших методів з метою зменшення об'єму інформації, наприклад застосування арифметичного кодування QM;

6) На останньому кроці додається заголовок з використаних параметрів JPEG і результати виводяться в стислий файл. Ступінь стиску задається користувачем від 2 до 200, хоча на практиці коефіцієнт стиснення не перевищує 20-25 [11, 12, 15].

У JPEG є свої особливості. Найбільш відомі «ефект Гіббса» і дроблення зображення на квадрати 8×8 . Перший виявляється на границях різких меж предметів, утворюючи своєрідний «ореол». Розбиття на квадрати відбувається, коли задається занадто великий відсоток архівації для даного конкретного зображення. Недоліком методу JPEG є також те, що нерідко горизонтальні і вертикальні смуги на дисплеї абсолютно не видно, і можуть виявитися тільки при друці у вигляді муару. З цієї причини JPEG не рекомендується використовувати в поліграфії при високих коефіцієнтах стиснення. Однак при застосуванні раціональних меж стиснення і алгоритмів розмиття точок растровання він може розглядатися як варіант стиснення для зменшення обсягу файлу повноколірного зображення в оригінал-макетах видань, які будуть друкуватися [7].

2. *Метод JPEG 2000*. Розроблений тією ж групою експертів в галузі фотографії, що і JPEG.

Схема алгоритму стиснення зображень за стандартом JPEG2000 представлена за на рис. 3.

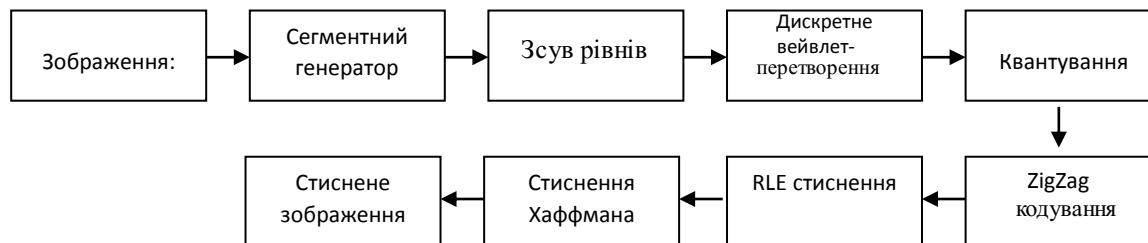


Рис. 3. **Схема алгоритму стиснення зображень JPEG2000** (Джерело: [10])

Схема алгоритму JPEG 2000 дуже схожа на базову схему JPEG. Відмінності полягають у такому:

замість дискретного косинусного перетворення (ДКП) використовується дискретне вейвлет-перетворення (ДВП);

замість кодування по Хаффману використовується арифметичне стиснення;

у алгоритм, з самого початку закладено управління якістю областей зображення;

не використовується явно дискретизація компонент U і V після перетворення кольорних просторів, оскільки при ДВП можна досягти того ж результату, але дещо краще.

Отже, при виконанні алгоритму JPEG 2000, на відміну від алгоритму JPEG, отримуємо:

покращену якість зображення при значній величині стиснення;

підтримка стиснення без втрат. Це дає можливість використовувати JPEG для стиснення медичних зображень, в поліграфії;

підтримка стиснення одно бітових (2-кольорових) зображень. У JPEG при стисненні 1-бітова картинка збільшувалася в 8 разів. Після чого робилася спроба стиснення, нерідко менш ніж в 8 разів. Зараз можна рекомендувати JPEG 2000 як універсальний метод;

на рівні формату JPEG 2000 підтримується прозорість. При створенні www-сторінок тепер можна накладати прозорий фон не лише в GIF, але і в JPEG 2000. Крім того, підтримується не лише 1 біт прозорості (піксель прозорий /непрозорий), а окремий канал, що дозволило задавати плавний перехід від непрозорого зображення до прозорого фону [12, 15].

3. *Фрактальний метод* – це математичний процес кодування растрів, які містять реальне зображення, в сукупність математичних даних, що описують фрактальні властивості зображення. Метод заснований на тому, що усі природні і більшість штучних об'єктів містять надмірну інформацію у вигляді однакових малюнків, що повторюються (фрактали) [13]. Метод заснований на представленні зображення в компактній формі за допомогою коефіцієнтів системи ітерованих функцій - СІФ (Iterated Function System - IFS). СІФ переводять одне зображення в інше. Перетворенню піддаються точки в тривимірному просторі (x-координата, y-координата, яскравість) [11, 12, 13, 15]. Тобто, здійснюється пошук самоподібних областей в зображенні. Метод

використовує системи доменних і рангових блоків зображення, блоків квадратної форми, що покривають все зображення [5]. Відповідно до даного методу зображення розбивається на безліч неперекритих рангових підзображень і визначається безліч неперекритих доменних підзображень. Для кожного рангового блоку алгоритм кодування знаходить найбільш підходящий доменний блок і афінне перетворення, що переводить цей доменний блок у даний ранговий блок. Структура зображення відображається в систему рангових блоків, доменних блоків і перетворень [11, 12, 15].

Процес фрактального стиснення починається з того, що беруться два ідентичні екземпляри зображення – А і Б, один з них розділяється на блоки, що не перекриваються (рангові області), а на другому задається набір доменів, які можуть взаємно перекриватися, як це показано на рис. 4.

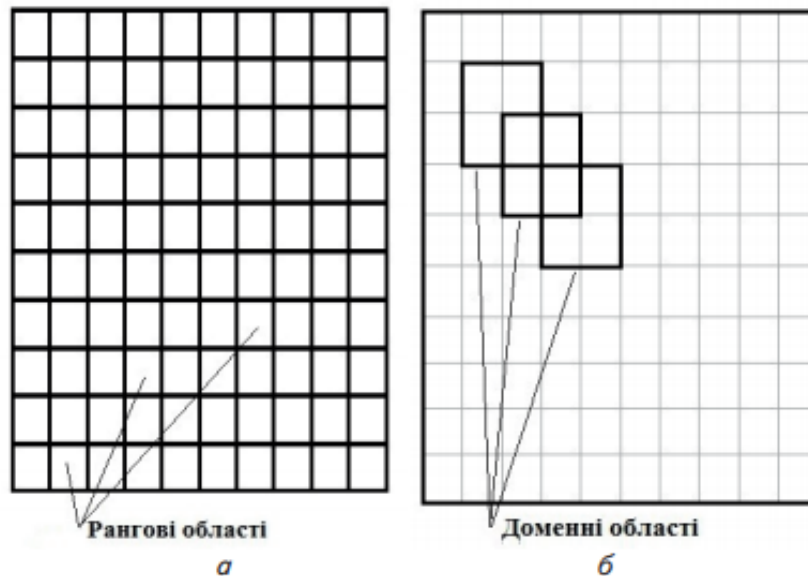


Рис. 4. Розподіл на зображенні: а- рангових областей; б – доменних областей
(Джерело: [13])

Після цього для кожної рангової області підбирається найбільш відповідний домен. Номери доменів, використаних при кодуванні кожної рангової області записуються у файл. Файл стисненого зображення містить заголовок з інформацією про розташування рангових областей і доменів.

Фрактальне стиснення – процес асиметричний. Стиснення триває набагато довше, ніж розпаковування. Ця характеристика дає можливість ефективно використовувати метод для зображень, які безперервно розпаковуються, але ніколи не стискаються. Тому фрактальний метод доцільно застосовувати в базах даних зображень. Проблемам оптимізації фрактального стиснення цифрових зображень присвячена велика кількість досліджень зарубіжних учених. Слід відмітити роботу С. В. Винокурова [8], у якій розглянуто метод фрактального стиснення зображень з використанням просторово-чутливого хешування. Проте досі мало уваги приділяється методам оптимізації фрактального стиснення, які б мали однаково високі характеристики ступеня стиснення і якості відновленого зображення. Особливо актуальним на сьогодні залишається питання побудови швидкодіючих методів фрактального стиснення [13].

Отже, проаналізувавши особливості фрактального методу стиску визначили, що він здатний забезпечити найкраще співвідношення ступеня стиску і якості відновленого

зображення. Метод має хороші перспективи для подальшого розвитку. У процесі перетворення звичайних растрових зображень у фрактальні є можливість масштабувати фрактальне зображення без появи артефактів і втрати деталей, як це характерно для растрових зображень [13]. Переваги фрактального методу полягають у високих коефіцієнтах стиснення та швидкості зворотного перетворення, а також можливості подальшого структурного аналізу зображення. Однак результати стиснення залежать від принципів відбору базових елементів і доменів, а коефіцієнт стиснення залежить від повторюваності базових елементів. Алгоритм орієнтований на повноколірні зображення і градації сірого. Фрактальне стиснення реалізовано у форматі FIF [7].

Основним недоліком фрактального методу є низька швидкість стиснення. Вона пов'язана з тим, що для отримання високої якості зображення, для кожного рангового блоку необхідно виконати перебір всіх доменних блоків. Для кожного доменного блоку необхідно виконати не менше восьми афінних перетворень. Ця проблема розв'язана тільки частково. Внаслідок відмічених недоліків цей метод застосовується на практиці порівняно рідко.

Процес фрактального перетворення асиметричний. Тобто відтворення зображення відбувається набагато швидше ніж стиснення. Тому перед дослідниками відкриваються можливості покращення ефективності та пошуку інших способів оптимізації фрактального кодування [13].

4. *Wavelet – рекурсивний (хвильовий) метод* – це стиснення з використанням сплесків, які визначені лише на частині області задання аргументу і можуть розглядатися як репліки єдиної базової функції, що відрізняються за масштабом та розміщенням. Ідея методу полягає в тому, щоб зберігати у файл різницю між середніми значеннями сусідніх блоків у зображенні, які зазвичай приймають значення близькі до 0 [7, 15]. Метод орієнтований на стиснення кольорових та чорно-білих зображень із плавними переходами. Ідеальний для картинок типу рентгенівських знімків. Сьогодні фахівці визначають низку переваг вейвлет-стиснення в порівнянні з методами, побудованими на основі дискретно-косинусного перетворення Фур'є, яке використовується в JPEG. Вейвлетне стиснення в сучасних методах компресії зображень дозволяє значно (до двох разів) підвищити ступінь стиснення чорно-білих і кольорових зображень при порівнянній візуальній якості стосовно методів попереднього покоління [7, 11, 12].

Широке застосування вейвлет-перетворення знайшло в завданнях обробки зображень (мова, супутникові зображення, рентгенограми), розпізнавання образів, при вивченні властивостей поверхонь кристалів і нанооб'єктів [16]. Вейвлет-перетворення використовуються у медичній діагностиці для стискання зображень з найменшими втратами інформації, потрібної для діагнозу. Вейвлет-перетворення більш досконалі, порівняно з перетворенням Фур'є. Метою нових методів аналізу медичних сигналів є автоматичне встановлення правильного діагнозу за відсутності лікаря чи недостатній його кваліфікації, що підвищує ймовірність діагностування захворювань на ранніх стадіях.

На рис. 5 наведено приклад застосування вейвлетів до аналізу результатів електрокардіографії.

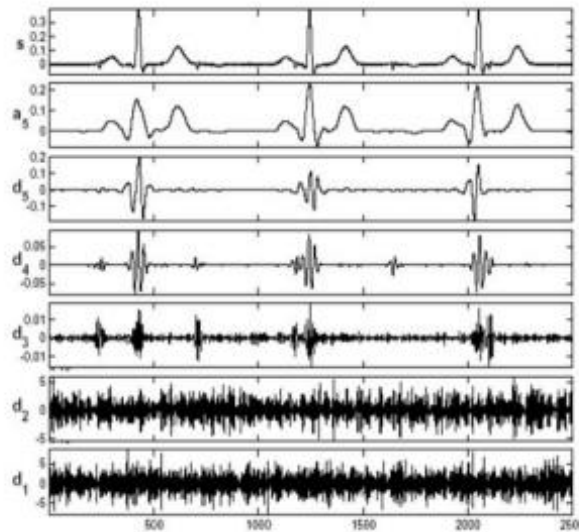


Рис. 5. Аналіз електрокардіографії за допомогою неперервних вейвлет-перетворень (Джерело: [14])

Коефіцієнти неперервного вейвлет-перетворення містять інформацію про енергію окремих компонент електрокардіографії сигналу і про час їх появи. Це дозволяє одночасно досліджувати повільну і швидку динаміку змін кардіосигналу у часі.

Широко застосовується вейвлет-аналіз до дослідження електрокардіограми плоду з абдомінальних сигналів матері. Метод дозволяє усунути шуми та очистити абдомінальний сигнал від головної високоамплітудної перешкоди — ЕКГ матері. Сигнал абдомінальної ЕКГ за допомогою дискретного вейвлет-розкладу представляється у вигляді суми апроксимуючої складової та деталізуючих складових [рис 6].

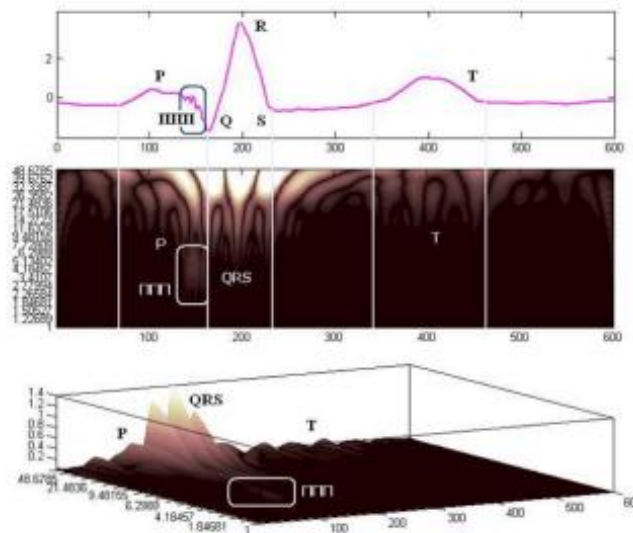


Рис. 6. Вейвлет-розклад моделі ЕКГ (Джерело: [14])

До переваг цього методу можна віднести те, що він дуже легко дозволяє реалізувати можливість поступового «проявлення» зображення при передачі його по мережі. Крім того, оскільки на початку зображення ми фактично зберігаємо його зменшену копію, то це спрощує його показ по заголовку. На відміну від JPEG і фрактального алгоритмів

цей метод не оперує блоками, наприклад 8x8 пікселів. Точніше ми оперуємо блоками 2x2, 4x4, 8x8 і так далі. Проте за рахунок того, що коефіцієнти для цих блоків ми зберігаємо незалежно, є можливість досить легко уникнути дроблення зображення на мозаїчні квадрати [12].

За останні декілька років вейвлет-перетворення стало відоме як потужний інструмент для стиснення зображень. Відомі різноманітні підходи, що мають справу з кодуванням за допомогою вейвлетів. Ефективність кодування з перетворенням по суті залежить від стиснення енергії дворівневим вейвлет-перетворенням [9, 16]. Створення нової системи функцій «вейвлетів» здійснило справжню революцію в теорії обробки та збереження сигналів, дозволяючи стискати інформацію в 100 -150 разів без суттєвої втрати якості. Це і є головним призначенням та досягненням використання вейвлет-перетворень [9].

Отже, проаналізувавши основні характеристики методів стиснення графічної інформації з втратами представимо результати порівняння у таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння основних характеристик методів стиснення графічної інформації з втратами

Назва методу	Основні характеристики методу	Переваги та недоліки методу
JPEG	Відсутність різких границь	<i>Переваги:</i> Гарна якість відновленого зображення
		<i>Недоліки:</i> Ефект Гібса. Відсутність автоматичного перетворення для множини випадків
JPEG 2000	Відсутність різких границь	<i>Переваги:</i> покращена якість зображення при значній величині стиснення, підтримка стиснення без втрат, підтримка стиснення однобітових (2-кольорових) зображень
JPEG 2000	Відсутність різких границь	<i>Недоліки:</i> Відсутність автоматичного перетворення для множини випадків
Фрактальний	Повноколірні зображення і градації сірого	<i>Переваги:</i> Високий коефіцієнт стиснення, висока швидкість зворотного перетворення можливість подальшого структурного аналізу зображення, розмір фізичних даних, які використовуються для запису фрактальних кодів, значно менший розміру початкових растрових даних.
		<i>Недоліки:</i> низька швидкість стиснення, через що метод метод застосовують порівняно рідко
Wavelet (рекурсивний стиск)	Стиснення кольорових та чорно-білих зображень із плавними переходами	<i>Переваги:</i> можливість стиснення інформації без суттєвої втрати якості
		<i>Недоліки:</i> їх відносна складність

Висновки. Отже, проаналізувавши методи стиснення графічної інформації, можна виявити широкий спектр різних вимог та обмежень до зображення для його компактного представлення. Дослідили, що основними вимогами до універсальних методів компактного представлення зображень є високі ступінь стиску, якість стиснутого зображення та швидкість компресії/декомпресії, а також врахування індивідуальної специфіки зображення.

У результаті дослідження виявили, що методи стиснення зображень з втратами мають значно кращі показники стиснення у порівнянні з іншими існуючими методами.

В багатьох ситуаціях невеликі втрати даних допустимі та компенсуються зростанням ступеню стиснення. Вважаємо, що серед досліджених методів стиснення з втратами фрактальний метод є найбільш перспективним для подальшого розвитку, вдосконалення та практичного використання в комп'ютерних технологіях. Він має декілька унікальних особливостей та переваг: відновлення зображення відбувається набагато швидше, відсутні спотворення на границі різких переходів кольорів, можливість використання даного методу для стиснення зображень, які готують для якісного друку, а також масштабування зображень.

Зараз існує багато методів стиснення зображень, деякі з них стандартизовані. Описані стандартні методи та їх комбінації не дають однозначної відповіді про те, які з них найкращі. Все залежить від конкретних вимог до відновленого після стиску зображення, наявного апаратного та програмного забезпечення.

Отже, досягти великих коефіцієнтів стиснення, використовуючи один метод (крім фрактального), практично неможливо. Тому ефективно кодування зображень виконується із застосуванням декількох методів за декілька етапів. Ця концепція і покладена в основу стандартів, розроблених міжнародною організацією по стандартизації (International Organization for Standardization –ISO).

ЛІТЕРАТУРА

1. Bindu K., Ganpati A., Sharma A. K. A Comparative Study of Image Compression Algorithms // *International Journal of Research in Computer Science*. 2012. вип. 5 Т. 2. С. 37-42.
2. Gunasheela, K.S., & Prasantha, H.S. Satellite image compression-detailed survey of the algorithms. // *In Proceedings of International Conference on Cognition and Recognition*, Springer, Singapore. 2018. С. 187-198.
3. Mohammadpour T.I., Mollaei M. R. K. ECG Compression with Thresholding of 2-0 Wavelet Transform Coefficients and Run Length Coding. // *European Journal of Scientific Research*. 2009. вип. 27, С. 248-257.
4. Viola I., Řeřábek M., Bruylants T., Schelkens P., Pereira F, & Ebrahimi T. Objective and subjective evaluation of light field image compression algorithms // *In 2016 Picture Coding Symposium (PCS)*, IEEE. 2016. С. 1-5.
5. Welstead S.T. Fractal and wavelet image compression techniques // Spie Press. 1999. вип. 40.
6. ZainEldin H., Elhosseini M.A., & Ali H. AImage compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey // *Ain Shams Engineering Journal*. 2015. вип. 6 Т. 2. С. 481-490.
7. Афанасьев Д. Систематизация методов стиснення цифрових зображень // *Сучасне репродукування: інжиніринг, моделювання, мульти- та кросмедійні технології*. 2018. С. 24-29.
8. Винокуров С.В. Эффективный алгоритм фрактального сжатия изображений с использованием пространственно-чувствительного хеширования [Текст] / С.В. Винокуров // *Открытое образование*. 2006. Т.4, № 57. С. 62-70.
9. Гармаш В.В., Кулик А.Я. Вейвлет-фільтр для стиснення зображень. // Підсекція 6.2, м. Вінниця, С. 371.
10. Глухов В.С., Хомиць В.М. Підхід до стиснення зображень без втрат методом JPEG-LS. // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: *Комп'ютерні системи та мережі*. 2017. вип. 881. С. 32-40.
11. Гриньов Д.В., Закіров З.З. Методи стиснення зображень в системах цифрової обробки даних. // *Системи обробки інформації*. 2010. вип. 2. Т. 83. С. 66-70.
12. Зубко, Р.А. Алгоритми стиснення зображень. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013 вип. 1. Т.2, С. 40-44.
13. Зубко Р.А. Стиснення зображень фрактальним методом. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. вип.6. Т.2. С 23-28.
14. Калюга Б.В., Задерей Н.М. Застосування вейвлет-перетворення в сучасній науці та техніці. // *Наукові записки молодих учених*. 2019. вип. 4.
15. Корпань Я.В. Методи та алгоритми компактного представлення графічної інформації в комп'ютерних системах. // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. вип.3. Т. 2. С. 32-36.
16. Ситников В.С., Биленко А.А. Классификация вейвлет-функций. // *Труды Одесского политехнического университета*. 2008. вип.1. С. 168-170.

REFERENCES

1. Bindu, K., Ganpati, A., & Sharma, A. K. (2012). A comparative study of image compression algorithms. *International Journal of Research in Computer Science*, 2(5), 37.
2. Gunasheela, K. S., & Prasantha, H. S. (2018). Satellite image compression-detailed survey of the algorithms. In *Proceedings of International Conference on Cognition and Recognition* (pp. 187-198). Springer, Singapore.

3. Mohammadpour, T. I., Mollaei, M. R. K., "ECG Compression with Thresholding of 2-0 Wavelet Transform Coefficients and Run Length Coding", Euro. J. Sci. Research, vol-27, pp 248-257,2009.
4. Viola, I., Řeřábek, M., Bruylants, T., Schelkens, P., Pereira, F., & Ebrahimi, T. (2016, December). Objective and subjective evaluation of light field image compression algorithms. In *2016 Picture Coding Symposium (PCS)* (pp. 1-5). IEEE.
5. Welstead, S. T. (1999). *Fractal and wavelet image compression techniques* (Vol. 40). Spie Press.
6. ZainEldin, H., Elhosseini, M. A., & Ali, H. A. (2015). Image compression algorithms in wireless multimedia sensor networks: A survey. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 481-490.
7. Afanasyev, D. (2018). Systematyzatsiya metodiv stysnennya tsyfrovyykh zobrazhen' [Systematization of digital image compression methods].
8. Vinokurov, S.V. (2006) Effektivnyy algoritm fraktal'nogo szhatiya izobrazheniy s ispol'zovaniyem prostranstvenno-chuvstvitel'nogo kheshirovaniya [An effective algorithm for fractal image compression using spatially sensitive hashing]. *Open education*. 4(57). P. 62–70.
9. Garmash, V.V., & Kulik, A. Ya. VEYVLET-FIL'TR DLYA STYSNENNYA ZOBRAZHEN' [WAVELET FILTER FOR COMPRESSION OF IMAGES]. Subsection 6.2, 371.
10. Glukhov, V.S., & Khomits, V.M. (2017). Pidkhid do stysnennya zobrazhen' bez vtrat metodom JPEG-LS [The approach to lossless image compression using the JPEG-LS method]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Computer Systems and Networks*, (881), 32-40.
11. Grinyov, DV, & Zakirov, ZZ (2010). Metody stysnennya zobrazhen' v systemakh tsyfrovoyi obrobky danykh [Methods of image compression in digital data processing systems]. *Information processing systems*, (2), 66-70.
12. Zubko, R.A. (2013). Alhorytmy stysnennya zobrazhen' [Image compression algorithms]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 1 (2), 40-44.
13. Zubko, R.A. (2014). Stysnennya zobrazhen' fraktal'nyy metodom. [Compression of images by fractal method]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, (6 (2)), 23-28.
14. Kaluga, B.V., & Zaderey, N.M. (2019). ZASTOSUVANNYA VEYVLET-PERETVORENNYA V SUCHASNIY NAUTSI TA TEKHNISSI [APPLICATION OF WAVELET TRANSFORMATION IN MODERN SCIENCE AND TECHNOLOGY]. *Scientific notes of young scientists*, (4).
15. Korpan, Ya.V. (2015). Metody ta alhorytmy kompaktnoho predstavleniya hrafichnoyi informatsiyi v komp'yuternykh systemakh. [Methods and algorithms for compact representation of graphic information in computer systems]. *Technological audit and production reserves*, (3 (2)), 32-36.
16. Sitnikov, V.S., & Bilenko, A.A. (2008). Klassifikatsiya veyvlet-funktsiy [Classification of wavelet functions]. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, (1), 168-170

Olexander Gertsy¹, Nataliia Butryk²

¹ Department of Automation and Computer-Integrated Transport Technologies, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

² Personnel department, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPACT METHODS REPRESENTATIONS OF GRAPHIC INFORMATION

The main characteristics of graphic information compression methods with losses and without losses (RLE, LZW, Huffman's method, DEFLATE, JBIG, JPEG, JPEG 2000, Lossless JPEG, fractal and Wavelet) are analyzed in the article. Effective transmission and storage of images in railway communication systems is an important task now. Because large images require large storage resources. This task has become very important in recent years, as the problems of information transmission by telecommunication channels of the transport infrastructure have become urgent. There is also a great need for video conferencing, where the task is to effectively compress video data - because the greater the amount of data, the greater the cost of transmitting information, respectively. Therefore, the use of image compression methods that reduce the file size is the solution to this task. The study highlights the advantages and disadvantages of compression methods. The comparative analysis the basic possibilities of compression methods of graphic information is carried out. The relevance lies in the efficient transfer and storage of graphical information, as big data requires large resources for storage. The practical significance lies in solving the problem of effectively reducing the data size by applying known compression methods.

Keywords: *compression, method, image, transformation, characteristics.*

УДК 658.012:681.32:621.38

Леонід Тимченко¹, Наталія Кокряцька², Дмитро Жук^{3}, Валентина Каплун⁴*

¹ Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікаційні технології та автоматика, Державний університет інфраструктури та технологій, Україна. ORCID: 0000-0003-0090-3886

² Кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційні технології та автоматика, Державний університет інфраструктури та технологій, Україна. ORCID: 0000-0001-9813-1399

³ Аспірант кафедри телекомунікаційні технології та автоматика, Державний університет інфраструктури та технологій, Україна. ORCID: 0000-0001-8951-5542

⁴ Старший викладач кафедри захисту інформації, Вінницький національний технічний університет, Україна. ORCID: 0000-0001-9813-1399

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

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛІС ДЛЯ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ЛАЗЕРНИХ ТРАС

Розглянуто сучасні проблеми обробки зображень лазерних трас. Проведено аналіз існуючих рішень та останніх досліджень у сфері обробки зображень лазерних трас. Визначено, що останні рішення мають ряд недоліків в умовах збільшення швидкості і щільності потоку інформації. Також існують проблеми із надмірним споживанням електроенергії під час обробки зображень за рахунок надлишкової потужності та часу надходження інформації до процесора.

Представлено спосіб обробки зображень лазерних трас із застосуванням ПЛІС та паралельно-ієрархічного перетворення. Проведено імітаційне моделювання методів обробки координат плям лазерних пучків та наведено його результати.

Наведено порівняння результатів обробки зображень за допомогою персонального комп'ютера та за допомогою ПЛІС.

Отримані результати дозволяють оцінити ефективність застосування ПЛІС та методів з використанням паралельно-ієрархічного перетворення під час обробки зображень лазерних трас.

За рахунок малого споживання електроенергії та ефективної обробки зображень за допомогою ПЛІС та паралельно-ієрархічного перетворення – дана технологія має великі перспективи при застосуванні у автомобільній галузі. З її допомогою можна вдосконалити розвиток безпілотного керування автомобільними засобами, особливо для електромобілів.

Ключові слова: паралельно-ієрархічні перетворення, ПЛІС, обробка зображень, лазерні траси, лазерні плями.

Вступ. Обробка зображень в реальному часі стала невід'ємною частиною повсякденного життя. Швидкість потоку та об'єми даних невпинно зростають і вимагають сучасних рішень у їх обробці для збільшення продуктивності та ефективності їх обробки.

Пристрої, які використовуються для збору, обробки і передачі даних повинні буди водночас економними та ефективно проводити попередню обробку даних для зменшення навантаження на систему та її канали зв'язку. Одним із найоптимальніших способів вирішення даної проблеми є супутникові лазерні лінії зв'язку. В таких системах важливим є точне визначення координат плям лазерних променів. Система повинна працювати в реальному часі та ефективно і економно використовувати свої ресурси.

В статті наведено рішення даної проблеми за допомогою застосування програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). За допомогою ПЛІС можна ефективно обробляти зображення лазерних трас.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми

Аналіз існуючих методів динамічної обробки показує, що системи і програми, розроблені на основі цих методів, обробляють і розпізнають тільки на комп'ютерах і не мають оптичних віддалених каналів для отримання візуальної інформації, тому вони не можуть розпізнавати динамічні об'єкти в реальному часі [1].

Переваги оптичних методів проявляються в задачах автоматизованого розпізнавання візуальних образів, які полягають в класифікації збережених як відомих, так і випадкових форм при наявності вторинних збережень або перешкод. Оптико-аналогові методи обробки в процесі вирішення завдань розпізнавання зображень найбільш доцільно використовувати на вході системи з метою попередньої обробки збережених зображень і для формування первинних параметрів опису вхідного зображення [2 - 3].

Для первинної обробки зображень необхідно застосовувати пристрої, які ефективно можуть працювати в режимі реального часу та економно використовувати ресурси із збереженням продуктивності і ефективності.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є доведення ефективності використання ПЛІС для обробки зображень лазерних трас пучків, для зменшення навантаження на системи лазерних ліній зв'язку.

Завданням дослідження є аналіз застосування ПЛІС для первинної обробки зображень лазерних трас.

Матеріали та методи дослідження. У статті проведено імітаційне моделювання методів обробки координат плям лазерних пучків. У якості імітатора використовується поєднання програмних засобів та вхідних даних записаних у реальному часі. Структурна схема обробки даних такою комплексною системою показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема імітатора комп'ютеризованої системи (КС) обробки та прогнозування трас лазерних пучків

Програма, яка з високою точністю визначає центри зображень, послідовно отримує на вхід кадри динамічних зображень, які знаходяться в пам'яті комп'ютера. Отримані кадри зберігаються в двовимірному масиві. На першому етапі обробки, швидко визначаються попередні центри зображень лазерної плями. Далі проводиться визначення коефіцієнтів корекції координат центру об'єкта на основі методу визначення центру об'єкта з високою точністю. Поріг бінаризації, на цьому кроці, встановлюється користувачем вручну або програма виставляє значення за замовчуванням [4].

Наступним кроком обробки зображення є передача отриманих результатів визначення центру з високою точністю програмі, що прогнозує координати зображень плям лазерних пучків. Перші декілька кадрів, які визначені користувачем або програмою за замовчуванням, визначаються як навчальні для програми і прогнозування. На цьому кроці програма накопичує отримані дані, на основі яких в майбутньому буде проводитись прогнозування. Після того, як навчання буде закінчено, програма прогнозує розташування центру лазерної плями для наступних декількох кадрів. Кількість кадрів для прогнозування заздалегідь записані користувачем або програма вибирає кількість за замовчуванням. Після того, як прогнозування було проведено, програма записує дані у масив. Результати визначення центрів з підвищеною точністю записуються додатково. Якщо масив, в який були записані результати прогнозування має результати, які були отримані на попередніх кроках, то дані порівнюються з реальними та визначається похибка прогнозування на даному етапі. Результати, отримані в результаті прогнозування виводяться користувачеві у читабельному вигляді [5].

Для того, щоб покращити результати прогнозування та підвищити швидкість обробки, значення похибки прогнозування координат центрів надаються програмі користувачем. Після цього програма сама визначає чи необхідно корегувати поріг бінаризації або інші параметри обробки даних в системі.

Для обміну даними між програмами використовують окремо виділені потоки, або пам'ять комп'ютера. У першому способі передача та обробка даних відбувається значно швидше, оскільки інформація передається безпосередньо між процедурами програм, які обробляють дані.

Дуже важливими в наведеній системі є інформаційні потоки, тому що всі інші потоки залежать від них. Потоки даних показують зв'язки між компонентами системи та мають вектор і назву даних, які передають. Назви потоків мають бути простими і чітко описувати назви самих об'єктів або їх частин. Якщо певних потік опрацьовується у декількох процесах, то його назва повинна містити дію, що була виконана над потоком. Наприклад, якщо потік мав назву «Транзакція», то після процесу «Перевірка транзакції», він матиме назву «Перевірена транзакція». Потоки можуть проходити між:

- двома певними процесами;

- процесом і елементом збереження даних (наприклад файлова система, масив, тощо);

- процесом і зовнішнім елементом.

В системі доцільно використовувати потоки між двома процесами, оскільки це оптимальний варіант для підвищення швидкості обробки інформації і добре підходить для ефективної обробки даних в реальному часі [6].

У імітованій моделі для найбільш ефективного прогнозування та визначення розташування плям лазерних пучків, доцільним буде зв'язати процедуру, що відповідає за визначення центру координат лазерної плями та процедуру прогнозування координат.

У програмі було реалізовано комбінований метод обчислення координат і класифікації плям лазерних пучків з використанням прямого паралельно-ієрархічного перетворення [7]. Так як цей метод складається з двох етапів (визначення координат плям лазерних пучків і первинної оцінки зображення, а також оцінка отриманого кадру з використанням паралельно-ієрархічних мереж, то ця обробка відбувалась з використанням статичних зображень для перевірки адекватності використаних алгоритмів. Виконання моделювання було проведено за допомогою мови C#. Приклад обробки зображення лазерної траси програми представлений на рис. 2 [8].

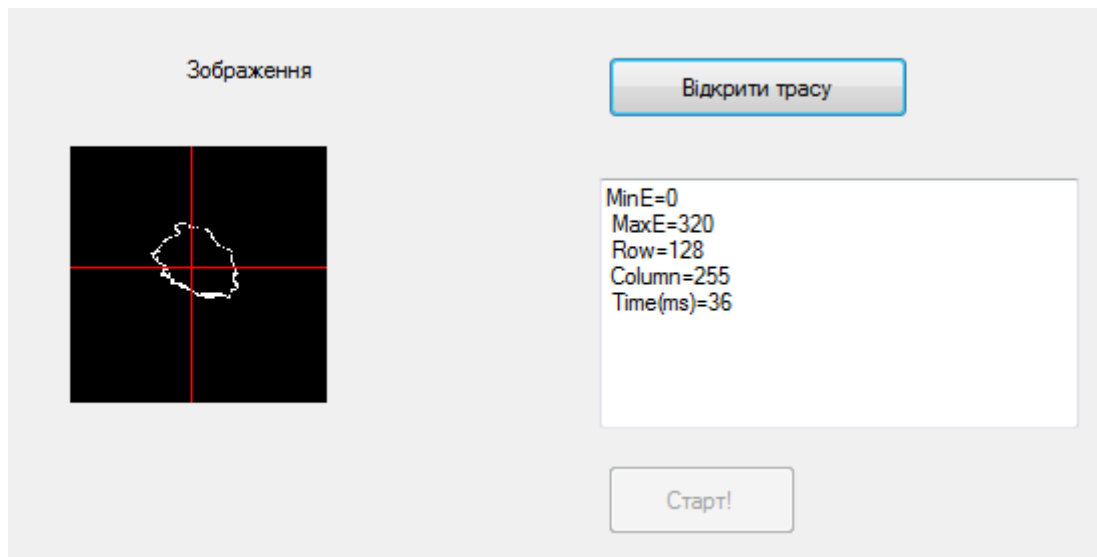


Рис. 2. Приклад обробки зображення лазерної траси паралельно-ієрархічною мережею

Під час виконання програми, користувачеві відображаються тільки основні дані обробки, всі інші деталі зберігаються у локальне сховище або файл, що дозволяє проводити подальшу обробку зображень.

Алгоритм, який використовується для реалізації комбінованого методу обчислення координат і класифікації плям лазерних пучків з використанням прямого паралельно-ієрархічного перетворення представлено на рис.3.

Для контролю адекватності, були використані зображення простих геометричних фігур, центри яких можна визначити вручну за допомогою формул. Для імітації зображень, що були отримані в реальному середовищі, тестові кадри були оброблені за допомогою Гаусового фільтру [9 - 10].

Приклади таких зображень і результати їх обробки наведені у табл.1.

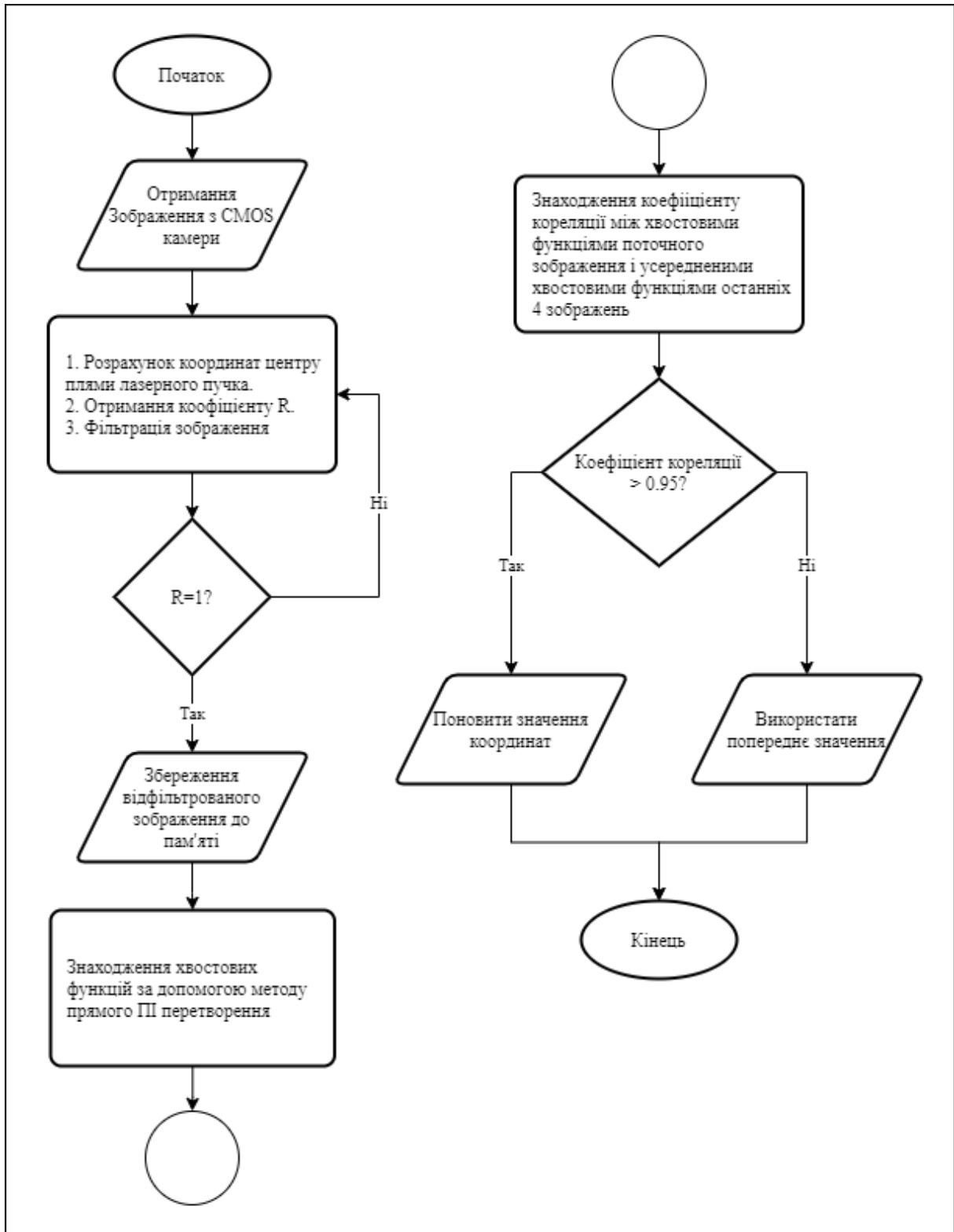

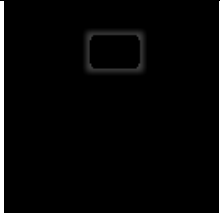
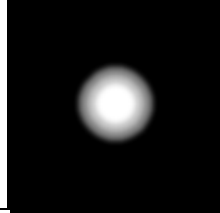
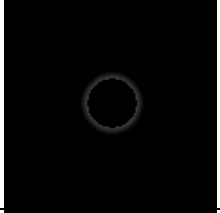
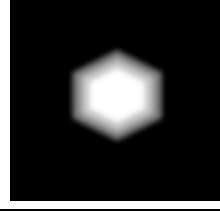
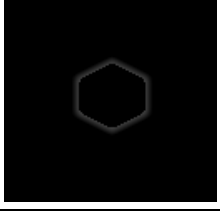


Рис. 3. Схема алгоритму комбінованого методу обчислення координат і класифікації плям лазерних пучків з використанням методу прямого паралельно-ієрархічного перетворення

Таблиця 1. Координати тестових зображень

№	Тестове зображення	Реальні координати	Оброблене зображення	Отримані координати	Коефіцієнт форми
1		X=65,5 Y=30,5		X=65,5 Y=30,5	r=0
2		X= 64,5285 Y= 64,5285		X= 64,5284 Y= 64,5284	r=1
3		X= 64,5 Y= 63,7413		X= 64,5 Y= 63,7410	r=1

У табл. 2 наведені характеристики паралельно-ієрархічних перетворень для тестового з зображення №2.

Таблиця 2. Дані перетворення для тестового зображення №2

Параметр	Матриця
	128×128
Кількість рівнів	88
Максимальна кількість рядків	128
Максимальна кількість стовпчиків	255
Максимальне значення	528

Виходячи з інформації, наведеної в табл. 1, розроблений метод адекватно обробляє тестові зображення, а саме:

реальні і визначені координати центрів співпадають;

за допомогою методу перерізів, виділяються фігури, які мають спад яскравості, наближений до гаусоїди;

за допомогою порогового фільтру, виділяється контур об'єкта, що значно зменшує кількість даних для паралельно-ієрархічного перетворення і збільшує швидкість обробки зображення [11].

Для того, щоб перевірити коректність результатів роботи методу, використовувались реальні кадри лазерної траси. Обробка трас відбувалась за допомогою розроблених алгоритмів на базі комп'ютера. У табл.3 наведено значення похибки порівняно з методом перерізів на прикладі координати X для траси 2 [12].

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Таблиця 3. Дані координати X для фрагменту траси

Координата X	Координата X після методу перерізів	Відносна похибка δ_x , % методу перерізів	Координата X після обробки ПП мережею	Відносна похибка δ_x , % після обробки ПП мережею
64,23298	64,23298	0,693354	64,23298	0,59803809
64,17586	64,17586	0,60381	64,17586	0,508578376
64,21089	64,21089	0,65872	64,21089	0,563436345
64,29981	64,29981	0,79812	64,29981	0,702704658
64,29333	64,29333	0,787958	64,29333	0,692551957
64,28871	64,28871	0,78071	64,28871	0,685310808
64,34432	64,34432	0,867891	64,34432	0,772409863
64,41261	64,41261	0,974951	64,41261	0,879368189
64,51001	64,51001	1,127633	64,51001	1,031905994
64,47762	64,47762	1,076862	64,47762	0,981183148
64,50553	64,50553	1,1206	64,50553	1,024879813
64,51427	64,51427	1,134308	64,51427	1,03857412
64,48501	64,48501	1,088433	64,48501	0,992743036
64,36948	64,36948	0,907331	64,36948	0,811811928
64,24085	64,24085	0,705687	64,24085	0,610359248
64,25079	64,25079	0,721278	64,25079	0,625935206
64,26371	64,26371	0,741527	64,26371	0,646165646
64,22173	64,22173	0,67571	64,22173	0,580410311
64,30132	64,30132	0,800475	64,22173	0,580410311
64,30007	64,30007	0,798524	64,30007	0,703108825
64,30151	64,30151	0,80300	64,30007	0,701205512

Оброблялися траси, що містять 1500 – 2000 кадрів, що відображають різні зміни стану атмосфери. Так як кадри зняті на камеру, і над ними не проводилась первинна обробка, то використання фільтрів для додавання шуму не відбувалось.

Для перевірки координат був використаний метод перерізів, робота якого показана на рис. 4 [13 – 14].

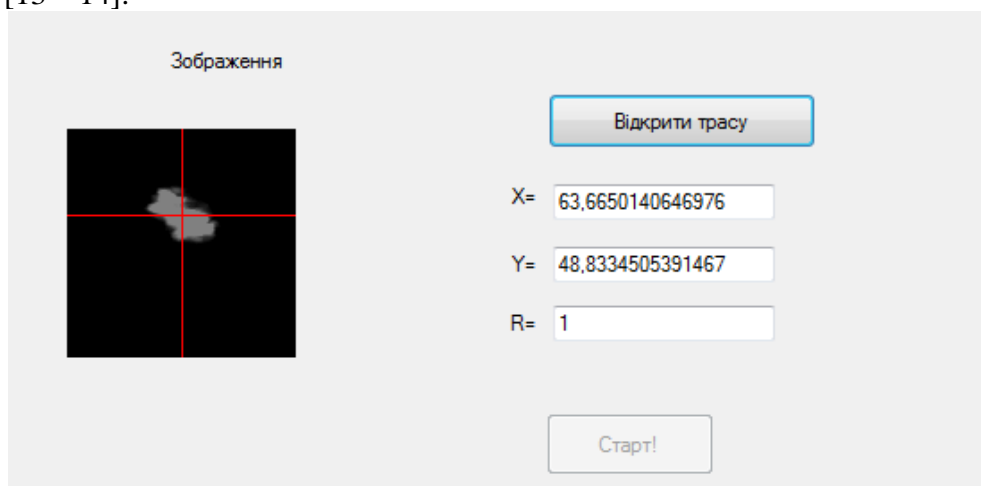


Рис. 4. Приклад обробки зображення траси за допомогою методу перерізів

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Після обробки трас, можна побачити, що середня похибка отриманих координат методом перерізів складає 0,51%, з максимальною похибкою 2,5%, а отриманих комбінованим методом обчислення координат і класифікації плям лазерних пучків з використанням методу прямого паралельно-ієрархічного перетворення середня похибка склала 0,47% і максимальна 1,6%.

Фізичне моделювання було проведено з метою оцінки коректної роботи створеної комп'ютерної системи і було проведено за схемою, описаною на рис. 5.

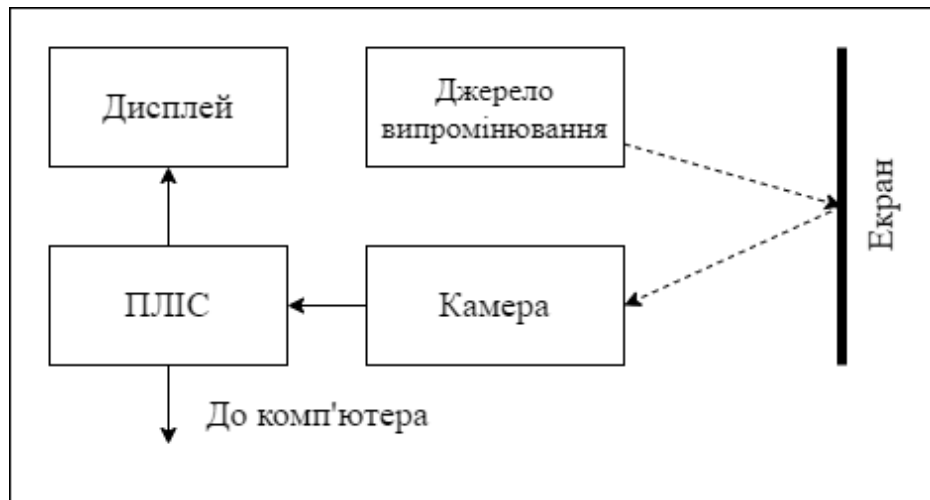


Рис. 5. Схема проведення дослідження макету

Система працювала наступним чином. ПЛІС обробляла лазерний промінь, що потрапляв на матрицю камери. Виділялось лише зображення розміром 128x128 точок і зелений сегмент кольору (що є первинним фільтром зображення). Після цього, отриманий кадр перетворювався у палітру сірого і був виведений на дисплей. Паралельно, за допомогою розроблених схем, відбувалась обробка даних з камери (пошук центру координат, коефіцієнта γ та значень паралельно-ієрархічного перетворення) [15].

Визначені координати автоматично передавались за допомогою використання послідовного порту на комп'ютер, де вони використовувались для подальшої обробки. За необхідності, також є можливість передавати інші дані, в залежності від подальшого використання макету.

Таблиця 4. Фрагмент даних координат отриманих при роботі макета

№ п/п	Координата X	Координата Y	Коефіцієнт форми γ	Коефіцієнт кореляції	Час обробки (ms)
1	56,48267	58,1151	1	0,778437	7,86544
2	56,65417	58,09576	1	0,731094	7,89269
3	56,49627	57,91124	1	0,77181	7,79132
4	56,45757	57,83563	1	0,829857	7,33788

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Закінчення таблиці 4

5	56,44509	58,122	1	0,751916	6,10182
6	56,55241	58,15756	1	0,609899	6,57161
7	56,61732	57,96613	1	0,639868	6,57161
8	56,65915	57,80936	1	0,790547	6,87245
9	56,61959	57,79524	1	0,567544	6,17812
10	56,6853	57,77822	1	0,958273	8,80611
11	56,6399	57,64521	1	0,99665	6,31328
12	56,64193	57,86174	1	0,975066	7,00543
13	56,62688	57,71103	1	0,882089	8,2295
14	56,44699	57,78909	1	0,954927	7,60384
15	56,43234	57,68323	1	0,546369	7,97335
16	56,52825	57,90018	1	0,63142	7,11334
17	56,57768	57,88917	1	0,806817	6,758
18	56,7397	57,84139	1	0,481076	7,71284
19	56,70863	57,82151	1	0,781503	8,52598
20	56,63724	57,84757	1	0,924255	7,73355

У табл.4 показано фрагмент даних, що були отримані зі допомогою макета, при цьому було проведено невелике зміщення лазерної плями для того, що перевірити реакцію системи. Для цього лазерний модуль було закріплено на пружній підставці. Також було використано лазер малої потужності, тому що більш потужний лазер міг пошкодити матрицю звичайної камери.

Таблиця 5. Порівняльна характеристика затраченої потужності

Платформа	Середня швидкість обчислення, мс	Середня потужність, Вт	Продуктивність, кадрів/вт
Персональний комп'ютер (AMD Athlon X4 640)	45	36	0,62
EP4CE22F17C6N	7	2,5	57

У табл.5 порівняно характеристики середньої потужності, що була використана для обчислення за допомогою ПЛІС і комп'ютера. Однак варто зауважити, що комп'ютер може мати значну перевагу перед ПЛІС при використанні графічного адаптера [16].

Але для таких невеликих зображень його використання є недоцільним, тому що на передачу даних у графічний процесор йде більше часу, ніж займає сама обробка. До того ж графічний процесор має значні витрати потужності, що може перевищувати витрати самого центрального процесора. Тому використання центрального процесора для порівняння є більш доцільним.

Для порівняння було використано комп'ютер з центральним процесором AMD Athlon II x4 640 (4 ядра, 3 ГГц). Було виміряно різницю між споживання комп'ютера при проведенні обчислень координат і паралельно-ієрархічного перетворенні і споживання при роботі у звичайному режимі. При використанні ПЛІС було проведено виміри потужності плати DE0-Nano при основній тактовій частоті 100 МГц.

Тому з фізичного моделювання можна побачити, що звичайний комп'ютер не доцільно використовувати для обробки у реальному часі, тому що середній час обробки зображень більший ніж час надходження кадрів з камери зі швидкістю 25 кадрів/с. Тому час обробки одного зображення не може бути більшим ніж 40мс. Також центральний процесор споживає багато енергії у порівнянні з ПЛІС у 14.4 раз.

Отже використання ПЛІС є набагато вигіднішим для застосування у вбудованих системах.

Висновки. У статті розглянуто сучасні проблеми обробки зображень лазерних трас. Було проведено аналіз існуючих методів та останніх досліджень у сфері обробки зображень лазерних трас. При аналізі було визначено, що сучасні рішення мають ряд недоліків в умовах збільшення швидкості і щільності потоку.

У роботі було представлено спосіб обробки зображень лазерних трас із застосуванням ПЛІС та паралельно-ієрархічного перетворення. Представлено імітаційне моделювання методів обробки координат плям лазерних пучків та наведено його результати.

Також у статті показано порівняння результатів обробки зображень за допомогою персонального комп'ютера та за допомогою ПЛІС. В результаті порівняння видно, що застосування ПЛІС для обробки зображень лазерних трас є ефективнішим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Наконечна С. В. Оброблення зображень плям лазерних пучків із застосуванням паралельно-ієрархічних мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : 05.13.23 : захист 26.12.2014 / наук. кер. Л. І. Тимченко. Львів, 2014. 27 с.
2. Saldaña-Heredia A., Márquez-Aguilar P., Lara A., Molina-Ocampo A. Digital Image Processing Applied to Optical Measurements. London. 2020. P. 29-44. DOI: 10.5772/intechopen.88704
3. Timchenko L, Pijarski P., Zavadskiy V. Processing laser beam spot images using the parallel-hierarchical network for classification and forecasting their energy center coordinates // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2016. DOI: 10.1117/12.2248878
4. Степанюк Д. С. Метод прогнозування показників біомедичних зображень з використанням паралельно-ієрархічної мережі // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2018. № 1. С. 101-105. DOI: 10.31474/1996-1588-2018-1-26-101-105
5. Метод класифікації зображень плям лазерних пучків із застосуванням паралельно-ієрархічної мережі із підвищеною точністю / Л. І. Тимченко та ін. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2014. № 1. С. 5-17.
6. Метод вимірювання координат енергетичного центру зображень протяжних лазерних трас / Л. І. Тимченко та ін. // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія : Транспортні системи і технології. 2017. Вип. 31. С. 202-211.
7. Modified method of parallel-hierarchical network teaching based on population Coding / Timchenko L. and etc. // Information Technology in Medical Diagnostics, CHAPTER – 3. Netherlands. 2017 P. 49-63
8. Тимченко Л. І., Наконечна С. В. Оброблення зображень плям лазерних пучків із застосуванням паралельно-ієрархічних мереж // ScienceRise. - 2014. - № 3(2). - С. 40-49. DOI: 10.15587/2313-8416.2014.27537

9. Development of a method of processing images of laser beam bands with the use of parallel hierarchic networks / Tymchenko L. and etc. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2019. №6/9(102). P. 21-27. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.188568
10. Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric phase masks using a spatial light modulator / Kuang Z. and etc. London. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.02.004>
11. Dynamic beam shaping with polarization control at the image plane for material processing / Tang Y. and etc. Liverpool. 2018. P. 581 – 584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.083>
12. Processing laser beam images using parallel-hierarchical FPGA-based transformations. / Timchenko L. and etc. // Information Technology in Medical Diagnostics, CHAPTER – 7. Netherlands. 2017. P. 129-145.
13. Method of indicators forecasting of biomedical images using a parallel-hierarchical network / Timchenko L. and etc. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2019. DOI: 10.1117/12.2536808
14. Timchenko L., Wójcik W., Kokriatskaia N. Architecture of the parallel hierarchical network for fast image recognition // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2016. DOI: 10.1117/12.2249340
15. Precision measurement of coordinates of power center of extended laser path images. / Timchenko L. and etc. Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. 2018. DOI: 10.1117/12.2501628
16. Parallel-hierarchical processing and classification of laser beam profile images based on the GPU-oriented architecture / Yarovyi A. and etc. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. 2017. DOI: 10.1117/12.2280975

REFERENCES

1. Nakonechna S. (2014). Obroblennya zobrazen' plyam lazernih puchkiv iz zastosuvannyam paralel'no-ierarhichnih merezh [Image processing of laser beam spots using parallel-hierarchical networks] *Extended abstract of candidate's thesis*. Lviv [in Ukrainian].
2. Saldaña-Heredia A., Márquez-Aguilar P., Lara A., Molina-Ocampo A. (2020). Digital Image Processing Applied to Optical Measurements. London. DOI: 10.5772/intechopen.88704
3. Timchenko L., Pijarski P., Zavadskiy V. (2016). Processing laser beam spot images using the parallel-hierarchical network for classification and forecasting their energy center coordinates. DOI: 10.1117/12.2248878
4. Stepaniuk D. (2018). Metod prognozuvannya pokaznikiv biomedichnih zobrazen' z vikoristannyam paralel'no-ierarhichnoï merezhi [Method of forecasting indicators of biomedical images using a parallel-hierarchical network]. Donetsk [in Ukrainian]. DOI: 10.31474/1996-1588-2018-1-26-101-105
5. Timchenko L., Kokryatska N., Babiuk N. (2014). Metod klasifikacii zobrazen' plyam lazernih puchkiv iz zastosuvannyam paralel'no-ierarhichnoï merezhi iz pidvishchenoyu tochnistyu [The method of classification of images of spots of laser beams with use of a parallel-hierarchical network with the increased accuracy]. [in Ukrainian].
6. Timchenko L., Hertsii O., Kokryatska N., Halushko M. (2017). Metod vimiryuvannya koordinat energetichnogo centru zobrazen' protyazhnyh lazernih tras [Method of measuring the coordinates of the energy center of images of long laser paths]. Kyiv [in Ukrainian].
7. Timchenko L., Zlepko M. (2017). Modified method of parallel-hierarchical network teaching based on population Coding. Netherlands.
8. Timchenko L., Nakonechna S. (2014). Obroblennya zobrazen' plyam lazernih puchkiv iz zastosuvannyam paralel'no-ierarhichnih merezh [Image processing of laser beam spots using parallel-hierarchical networks]. [in Ukrainian]. DOI: 10.15587/2313-8416.2014.27537
9. Tymchenko L., Tverdome V., Petrovsky N., Kokryatska N., Maistrenko Y. (2019). Development of a method of processing images of laser beam bands with the use of parallel hierarchic networks. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.188568
10. Kuang Z., Li J., Edwardson S., Walter P., Liu D., Dearden G. (2015). Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric phase masks using a spatial light modulator. London. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.02.004>
11. Tang Y. Li J. Zhou T. Schille J. (2018). Dynamic beam shaping with polarization control at the image plane for material processing. Liverpool. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.083>
12. Timchenko L., Petrovskiy N., Kokryatskaya N., Yarovyi A. (2017). Processing laser beam images using parallel-hierarchical FPGA-based transformations. Netherlands.
13. Timchenko L., Kokriatskaia N., Pavlov V, Dzierzak R., Amirgaliyeva S. (2019). Method of indicators forecasting of biomedical images using a parallel-hierarchical. DOI: 10.1117/12.2536808
14. Timchenko L, Wójcik W, Kokriatskaia N. (2016). Architecture of the parallel hierarchical network for fast image. DOI: 10.1117/12.2249340
15. Timchenko L., Pavlov S., Kokriatskaia N., Gertsij O., Stepaniuk D., Babiuk N., Kashaganova G., Harasim D. (2018). Precision measurement of coordinates of power center of extended laser path. DOI: 10.1117/12.2501628
16. Yarovyi A., Timchenko L., Kozhemiako V., Kokriatskaia N. (2017). Parallel-hierarchical processing and classification of laser beam profile images based on the GPU-oriented architecture. DOI: 10.1117/12.2280975

Leonid Tymchenko¹, Kokriatska Natalia², Dmytro Zhuk³, Kaplun Valentyna⁴

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Telecommunication Technologies and Automation, State University of Infrastructure and Technology, Ukraine

² Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Telecommunication Technologies and Automation, State University of Infrastructure and Technology, Ukraine

³ Graduate student of the Department of Telecommunication Technologies and Automation, State University of Infrastructure and Technology, Ukraine

⁴ Senior Lecturer of the Department of Information Protection, Vinnytsia National Technical University, Ukraine

FPGA USAGE FOR PROCESSING IMAGE OF LASER BEAM

Considered modern problems of laser image processing. An analysis of existing solutions and recent research in the field of image processing of laser beam. Determined that the latter solutions have a number of disadvantages in terms of increasing the speed and density of information flow. There are also problems with excessive power consumption during image processing due to excess power.

Also presented method of processing image of laser beam with the use of FPGA and parallel-hierarchical transformation. Performing simulation modeling of methods for processing the coordinates of laser beam spots and its results are presented.

Presented comparison of the results of image processing using a personal computer and using FPGA.

The obtained results allow to evaluate the efficiency of FPGA application and methods with the use of parallel-hierarchical transformation during image processing of laser beams.

Due to low power consumption and efficient image processing using FPGA and parallel-hierarchical transformation - this technology has great prospects for use in the automotive industry. It can be used to improve the development of unmanned vehicle control, especially for electric vehicles.

Keywords: *parallel-hierarchical transformations, FPGA, image processing, laser beams, laser spots.*

УДК 658.012:681.32

Леонід Тимченко¹, Наталія Кокряцька², Андрій Тихонов³, Надія Дубова⁴

¹ Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікаційних технологій та автоматики, Державний університет інфраструктури та технологій, Україна. ORCID: 0000-0003-0090-3886

² Кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних технологій та автоматики, Державний університет інфраструктури та технологій, Україна. ORCID: 0000-0001-9813-1399

³ Аспірант кафедри телекомунікаційних технологій та автоматики, Державний університет інфраструктури та технологій, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9078-2410>

⁴ Старший викладач кафедри вищої математики, Вінницький національний технічний університет, Україна. ORCID: 0000-0002-3039-6902

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

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПАРАЛЕЛЬНО-ІЄРАРХІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті розглянуто проблеми сучасних моделей та методів розпізнавання інформації та зображень, проведена аналогія навчання паралельно-ієрархічних мереж з RBF мережами. У ході аналізу було визначено, що обробка зображень за допомогою маскового методу не використовує всі потужності багатоядерних систем. Проведено аналіз паралельно-ієрархічного перетворення та оброблення зображень. Проведено аналіз математичної моделі паралельно-ієрархічного перетворення для підвищення швидкості за допомогою паралельного перетворення. Було проведено моделювання алгоритму використовуючи мову С#, для тесту були використані штучно створені зображення за допомогою ГВЧ. Моделювати проведено для повного перетворення ПІ, результати моделювання відображені у таблицях. Паралельно-ієрархічне перетворення для оброблення зображень має великий потенціал у транспортних системах, його можна використовувати у задачах де необхідно проводити швидкий аналіз зображень з камери, наприклад, наявність перешкод на траєкторії руху транспорту та уникання зіткнення, аналіз наявності пошкодження асфальту на траєкторії руху та регулювання підвіски для нівелювання ефекту. Отримані результати у процесі моделювання дозволяють зробити висновок щодо швидкодії паралельно-ієрархічного перетворення у задачах оброблення зображень.

Ключові слова: паралельно-ієрархічне перетворення, оброблення зображень, паралельно-ієрархічні мережі.

Вступ. З проведених досліджень [1] з використанням маскового методу розпізнавання інформації для задач швидкого розпізнавання зображень, виникає потреба у вдосконаленні математичної моделі паралельно-ієрархічного перетворення.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Відомо, що навчальне завдання ПІ мережі, що навчається за аналогією з RBF [2] мережах практично зводиться до ідеї контрольованого навчання елементів вихідного рівня мережі [3]. Використовуючи загальну ідею структурної організації штучних нейронних мереж за схемою: вхідний шар → прихований шар → вихідний шар [4], можна синтезувати ПІ мережу, у якій як вхідний рівень використовують перший рівень мережі, як прихований шар використовувати рівні –

$2, k$, де k – кількість рівнів прихованого шару, а як джерело – вихідний шар, який традиційно використовується в штучних нейронних мережах [5].

Мета і завдання дослідження. Прискорити розпізнавання зображення за допомогою використання паралельно ієрархічної обробки даних.

Матеріали та методи дослідження: Дослідження математичних моделей паралельно-ієрархічного перетворення для ефективного обробки зображень.

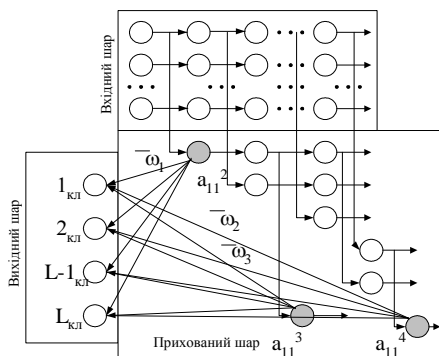


Рис. 1. Тришарова структура ПН мережі

На рис. 1. подано організаційну структуру багатшарової ПН мережі. Кількість елементів прихованого шару можна визначити за довжиною мережевого алгоритму і тим самим формалізувати процедуру обчислення кількості елементів прихованого шару [6]. Середні значення ваг $\overline{w}_1 \div \overline{w}_{k-1}$ визначаються за формулою:

$$\overline{w}_t = \frac{\sum_{p=1}^N w_t^{(p)}}{N}, \quad t = \overline{1, k-1}, \quad (1)$$

де N – розмірність навчальної вибірки P .

На основі аналізу розвитку паралельно-ієрархічного перетворення для швидкого розпізнавання інформації [7], ми складаємо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів налаштування $w_1 \div w_{k-1}$ у формі.

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{\sum_{i=2}^k a_{i1}^1}{(a_{11}^2 + \sum_i a_i^2)}, \\ w_2 &= \frac{\sum_{i=2}^k a_{i1}^1}{(a_{11}^3 + \sum_i a_i^3)} - \frac{w_1 a_{11}^2}{(a_{11}^3 + \sum_i a_i^3)}, \\ &\dots\dots\dots \\ w_{k-2} &= \frac{\sum_{i=2}^k a_{i1}^1}{(a_{11}^{k-1} + \sum_i a_i^{k-1})} - \frac{w_1 a_{11}^2 + w_2 a_{11}^3 + \dots + w_{k-3} a_{11}^{k-2}}{(a_{11}^{k-1} + \sum_i a_i^{k-1})}, \\ w_{k-1} &= \frac{\sum_{i=2}^k a_{i1}^1}{(a_{11}^k + \sum_i a_i^k)} - \frac{w_1 a_{11}^2 + w_2 a_{11}^3 + \dots + w_{k-2} a_{11}^{k-1}}{(a_{11}^k + \sum_i a_i^k)}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\sum_{t=2}^k a_{11}^t$ – еталонні компоненти кадру протяжної траси, який розпізнається;

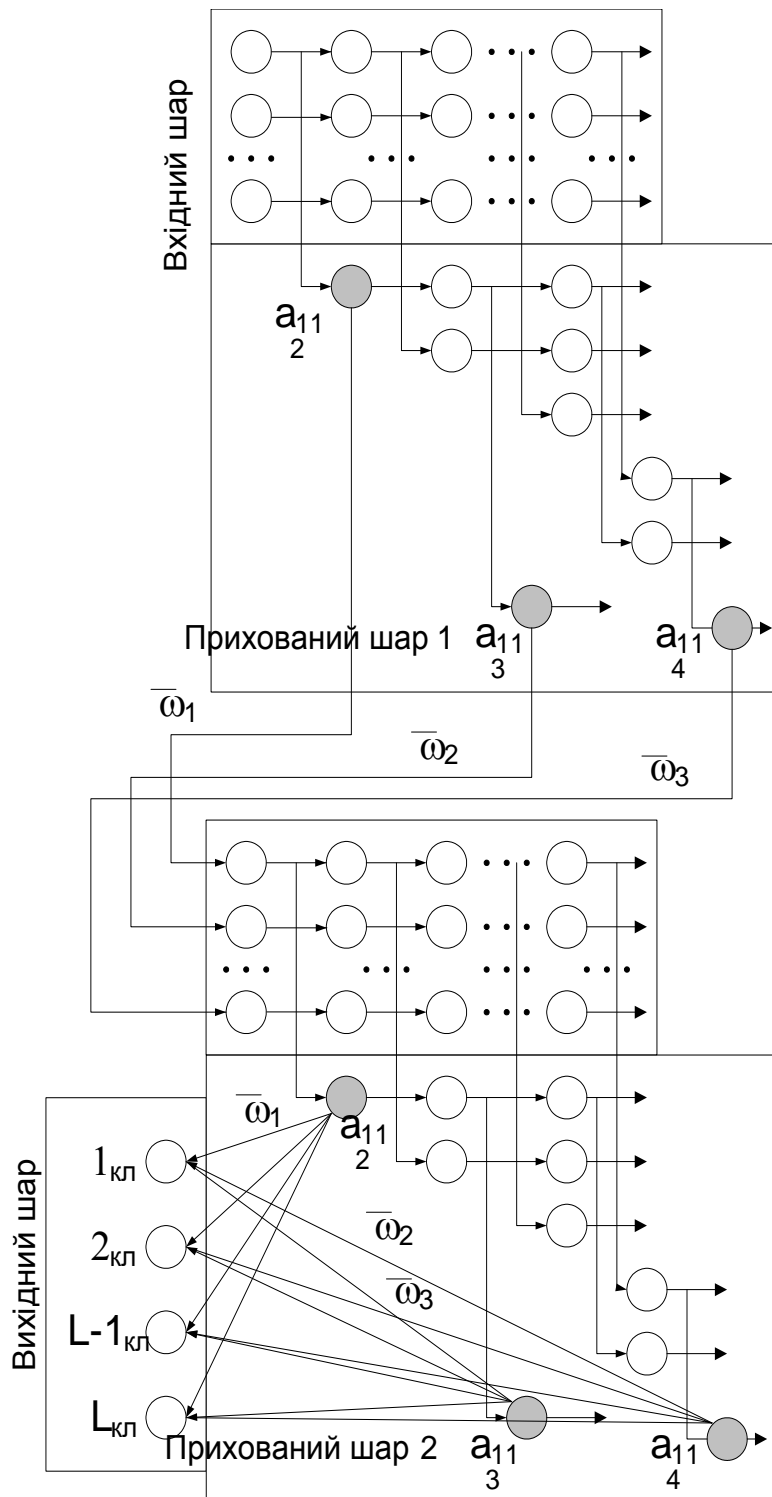


Рис. 2. Структура багатoshарової ПП мережі

$\sum_i a_i^k$, $a_{11}^2 \div a_{11}^k$ – поточні компоненти кадру розпізнавання траси.

Після знаходження значень $w_1 \div w_{k-1}$ формуємо рівняння нормування:

$$d = \frac{\overline{w_1} a_{11}^2}{\sum_{t=2}^k a_{11}^t} + \frac{\overline{w_2} a_{11}^3}{\sum_{t=2}^k a_{11}^t} + \dots + \frac{\overline{w_{k-2}} a_{11}^{k-1}}{\sum_{t=2}^k a_{11}^t} + \frac{\overline{w_{k-1}} a_{11}^k}{\sum_{t=2}^k a_{11}^t} = \frac{\sum_{t=2}^k \overline{w_{t-1}} a_{11}^t}{\sum_{t=2}^k a_{11}^t}. \quad (3)$$

Для нормалізації результатів роботи ПІ мережі з коригувальними коефіцієнтами, ми використовуємо основну властивість мережі – $\sum_{t=2}^k a_{11}^t = \sum_i a_i$ [8].

Тоді правою частиною нормуючого рівняння є відношення суми добутоків середніх значень коефіцієнтів коригування та кінцевих елементів до суми кінцевих елементів мережі.

При правильному розпізнаванні зображень дається нормоване вимірювання $d \rightarrow 1$. Ступінь близькості одиниці є мірою схожості розпізнаних зображень [9].

Використовуючи рівняння нормування, в якому $\overline{w_1} = \overline{w_2} = \dots = \overline{w_{k-2}} = \overline{w_{k-1}} = 1$ можна просто виконати попередню процедуру класифікації зображень, а потім відповідно до системи сформувані коефіцієнти коригування $\overline{w_1} \div \overline{w_{k-1}}$, виконуючи тим самим процедуру визначення ваг для кожного класу.

Зокрема, якщо ми проводимо класифікацію в режимі реального часу та аналізуємо сусідні кадри, рівняння нормування набуває вигляду:

$$d = \frac{(a_{11}^2)^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j} + \frac{(a_{11}^3)^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j} + \dots + \frac{(a_{11}^{k-1})^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j} + \frac{(a_{11}^k)^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j}, \quad (4)$$

де $\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j$ – сума $k-1$ хвостових елементів,

j – номер кадру, $j = \overline{1, m-1}$,

$(a_{11}^2)^{j+1} \div (a_{11}^k)^{j+1}$ – значення хвостових елементів зображень відповідно попереднього (j - го) і наступного ($j+1$ -го) кадрів.

Враховуючи вищезазначену властивість ПІ мережі [10], рівняння нормування (3) набуває вигляду:

$$d = \frac{(a_1)^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j} + \frac{(a_2)^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j} + \dots + \frac{(a_{N-1})^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j} + \frac{(a_N)^{j+1}}{\left(\sum_{t=2}^k a_{11}^t\right)^j}. \quad (5)$$

Оскільки при обчисленні виразу не потрібно визначати кінцеві елементи $(a_{11}^2)^{j+1} \div (a_{11}^k)^{j+1}$ при обробці $j+1$ -го кадру, то при нормалізації результатів

оброблення вхідних даних $(a_1 \div a_N)$ час процедури розпізнавання значно скорочується. У порівнянні з відомими структурами нейронних мереж [11], в яких для процедури розпізнавання у вихідному шарі $J+1$ -го кадру неможливо використовувати вхідні дані J -го кадру.

Для здійснення паралельно-ієрархічного перетворення для швидкого розпізнавання зображень прийнятним є вибір з доступної цифрової інформації середнього значення \bar{a}_i з округленням до найближчого цілого та подальшим формування двох взаємопов'язаних ПІ мереж для оброблення від'ємних різницевоїх компонентів [12]. У цьому випадку для кожної з цих ПІ мереж можна скласти систему рівнянь, коренями якого для всіх рівнів, крім першого, є парами коефіцієнтів регулювання форми:

для позитивних різницевоїх компонентів – $(W_1^{(+)} \div W_{k-1}^{(+)})$,

для негативних різницевоїх компонентів – $(W_1^{(-)} \div W_{k-1}^{(-)})$.

У цьому випадку для першого рівня ПІ мережі обчислюється лише коефіцієнт коригування $W_1^{(+)}$, оскільки є лише позитивні різницевої складові.

При обробленні послідовності зображень найкраще використовувати рівняння нормування для двох сусідніх кадрів зображень [13], на першому зображенні вказана ціна як еталон. Тоді рівняння нормування набуває вигляду:

$$d = \frac{\bar{w}_1(a_{11}^2)^j}{\sum_{i=2}^k (a_{11}^i)^{j-1}} + \frac{\bar{w}_2(a_{11}^3)^j}{\sum_{i=2}^k (a_{11}^i)^{j-1}} + \dots + \frac{\bar{w}_{k-1}(a_{11}^{k-1})^j}{\sum_{i=2}^k (a_{11}^i)^{j-1}} + \frac{\bar{w}_k(a_{11}^k)^j}{\sum_{i=2}^k (a_{11}^i)^{j-1}} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{w}_i(a_{11}^i)^j}{\sum_{i=2}^k (a_{11}^i)^{j-1}}, \quad (6)$$

де $\bar{w}_1 \div \bar{w}_k$ – коефіцієнти регулювання, що отримані під час попередньої обробки на перших зображеннях набору;

$(a_{11}^i)^j, (a_{11}^i)^{j-1}$ – хвостові елементи відповідно поточного і попередніх зображень.

Зазвичай при обробці послідовності зображень необхідно виявляти неспотворені зображення та виключати їх з аналізу траси [14]. Для цього необхідно вдосконалення математичної моделі. Оскільки нормований критерій можна знайти як для одного кадру траси, так і для усієї траси в цілому, формуємо множину A коефіцієнтів d_i :

$$A = (d_1, d_2, \dots, d_N), \quad (7)$$

де N – кількість зображень.

Оскільки d є мірою відповідності між параметрами еталонної ПІ мережі та параметрами поточної мережі [15], тому i -ті елементи множини, які мають низьке значення, можна класифікувати як спотворені зображення:

$$(a_{i,j}^{k(\dots)})_e \cap (a_{i,j}^{k(\dots)})_n = \begin{cases} \text{зображення неспотворене, якщо } d_i \geq \chi, \\ \text{зображення спотворене, в іншому випадку} \end{cases}, \quad (8)$$

де χ – пороговий критерій.

Оскільки $0 \leq d \leq 1$, то $0 \leq \chi \leq 1$.

Для якісної класифікації та розпізнавання послідовності зображень даний пороговий критерій може бути використаний у «жорстких» рамках:

$$0,8 \leq \chi \leq 1 \quad (9)$$

Для зображень у яких є значні спотворення внаслідок, рекомендуємо встановлювати менш жорсткі рамки порогового значення:

$$0,4 \leq \chi \leq 1 \quad (10)$$

Створення апаратних обчислювальних засобів для реалізації певних методів не завжди є простим завданням. Більш того, навіть відомі методи або алгоритми, які вже мають паралельність в математичних операціях, все одно вимагають додаткового аналізу, або повної зміни порядку розрахунків. Більш точна класифікація вимагає використання більш складних алгоритмів, вона використовує методи, які адаптуються до стану каналу. Для реалізації цього кроку можна використовувати паралельно-ієрархічні мережі, які мають властивість адаптивності при збереженні простого математичного апарату, що є вигідним при обробці зображень.

Для оцінки алгоритмів перетворення G моделювання проводили на комп'ютері у середовищі Visual Studio на мові програмування C#. В якості тесту були використані штучно створені зображення за допомогою ГВЧ. Глибина кольору зображень – сірий 8 біт. Слід також зазначити, що ці зображення є одними з найскладніших в обробці. Фактичні зображення, як правило, більш взаємопов'язані та обробляють набагато менше часу.

Моделювання проводили для повного перетворення П, оскільки оператори S і T залежать від результатів G перетворення, отже загальні витрати ресурсів на алгоритм корелюють із витратами на G перетворення.

Нехай є S ($S = 1, 2, 3 \dots$) набори непустих елементів, що визначають інформацію. Кількість елементів у множині називається її довжиною (позначення L_μ - довжина множини μ). Кількість різних елементів множини називається розмірністю цієї множини (позначення R_μ).

Математична модель паралельного розкладу множини $\mu = \{a_i\}, i = \overline{1, n}$ представлена такою моделлю:

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^R \left(n - \sum_{k=0}^{j-1} n_k \right) (a^j - a^{j-1}), \quad (11)$$

де $a_i \neq 0$, R – розмірність цієї множини.

Розглянемо детально алгоритм формули 11, який працює таким чином:

1. Знаходимо ненульовий елемент з найменшим значенням – a_{\min} .
2. Підраховуємо кількість не нульових елементів у рядку N .
3. Знаходимо перший елемент множини μ за формулою $a_{\min} \times N$.
4. Віднімаємо значення a_{\min} з кожного ненульового елемента рядка, утворюючи новий рядок.
5. Повторюємо операції 1-4 поки всі елементи вхідного рядка не стануть рівними 0.
6. На виході отримуємо набір μ , який передається на наступний рівень.

У табл. 1 представлені середні результати моделювання для матриць різних вимірів.

До переваг цього методу належать:

- роботу тільки з додатними числами;

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

– розмірність максимального значення, що не перевищує 2 байти.

До недоліків можна віднести необхідність пошуку кожного рядка щоб знайти найменше число, або його початкове сортування від найбільшого до найменшого.

Таблиця 1. Характеристика перетворення III з використанням мінімального елемента у операторі G

Параметр	Матриця				
	4×4	16×16	64×64	128×128	256×256
Кількість рівнів	15	144	578	1150	2140
Максимальна кількість рядків	6	56	253	512	964
Максимальна кількість стовпчиків	10	110	504	1022	1926
Максимальне значення	44	1680	4032	16000	64512
Час виконання (мс)	41	189	4710	36000	251000

Одним із випадків такого перетворення є G перетворення за першим елементом, наведемо його алгоритм:

1. Беремо перший ненульовий елемент – a_f .
2. Підраховуємо кількість ненульових елементів у рядку N.
3. Знаходимо перший елемент множини μ за формулою $a_f \times N$;
4. Віднімаємо від кожного ненульового елемента рядка a_f , утворюючи новий рядок.
5. Повторюємо кроки 1-4, поки всі елементи вхідного рядка не стануть рівні 0.
6. На виході отримуємо набір μ , що передається на наступний рівень.

У таблиці 2 наведено результати моделювання для матриць різних розмірів.

До переваг цього типу перетворення G можна віднести відсутність пошуку найменшого елемента (а отже повного перебору рядка).

А недоліками є необхідність роботи з від'ємними числами, а також значне збільшення розмірності операндів.

Таблиця 2. Характеристика перетворення III з використанням першого елемента у операторі G

Параметр	Матриця				
	4×4	16×16	64×64	128×128	256×256
Кількість рівнів	16	245	679	1364	2730
Максимальна кількість рядків	7	83	214	428	855
Максимальна кількість стовпчиків	12	164	442	886	1775
Максимальне значення	102	2,43E+04	5,92E+09	1,64E+12	2,01E+13
Мінімальне значення	0	-3,33E+04	-8,13E+09	-1,15E+12	-2,21E+13
Час виконання (мс)	24	267	969	60520	415820

Висновки. До переваг вибору елемента за середнім значенням належить висока швидкість, а мінуси – необхідність роботи з числами з плаваючою комою.

Перетворення G з вибором будь-якого елемента алгоритмічно простіше, але вимагає роботи з досить великими числами, а також здійснення роботи з від'ємними числами. Перетворення в G з вибором середнього арифметичного в якості початкового значення має просту алгоритмічну структуру і достатньо швидке, але для його роботи необхідні модулі для обчислення чисел з плаваючою комою.

Паралельно-ієрархічна обробка зображень є дуже актуальним завданням у сучасному світі. Наразі комп'ютерні процесори розвиваються у напрямку паралельної обробки даних і послідовні методи стають занадто повільними. Розглянута математична модель паралельно-ієрархічної обробки зображень показує потенціал для багатоядерного аналізу зображень, що, потенційно дає приріст у порівнянні з послідовним аналізом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимченко Л.И. Многоэтапная параллельно-иерархическая сеть как модель нейроподобной схемы вычислений. // Кибернетика и системный анализ. 2000. № 2. С. 114-134.
2. Тимченко Л.И. Конвергентні та дивергентні процеси в реальних та штучних нейронних мережах. // Вісник ВПІ. 1997. № 1. С. 5-10.
3. Тимченко Л.И., Мельников В.В., Кокряцкая Н.И. Метод параллельно-иерархического распознавания изображений. // Искусственный интеллект. 2009. №10. С. 606-616.
4. Хинтон Д.Е. Как обучаются нейронные сети. // В мире науки. 1992. №11. С. 103-110.
5. Сегментація напівтонових зображень за ознакою зв'язаності : монографія / Железняк А.Л. та ін. Київ. : ДЕТУТ, 2008. С. 144.
6. Тимченко Л.И. Система координатной привязки для нестационарных сигналов. // Известия РАН. 2001. №6. С. 886-890.
7. Кожем'яко В.П., Тимченко Л.И., Кутаев Ю.Ф. Основы теории пирамидально-сѣтвого перетворення зображень. // УМК ВО. 1992. №3. С. 272.
8. Рабинович З.Л. Представление и обработка знаний во взаимодействии сенсорной и языковой нейросистем человека. // Кибернетика и системный анализ. 1998. №2. С. 3-11.
9. Паралельно-ієрархічне перетворення і Q-обробка інформації для систем реального часу : монографія / Ковзель М.О. та ін. Київ. : КУЕТТ, 2006. С. 492.
10. Тимченко Л.И. Компактний опис моделей зображень для класифікації образів. // Вісник ВПІ. 1998. № 2. С. 72-83.
11. Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера : монографія / Кожем'яко В.П. та ін. Вінниця. : Універсум, 2005. С. 161.
12. Степанюк Д. С. Метод прогнозування показників біомедичних зображень з використанням паралельно-ієрархічної мережі. // Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2018. №6. С. 300-313.
13. Timchenko L.I. A Brain-Like Approach to Multistage Hierarchical Image. // Image Analysis and Processing. 1997. №2. С. 246-253.
14. Aggarwal J.K. Object recognition and performance bounds. // Image Analysis and Processing. 1997. №1. 343-360.
15. Оброблення зображень на основі методів контурного препарування : монографія / Л.І. Тимченко Л.І. та ін. Київ : Альтерпрес, 2019, С. 166.

REFERENCES

1. Timchenko L.I. (2000). *Mногоэтапная параллельно-иерархическая сеть как модель нейроподобной схемы вычислений* [Multistage parallel-hierarchical network as a model of a neural-like computation scheme]. *Kybernetika i sistemnyy analiz - Cybernetics and Systems Analysis*, 2, 114-134 [in Russian].
2. Timchenko L.I. (1997). *Kонвергентні та дивергентні процеси в реальних та штучних нейронних мережах* [Convergent and divergent processes in real and artificial neural networks]. *Visnik VPI - Bulletin of VPI*. 1, 5-10 [in Ukrainian].
3. Timchenko L.I., Melnikov V.V., Kokryatskaya N.I. (2009). *Метод параллельно-иерархического распознавания изображений* [The method of parallel-hierarchical image recognition]. *Iskusstvennyy intellekt - Artificial intelligence*. 10, 606-616 [in Ukrainian].
4. Hinton D.E. (1992). *Kак обучаются нейронные сети* [How neural networks are trained]. *V mire nauki - In the world of science*. 11, 103-110. [in Russian].
5. ZHeleznyak A.L., Timchenko L.I., Stasyuk O.I. (2008). *Сегментация напівтонових зображень за ознакою зв'язаності* [Segmentation of virtual images by familiarity]. *Kiev: DETUT* [in Ukrainian].

6. Timchenko L.I. (2001). Sistema koordinatnoj privyazki dlya nestacionarnykh signalov [Gridding system for non-stationary signals]. Izvestiya RAN - Izvestia RAN. 6, 886-890. [in Russian].
7. Kozhemyako V.P., Timchenko L.I., Kutaev Y.F. (1994). Osnovi teorii piramidal'no-sit'ovogo peretvorenniya zobrazen' [Fundamentals of the theory of pyramidal-network image transformation]. UMK VO - UMK VO. 3, 272. [in Russian].
8. Rabinovich Z.L. (1998). Predstavlenie i obrabotka znaniy vo vzaimodejstvii sensornoj i yazykovoj nejrosistem cheloveka [Representation and processing of knowledge in the interaction of human sensory and linguistic neurosystems]. Kibernetika i sistemnyj analiz - Cybernetics and Systems Analysis. 2, 3-11 [in Russian].
9. Kovzel M.O., Timchenko L.I., Kutaev Y.F. (2006). Paralel'no-ierarhichne peretvorenniya i Q-obrobka informacii dlya sistem real'nogo chasu [Parallel-hierarchical transformation and Q-processing of information for real-time systems]. Kiev: KUETT [in Ukrainian].
10. Timchenko L.I. (1998). Kompaktnij opis modelej zobrazen' dlya klasifikacii obraziv [Kompaktnij opis modelej zobrazen' dlya klasifikacii obraziv]. Visnik VPI - Bulletin of VPI. 2, 72-83 [in Ukrainian].
11. Kozhemyako V.P., Timchenko L.I., Yarovy A.A. (2005). Paralel'no-ierarhichni merezhi yak strukturno-funkcional'nij bazis dlya pobudovi specializovanih modelej obraznogo komp'yutera [Parallel-hierarchical networks as a structural and functional basis for building specialized models of image computer]. Vinnitsa: Universum [in Ukrainian].
12. Stepanyuk D.S. (2018). Metod prognozuvannya pokaznikov biomedichnih zobrazen' z vikoristannyam paralel'no-ierarhichnoi merezhi [Method of forecasting indicators of biomedical images using a parallel-hierarchical network]. Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika - Informatics, cybernetics and computer technology 6, 300-313 [in Ukrainian].
13. Timchenko L.I. (1997). A Brain-Like Approach to Multistage Hierarchical Image. Image Analysis and Processing. 2, 246-253.
14. Aggarwal J.K. (1997). Object recognition and performance bounds. Image Analysis and Processing. 1, 343-360.
15. Timchenko L.I., Kokryatska N.I., Hertius O.A., Galushko M.M. (2019). Obroblennya zobrazen' na osnovi metodiv konturnogo preparuvannya [Image processing based on contour preparation methods]. Kiev: Alterpress [in Ukrainian].

Leonid Tymchenko¹, Natalia Kokryatska², Andrii Tykhonov³, Nadiya Dubova⁴

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, Conqueror of the Department of Telecommunication Technologies and Automation, State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine

² Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Telecommunication Technologies and Automation, State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine

³ Postgraduate student of the Department of Telecommunication Technologies and Automation, State University of Infrastructure and Technologies, Ukraine

⁴ Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, Ukraine

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF PARALLEL-HIERARCHICAL TRANSFORMATION FOR EFFICIENT IMAGE PROCESSING

This article considers the problems of modern models and methods of recognition of information and images, the analogy of learning parallel-hierarchical networks with RBF networks. During the analysis, it was determined that image processing using the mask method does not use all the power of multi-core systems. The analysis of parallel-hierarchical transformation and image processing is carried out. The analysis of the mathematical model of parallel-hierarchical transformation for speed increase by means of parallel transformation is carried out. The algorithm was simulated using the C# language, and artificially created images using microwave were used for the test. The simulation was performed for complete PI conversion, the simulation results are shown in the tables. Parallel-hierarchical transformation for image processing has great potential in transport systems, it can be used in tasks where it is necessary to quickly analyze images from the camera, such as the presence of obstacles in the trajectory of traffic and collision avoidance, analysis of asphalt damage on the trajectory and suspension adjustment to level the effect. The results obtained in the modeling process allow us to conclude that the speed of parallel-hierarchical transformation in image processing problems.

Keywords: parallel - hierarchical transformations, image processing, parallel-hierarchical networks.

Pavol Kurdel¹*, Jaroslav Zaremba², Lukáš Korba³

¹Associate Professor of the Avionics Department, Technical University of Košice, Letná 1/9, Košice, 04001, Slovakia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5971-6367>

²PhD student of the University of Security Management in Košice, Koš'ova 2373/1, 04001 Košice, Slovakia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9593-1999>

³PhD student of the Avionics department, Technical University of Košice, Letná 1/9, Košice, 04001, Slovakia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-2300>

*Corresponding author: pavol.kurdel@tuke.sk

THE LEVEL OF DANGER IN CONTROLLED AIRPORT SECURITY

The functionality of the aircraft complex is determined by quality and safety. This is defined by the relationship between the entities airport – aircraft – airspace. Operational safe management and control at the airport is a directed action of independent factors. Their expression is embedded in the feeling of security and safety of each air traffic participant. Fulfilment of the ethical characteristics of security requires the implementation of management so that the control at the airport is carried out in the relevant security zone. Construction of a safe state can be achieved if the chosen method of safety experiments will faithfully reflect the real error in the control of air transport. The correctness of safety control procedures can be verified by simulation and models built on a physical basis. The motive of the article is to show one way of effective identification of errors in the management of security controls actors of air transport.

Keywords: airport, security, control system, probability, sensitivity, danger.

Introduction. Analysis of recent research and problem statement. The security experiment for airport control reflects in control experiments the content-accurate way of scientific examination of the objective fact about the findings of danger is a way of verifying the veracity of subjective (own) judgments about hypotheses and theories based on safety theory [1]. Instead of the term experimental verification is often used in theories of security and in determining the level limit control concept. The development and continuous improvement of airport control equipment are inconceivable without carefully carried out successful security controls. [2]. Such knowledge also increases the requirements for flight safety, which is a condition that is encoded in the reliable operation of airport control systems. This fact highlights the importance of understanding the hierarchy of safety [3]. When researching the security of airport complexes, security checks are performed, preceded by a control plan. The control plan assumes the airport security service to set the security level. The nature of the chosen control requires a specific form. The type of safety features must, of course, be assigned to the cognitive hazard detection method. The basic precondition for performing inspections is a set time, which with a certain probability determines the intensity of danger detection.

Materials and methods of research

The sequence of detection of dangers by control mechanisms. The process of finding hazards in the airport control process has a random character according to the sensitivity of

the control system, which can also be investigated by methods used in reliability theory. An example is the time of detection of danger, which is an analogy of the time of its detection.

The published article [4] showed the applicability of the mathematical apparatus for the readiness of the control safety system for the experiment to find the danger. The security control method at each security hierarchical level includes a number of specific additional sub-controls, the arrangement of which is presented in figure 1.

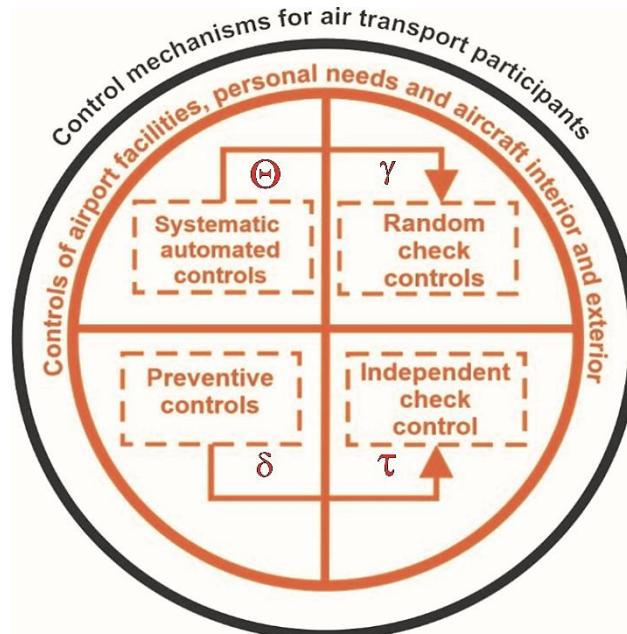


Fig. 1. Type hierarchy of airport security controls

When setting up a mathematical model of the correctness of security controls for hazard detection, we assume that all inspected parts of air traffic participants and objects are characterized by a certain possibility of how to detect (find) a potential danger. In general, however, this is not so clear-cut. The probability of turning safety into danger also depends on the sensitivity of safety control systems. Assume also that some controls are independent, i. they do not only depend on direct checks but also the periodic acquisition of information from other security systems (information service) [5].

To create a mathematical model for the identification of the hazards it is necessary to determine the probability of detection of danger. These controls can be expressed in the following forms: Θ ; γ ; δ ; τ ; on time interval $\tau \leq t \leq d\delta$. It is necessary to accept this condition at the specified interval in which we perform unit control of the j - type of security control. In the following, we will accept the fact that the danger has not been detected until now $t = \delta$. When checked is $\Theta_j(\delta) = \text{constant}$. Let us determine $P_j(t)$, i.e. the probability that the hazard was not detected even after the time t has elapsed, in time units of the airport security inspection process. From the above statements, it is possible to focus on the probability that the danger has not been detected even in time $t + dt$. Then the probability of finding a danger will be [6]:

$$P_j(t + dt) = P_j(t)[1 - \theta_j dt] \tag{1}$$

From equation (2) it is possible to write a differential equation for $P_j(t)$:

$$\frac{d}{dt} \ln P_j = -\theta_j \tag{2}$$

Equation (2) is a fundamental equation in describing the process of finding (detecting) a problem in the safety of aircraft systems.

Solution (2) for $P_j(t)$ It has the form:

$$P_j(t) = P_0 \exp[-\theta_j \cdot t] \quad (3)$$

where P_0 – is the probability of not detecting the dangerous at first j -th of control [1].

Let us now point out the complexity of performing the security control carried out on the air traffic participant. Several targeted security sub-checks will be used. Let these checks have durability t_j and be characterized by the intensity of the detection of the safety deviation θ . Also, assume that the number of unit checks contains a - combined security controls Θ ; γ ; δ ; τ see figure 1.

For such a case, fundamental equation (2) has notation [7]:

$$\frac{d}{dt} \ln P_j(t) = \begin{cases} -\theta_1, 0 \leq t \leq t_1 \\ -\theta_j, t_1 + \dots + t_{j-1} \leq t \leq t_1 + \dots + t_j \\ -\theta_k, t_1 + \dots + t_{k-1} \leq t \leq t_1 + \dots + t_k \end{cases} \quad (4)$$

The complete probability of finding a security problem during the security check is described by the equation:

$$P_j(t) = P_0 \exp\{-\theta_1 t_1 - \dots - \theta_k t_k\} \quad (5)$$

Let us denote the general control time of one air traffic participant with a safety system as:

$$\tau_e = t_1 + t_2 + \dots + t_k,$$

and relative time values for each j -type of a check (protected area, mode area, passenger check-in, etc.) as:

$$a_j = \frac{t_j}{\tau_e}, \quad (6)$$

In this case, it is possible to write (6) in the formula:

$$P_e(\tau_e) = P_0 \exp\{-(\theta_1 a_1 + \dots + \theta_j a_j + \dots + \theta_k a_k) \tau_e\} \quad (7)$$

or

$$P_e(\tau_e) = P_0 e^{-\theta_e \tau_e} \quad (8)$$

where

$$\theta_e = \theta_1 a_1 + \dots + \theta_j a_j + \dots + \theta_k a_k \quad (9)$$

In equations (8) and (9) it is possible to interpret the probability of security control of this type. This is done at a specified point in time during the entire security check.

Because a number of controls are performed at each security level at the airport, many security issues can arise. This is because they are intrusions into the security system. It is possible to reliably determine their detection intensity for each hierarchical security level. For this reason, in order to create a mathematical model for solving the area of probability finding of a potential degree of danger, it is generally possible to use a continuous model (10) written [9]:

$$P(t) = a + p \{-\theta_1 \tau_1 - \dots - \theta_i \tau_i - \dots - \theta_n \tau_n\} \quad (11)$$

where:

τ_i – the security check time is at the i - th security level

n – the number of checks in the hierarchy of danger.

Equation (11) allows us to write the probability of finding a dangerous at the i -th level of the check in the form:

$$P_i(t) = \exp\{-\theta_1 \tau_1 - \dots - \theta_i \tau_i\} \quad (12)$$

By comparing (11) and (12) at the i -th safety level, we obtain the initial value of the probability of not finding (not occurring or not detecting) the danger at the beginning of the level of control for the duration τ .

$$P_{0i} = \exp\left\{-\sum_{n=1}^{i-1} \theta_n \tau_n\right\} \quad (13)$$

The first experimental security checks confirmed the correctness of the compilation of airport checkpoints and met expectations. It turned out that the use of 5 control checkpoints creates preconditions for further use of the same control mechanisms. These reliably suppress the impact of dangerous leaks in the environment of airport facilities [6]. In addition, it was possible to create a time-space for imitation of danger, by which we randomly check the control machines with signalling whether the skill and attention of the operators of security checkpoints are at the required level of protection. [8].

Evaluation of security input control data for the airport. Designing the modelling of each airport control system is an important process for the safe operation of the airport. With the help of these systems, risks and hazards at airports are minimized. Distinguishing safe zones and initial stages to distinguish initial hazards are another area of concern [9]. Included in this problem area are detection safety sensors that can predictively select:

- responses to basic security intrusions into areas with the importance of protection from air traffic controllers from security control systems,
- deployment of more accurate safety control systems
- own findings and observations [10].

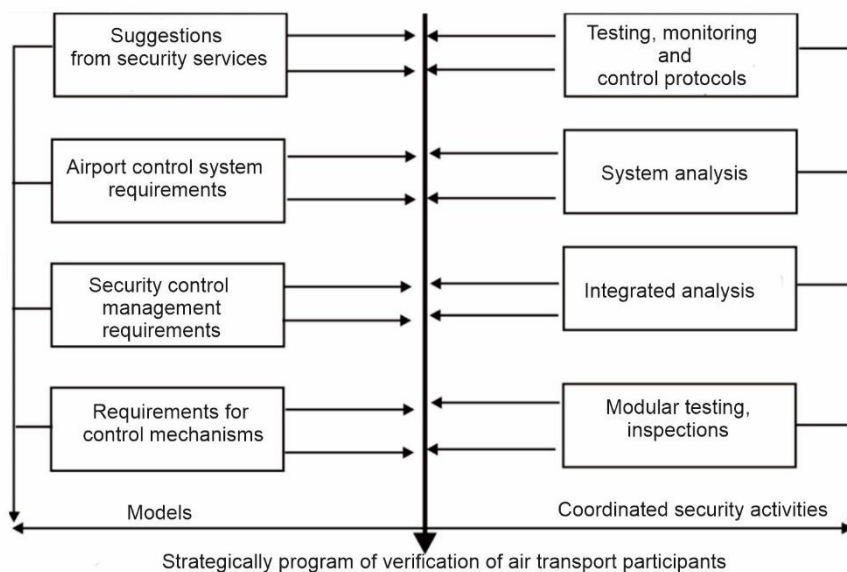


Fig. 2. Verification strategy for air transport participants

The question of choosing the most suitable control mechanisms is formed by the regularity of the dichotomy. It uses the analysis of finding hazards in the airport complex in its local parts. The emerging increase in airport security breaches requires new progress in localizing the functionality of the entire security control system. Such a direction indicates a change in the reliability of the observed (controlled) system in achieving the area of a successful solution of finding a hazard. If the functional reliability of the airport in security decreases, a

critical condition arises, which will affect the correct operation of the security control. At airports, it is clear that we need to demand the highest value of the trouble-free operation of security control systems from the control mechanisms in place [11]. The composition of each control mechanism affects the quality of control at the airport where it is implemented.

Here is an experimental example that has the character of further monitoring of the hazard. This theoretical level clearly determines in which direction it is necessary to set the security model fig. 3. This is clearly possible only by the mathematical expression of possible problems expressed by probability theory with the necessary imagery, which will show the application in practice. Any such control mechanism needs to be addressed in a comprehensive way to describe complete security at the airport [12].

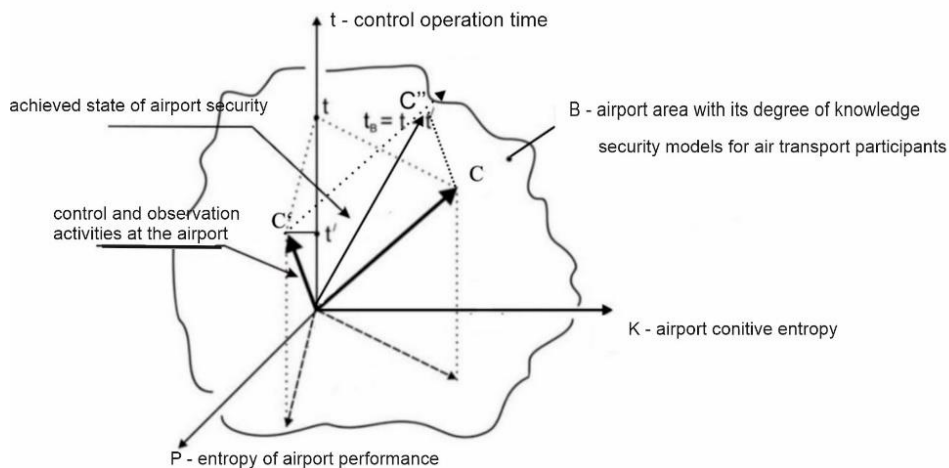


Fig. 3. Determined entropy for airport security models

The problem of degradation of airport security shows that an isolated assessment of the security problem, in general, is unjustified. The space of the airport is described in the coordinate system by the entropy of time, the degree of knowledge of security control systems and their operation. These airport management activities with precise models control the security hierarchy at the airport [13].

For us, it is necessary to know and examine the resulting vector *C* - the state of security at the airport. This vector requires knowledge of the input properties of security mechanisms at the airport [6]. We can measure points in space in a given coordinate system with changing coordinates of the airport security vector. Then all coordinates of the points in the airport space change. This makes it possible to investigate the clear causes of the security degradation of the airport complex if we have accurate values [14].

With a sufficiently long inspection time at the airport, the probability of finding danger is approaching zero. Thus, even with the position of reality during long inspections, the success of finding danger is accurate. In real conditions, we try to shorten the time of security checks [15]. This is possible mainly at higher hierarchical security levels of airport facilities and complexes. In this case, we approach the value of the lower limit of safety, which can be determined in advance [6]. If the specified control value is known, then the mathematical model of the comprehensive security control will take the form:

$$P_i(t) = \exp\{-\theta_1\tau_1 - \dots - \theta_i\tau_i\} \quad (14)$$

The elements of the probability of detection of danger are arranged in series (for example, the number of passengers before inspection). When the highest level of danger is found, the whole series of checks is interrupted. Control mechanisms are being introduced in the whole area of airport complexes [8]. Assessment of the state of security at the airport Košice, we have chosen an example of using actors of air transport (passengers) and aircraft type Airbus A – 320.

The input values are:

$t_{aui}=0:3:100$; minutes; period of one security check:3min, number of checks per aircraft A 330:200 passengers;

$l=5$; Number of serially connected passenger security checkpoints; the sum of the values of the potentially dangerous elements found (pocket knife; scissors; weapon, etc.) converted into working hours during the year of the security inspector, according to the numerical order of the airport inspection posts:

$S=\text{sum}([5\ 1\ 6\ 3\ 1]/10.^4)$;

$\text{thetat}=S.*t_{aui}$; exponent,

$Plt=2.718.^{(-\text{thetat})}$;

$\text{plot}(t_{aui},Plt,'r+')$,hold on,

$\lambda=0.1473$; at $i=100$ minute;

$\text{plot}(t_{aui},\lambda,'k')$,hold on,

$\text{xlabel}('time\ of\ control\ at\ the\ level\ of\ finding\ dangerous\ elements')$,

$\text{ylabel}('Initial\ probability\ of\ subsequent\ security\ check')$,

$\text{title}('Probability\ of\ non-danger', 'FontSize', 12)$, $\text{legend}('lambda')$,

hold off,

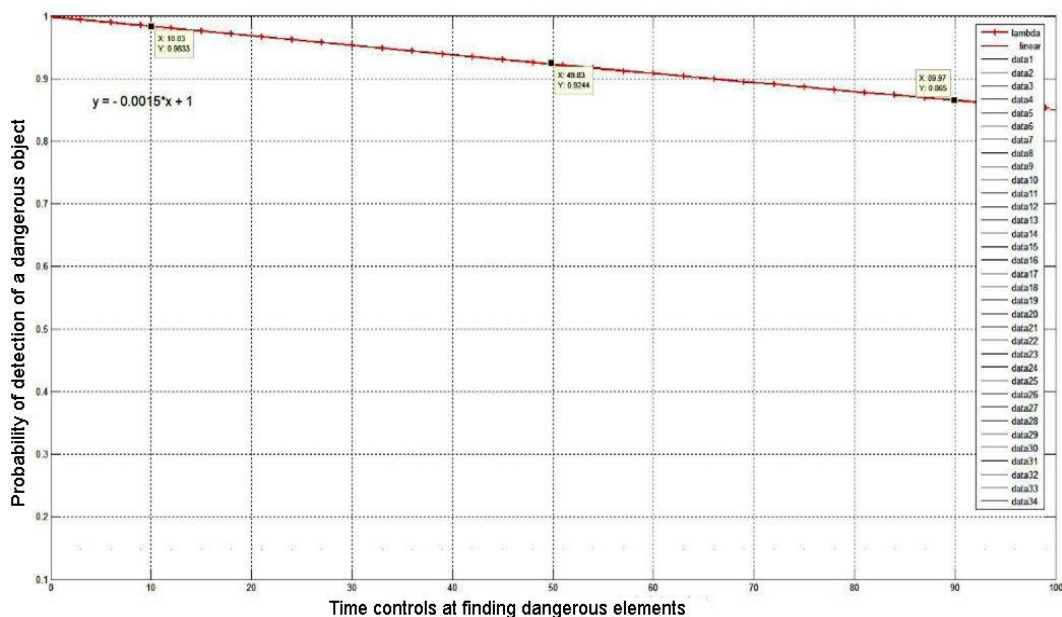


Fig. 4. Nonoccurrence probability of danger

The task was to determine the initial value of the probability P_{0i} thus finding a dangerous element in a passenger. The result shows a simulation of a mathematical model (14) in the MATLAB programming environment, the output of which is also the residual probability in one-time control unit.

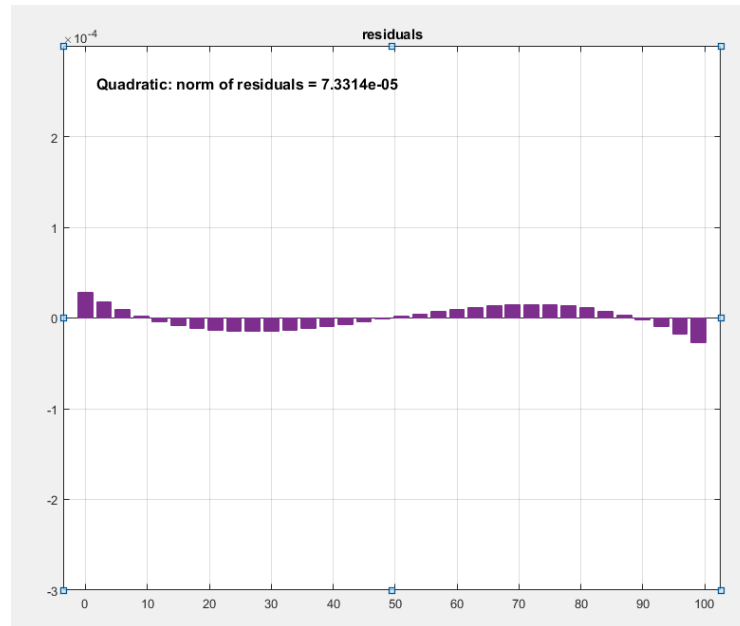


Fig. 5. Residual dangers progress in the control of passengers on a sample of 100 passengers

Conclusion. As can be seen from Figure 5, with a sufficiently large inspection time and control safety positions of 5 or more, the probability of finding a degree of danger is approached to zero. The control mechanism used with the required probability of non-occurrence of danger at the end of the experiment lasts $t = 100$ min. The median time to non-dangerous is $T_{st} = 10$; 50; and 90 minute at 200 passengers. As follows from the applied MATLAB program, the meantime of non-occurrence of danger is at the level $7.3 \cdot 10^{-5}$ which is a small expected value in the number of residues of Fig. 4. In real conditions, we try to shorten the time of passenger screening. This is possible especially at higher hierarchical levels of airport security with the help of sophisticated security systems. These must be installed in a sufficient number of inspection posts. In this case, we approach the value of the lower limit of safety, which can be determined in advance. The control system detects the degree of danger if there is an element of danger with the character of the probability of occurrence of danger. No higher dangerous was detected in the observed sample at the time of the experiment when $t = tk = 100$ min.

REFERENCES

1. Madarász, L. (1984). Stochastické procesy a teória informácií. Alfa, Bratislava, 230 p.
2. Vavřín, P. (1983). Malá encyklopédie elektrotechniky: Automatizační technika. SNTL. Praha, 660 p.
3. Lazar, T., Bréda, R., Kurdel, P. (2011). Inštrumenty istenia letovej bezpečnosti. TU Košice, 232 p.
4. Zaremba, J., Kurdel, P., Korba, P. (2019). Situational management of complex airport systems, *13 ročník medzinárodnej vedeckej konferencie: Bezpečné Slovensko a európska únia 2019*, Košice, 14.-15.11.
5. Adamčík, F., Kurdel, P., Lazar, T., Madarasz, L. (2015). Veda a experiment v doktorandskom štúdiu, vysokoškolská učebnica, TUKE 90 p.
6. Kelemen, M., Lazar, T., Klecun, R. (2009). Ergatické systémy a bezpečnosť v letectve, Edukácia a inteligencia zručností v leteckej prevádzke, vysokoškolská učebnica. Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl generála M.R. Štefánika, 140 p.
7. Lazar, T., Madarasz, L., Gašpar, V. (2013). Procesná analýza odhadu efektívnosti identifikácie MPM s inteligentným riadením, Elfa, s.r.o. Košice, 160 p.

8. Kurdel, P. (2015). Vedecko-pedagogické aspekty experimentu a modelovania so zložitými leteckými systémami [Habilitation work], Technická Univerzita v Košiciach, Letecká fakulta; Katedra avioniky. Košice: TUKE LF, 148 p.
9. Makarov, N.N. (2009) Sistemy obespečenija bezopasnosti funkcionirovanija elementov bortovogo ergatičeskogo kompleksa v konture upravlenija letatel'nogo apparata. Doctoral thesis. Uljanovsk 38 p.
10. Jadlovská A., Jadlovská S. (2013) Moderné metódy modelovania a riadenia nelineárnych systémov. Elfa, ISBN 978-80-8086-228-2, 67 p.
11. Turiak, M., Novák-Sedláčková, A., Novák, A. (2014). Portable electronic devices on board of airplanes and their safety impact, *14th International Conference on Transport Systems Telematics, Communications in Computer and Information Science*, 471, pp. 29–37.
12. Drotárová, J., Kováčová, L., Križovský, S. (2019) Analysis of observation and preparation of selected target group for crisis situations, *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019*, Volume 19(5.4), 33–40 pp.
13. Fedoseev V.V. (1999), *Ekonomiko-matematičeskije metody*. Moskva, Juniti, ISBN 5-238-00068-5. P.198.
14. Tomová, A. (2016). Are commercial revenues important to today's european air navigation service providers? *Journal of Air Transport Management*, 54, 80-87. doi:10.1016/j.jairtraman.2016.03.023.
15. Laplace, I., Kazda, A., Tomova, A., Badanik, B., Lenoir, N., Malavolti, E. (2009). FAST: Future airport strategies. Paper presented at the 8th Innovative Research Workshop and Exhibition, Proceedings, pp. 19-28.

Павол Курдел¹, Ярослав Заремба², Лукаш Корба³

¹ Доцент кафедри авіоніки, Технічний університет м. Кошице, Летна 1/9, м. Кошице, 04001, Словаччина

² Аспірант, Університет управління безпекою м. Кошице, Костова 2373/1, м. Кошице, 04001, Словаччина

³ Аспірант кафедри авіоніки, Технічний університет м. Кошице, Летна 1/9, м. Кошице, 04001, Словаччина

РІВЕНЬ НЕБЕЗПЕКИ В КЕРОВАНІЙ БЕЗПЕЦІ АЕРОПОРТУ

Функціональність авіаційного комплексу визначається якістю та безпекою. Це визначається взаємозв'язком між суб'єктами аеропорт – літак – повітряний простір. Безпечне управління та контроль в аеропорту – це спрямована дія незалежних факторів. Їх уособлення закладено в відчутті загальної безпеки, а також безпеки кожного учасника повітряного руху. Виконання етичних характеристик безпеки вимагає здійснення управління, щоб контроль рівня безпеки в аеропорту здійснювався у відповідній зоні безпеки. Побудова безпечного стану може бути досягнута, якщо обраний метод експериментальних досліджень щодо рівня безпеки достовірно відображатиме реальну помилку в управлінні повітряним транспортом. Правильність процедур контролю безпеки можна перевірити за допомогою моделювання та моделей, побудованих на фізичній основі. Основна мета статті полягає в тому, щоб показати один із способів ефективного виявлення помилок в управлінні органами контролю безпеки повітряного транспорту.

Ключові слова: аеропорт, безпека, система управління, ймовірність, чутливість, небезпека.

Ростислав Дьомін¹, Юрій Дьомін^{2*}, Ганна Черняк³, Володимир Ноженко⁴

¹ В.о. директора, Філія «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця», вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2283-8360>

² Професор, Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-2851>

³ Старший науковий співробітник, Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1297-8212>

⁴ Проректор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59а, м. Северодонецьк, 93400, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-4958>

* Автор, відповідальний за листування: domin1520.1435mm@gmail.com

МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО РОЗСЛІДУВАННЯ СХОДЖЕННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З РЕЙОК

В статті представлено засади метода оперативного розслідування сходження рухомого складу з рейок. Цей метод призначено для виявлення найбільш суттєвих механічних причин транспортних подій з тим, щоб на підставі отриманих даних знаходити напрямки подальшого удосконалення вимог безпеки руху щодо стану утримання вантажних вагонів і колії. Розроблений метод встановлює загальний методичний порядок проведення шляхом комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу багатоваріантних досліджень щодо розрахунку показників безпеки руху поїздів, та виявляє значущість технічних чинників, які спровокували певну подію. За цим методом оперативне розслідування сходження рухомого складу з рейок ґрунтується на розробці адекватних комп'ютерних моделей динаміки вагонів у складі поїздів. При цьому при детально відображаються всі особливості вагона, який зійшов з рейок першим. Представлений метод ґрунтується на засадах факторного аналізу, де інтервали варіювання чинників події представлені в натуральних одиницях вимірювання. При цьому оцінювання показників безпеки за кожним дослідом плану експерименту також здійснюється з врахуванням їх розмірності. Внаслідок цього побудована функція множинної регресії за обраним показником безпеки руху дозволяє не тільки визначити значущість чинника події сходження, але й встановити рівень чинників, при перевищенні яких порушуються критерії безпеки руху, тобто визначити границі області з прийнятним рівнем безпеки руху.

Ключові слова: рухомий склад, сходження з рейок, комп'ютерне моделювання, динамічні показники безпеки руху.

Вступ. Транспортні події на залізницях, що пов'язані з трошею поїздів, залежать від множини причин як об'єктивного, так і суб'єктивного характеру. Рівень експлуатаційної безпеки рейкових екіпажів у механічному сенсі визначається головним чином запасом їхньої стійкості від сходження з рейок, що залежить від показників динамічної взаємодії ходових частин і колії. Умови безпеки руху поїздів переважно залежать від конструкційних характеристик і технічного стану ходових частин

рухомого складу та колійної структури. Відповідні чинники набувають все більшої ваги з об'єктивним підвищенням вимог до якості перевезень пасажирів і вантажів.

Як відомо, більшість транспортних подій пов'язана з випадками сходжень з рейок вантажних вагонів. Стан вагонного парку свідчить про відсутність проривних наукоємних технічних рішень щодо конструкцій вагонів та технологій їх експлуатації. Так звані інноваційні рішення спрямовані виключно на модернізацію існуючих проектів. Зволікання з технічним переозброєнням залізниць за рахунок поповнення транспортними засобами нової генерації стає однією з провідних причин поточного програшу залізничного транспорту в конкуренції з автомобільним.

Встановлення механічних причин сходження рухомого складу з рейок є достатньо складним завданням з огляду на значну кількість чинників, що сприяли сходженню, й неповноту інформації, яка характеризує різноманітні причини або їх збіг стосовно певного випадку сходу. Під час службового розслідування встановлюється вся можлива інформація стосовно сходження, й далі вона використовується в якості вихідної для з'ясування того, які ж саме чинники обумовили досліджувану транспортну подію. При цьому чинниками причин сходження можуть бути обставини, характеристики або параметри, які відносяться до рухомого складу, рейкової колії, режиму руху тощо.

В окремих випадках розслідування сходжень рухомого складу з рейок залишаються не з'ясованими причини, що спровокували процеси втрати контакту між колесом і рейкою, тоді як були виконані вимоги з безпеки руху за всіма нормативними документами. В цих випадках нелегко з'ясувати однозначну причину сходу, виявити серед декількох ймовірних чинників найбільш суттєвий у від'ємному сенсі, тобто такий, за відсутності якого сходження не сталося б. Також важливо з'ясувати найбільш суттєву причину сходження рухомого складу з рейок у випадку, коли одночасно порушені вимоги нормативних документів з безпеки руху за кількома факторами.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Безпека залізничного транспорту як ключова проблема включає широкий спектр складових, серед яких чільне місце належить питанням динаміки руху транспортних засобів [1-5]. В механічному сенсі рівень експлуатаційної безпеки рейкових екіпажів головним чином визначається запасом їхньої стійкості в рейковій колії [6-9]. Через це в галузі механіки рухомого складу роль науково-дослідних робіт з вивчення перебігу динамічних процесів, що впливають на умови розвитку аварійних ситуацій пов'язаних зі сходженнями з рейок рухомого складу, залишається гостро актуальною на всіх етапах розвитку залізничного транспорту [10-14].

Важливим підходом щодо встановлення причинно-наслідкового зв'язку між чинниками подій і сходженнями рухомого складу з рейок є відтворення динамічних процесів, які супроводжували подію. Отримати достовірні оцінки показників безпеки руху за різних експлуатаційних умов і параметрів, які характеризують технічний стан рухомого складу й колії, дозволяє комп'ютерне моделювання динаміки рухомого складу. Тому найбільш перспективним в цьому відношенні виявляється технологія комп'ютерного моделювання, зорієнтована на математичну оцінку ризиків сходження рухомого складу з рейок, яку розроблено в межах загальної розрахунково-експериментальної концепції [15].

Аналіз досліджень динаміки і безпеки руху рейкових транспортних засобів дає підстави для твердження, що проблемними напрямками розвитку методів оцінки ризиків сходження рухомого складу з рейок є: оперативне встановлення ймовірних чинників сходження; оцінювання ризику сходження за характеристиками технічного стану ходових частин рухомого складу та колії. На відміну від оперативного встановлення причин сходження рухомого складу з рейок оцінювання ризиків сходження виявляється завданням з

декількома критеріями безпеки руху. В якості ризику сходження прийнята інтегрована імовірнісна міра, пов'язана з умовами порушення будь-якого з критеріїв безпеки на множині типових експлуатаційних режимів. Теоретичну основу, спільну для обох напрямків, складають достатньо розроблені на даний час методи обчислювальної механіки, які втілилися в сучасному програмному забезпеченні, призначеному для моделювання динаміки рухомого складу [16].

Мета і завдання дослідження. Метою статті є представлення метода створюваного для оперативного розслідування сходжень рухомого складу з рейок. Завдання дослідження полягає у розвитку прикладного напрямку розробленого метода.

Матеріали та методи дослідження. Оперативне розслідування сходжень рухомого складу з рейок ґрунтується на комплексному аналізі показників безпеки й залученні відповідного математичного апарату, що надає змогу встановити значущість або вагомість кожного з чинників. Зокрема застосовуються методи обчислювальної механіки, теорія планування експерименту, факторний аналіз, теорія ймовірностей, прийняття рішень та штучного інтелекту.

Загальна характеристика розроблюваного метода. Метод оперативного розслідування сходження рухомого складу з рейок (далі – метод ОРС) призначено для виявлення серед можливих механічних причин транспортних подій найсуттєвіших, щоб на підставі отриманих даних знаходити напрямки подальшого удосконалення вимог безпеки руху щодо стану утримання вантажних вагонів і колії й умов їх раціональної експлуатації щодо забезпечення прийняттого рівня безпеки руху. Метод ОРС встановлює загальний методичний порядок проведення шляхом комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу багатоваріантних досліджень щодо розрахунку показників безпеки руху вантажних вагонів, що зійшли з рейок, та виявляє значущість технічних чинників, які спровокували певну подію.

Комп'ютерні моделі динаміки рухомого складу, розроблювані за методом ОРС обумовлюють певні відмінності у порівнянні з моделями динаміки рухомого складу, що розроблюються за іншим призначенням, наприклад, з метою вибору раціональних параметрів підвищення або прогнозування рівня навантаженості кузова й ходових частин. Загальним при розробці комп'ютерних моделей динаміки за різними призначеннями є використання підходу системи твердих тіл та застосування спеціалізованого програмного забезпечення.

Динамічні моделі рухомого складу, що розроблюються з метою дослідження сходжень з рейок, містять принципові відмінності від моделей іншого призначення. В першу чергу, вони мають відображати не тільки конструкційні особливості рухомого складу, що досліджується, а й враховувати усі ймовірні чинники, що провокують сходження, зокрема, такі, що відображають технічний стан рухомого складу й колії. При побудові моделей динаміки за формалізмом системи твердих тіл, відбивається структура рухомого складу й параметри. При цьому варіювати чинниками можливо тільки за рахунок належної параметризації моделі, залишаючи незмінною її структуру. Отже моделі динаміки рухомого складу, котрі призначено для дослідження сходжень, мають враховувати значно більший обсяг інформації, щоб адекватно відобразити подію.

Динамічна комп'ютерна модель може бути розроблена з різним ступенем деталізації, що відбивається на межах області її застосування. Ступінь деталізації моделей динаміки окремих одиниць залізничного рухомого складу або поїзда в цілому також безпосередньо залежить від обставин події сходження, що в різних випадках відрізняються.

Проведені дослідження щодо розслідування сходжень вантажних вагонів з рейок виявили зв'язаність цих подій не тільки з конструкційними, а й з експлуатаційними особливостями вагонів. Тому комп'ютерні моделі динаміки, що залучаються для розслідування сходжень, мають надавати можливість врахування експлуатаційного зносу деталей та вузлів і забезпечувати варіювання цими параметрами.

З використанням таких комп'ютерних моделей проводиться дослідження динамічних процесів, які супроводжували рух того чи іншого екіпажу на ділянці сходження. Тому належить визначати всі показники, що характеризують безпеку руху. При цьому особливої уваги потребує відображення взаємодії коліс з рейками, що обумовлює необхідність модельного опису робочих поверхонь коліс і рейок.

Оперативне розслідування сходження рухомого складу з рейок, в першу чергу, ґрунтуються на розробці адекватних комп'ютерних моделей динаміки вагонів або поїзда. Застосування підходу підсистем щодо розробки комп'ютерних моделей динаміки, а саме, створення базових моделей вантажних вагонів розповсюджених типів, надає можливість проведення комп'ютерного моделювання динаміки не тільки окремого вагона, а й поїзда в цілому. При цьому для дослідження сходження доцільно більш детально відображати всі особливості вагона, який зійшов з рейок першим.

Таким чином, в моделі поїзда, вагони якого зійшли з рейок, зберігаються основні експлуатаційні особливості як поїзда, так і окремих вагонів. При цьому забезпечується можливість кількісно оцінювання величини динамічних показників безпеки руху вантажних вагонів, серед яких особливе місце займають показники силової взаємодії коліс з рейками, що не піддаються безпосередньому вимірюванню. Крім того, за рахунок використання різної ступені деталізації моделей досягається раціональне співвідношення між складністю загальної моделі динаміки поїзда й обсягом інформації, яка є необхідною при встановленні причин сходження.

Метод ОРС ґрунтується на засадах факторного аналізу, де інтервали варіювання чинників події представлені в натуральних одиницях вимірювання. При цьому оцінювання показників безпеки за кожним дослідом плану експерименту також здійснюється з врахуванням їх розмірності. Внаслідок цього побудована за результатами методу ОРС функція множинної регресії за обраним показником безпеки руху дозволяє не тільки визначити значущість чинника події сходження, але й встановити рівень чинників, при перевищенні яких порушуються критерії безпеки руху, тобто визначити границі області з прийнятним рівнем безпеки руху.

Загальна процедура методу ОРС полягає в побудові функції множинної регресії від певних факторів, де в якості незалежних змінних (факторів) виступають чинники, що супроводжували подію сходження рухомого складу з рейок. В якості залежної змінної розглядається показник безпеки руху, й результати, за якими здійснюється побудова функціональної залежності, отримуються на підставі проведення комп'ютерного експерименту шляхом використання певної математичної моделі динаміки рухомого складу. Структурну схему методу ОРС приведено на рис. 1.

Теоретичне обґрунтування методу ОРЗ полягає в застосуванні положень теорії планування експерименту та факторного аналізу. В математичних термінах метод ОРЗ формулюється як вибір факторів експерименту, встановлення їх рівнів та інтервалів варіювання, побудова плану експерименту й проведення згідно розробленого плану дослідів з визначенням відгуків системи на зміну факторів та отримання рівнянь регресії, коефіцієнти яких характеризують вплив факторів на відгуки системи.

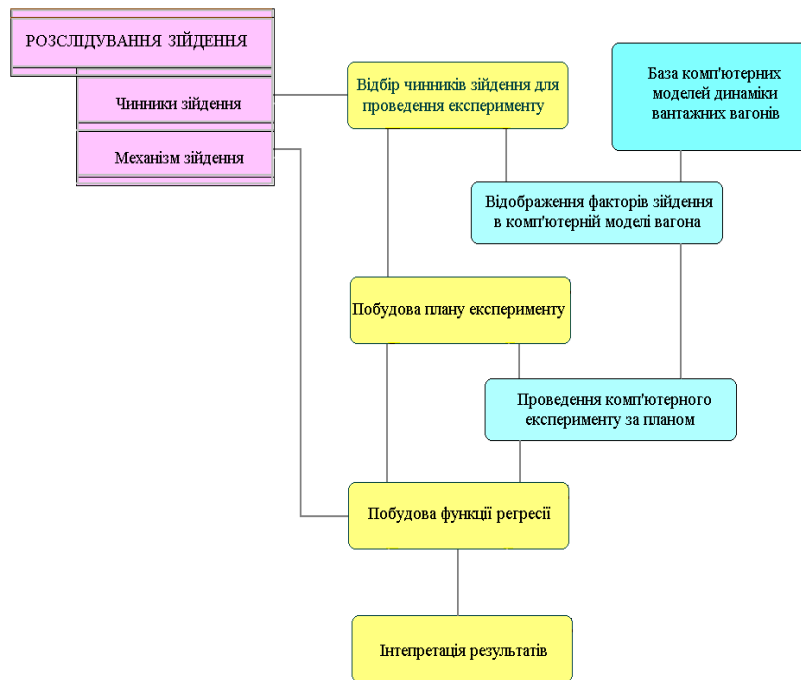


Рис. 1. Структурна схема методу ОРС

Формування множини чинників. Першим етапом методу ОРС є встановлення множини ймовірних чинників сходження $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, за якими в подальшому формується план і проводиться комп'ютерний експеримент. В межах використання методу ОРС усі обставини, характеристики й параметри події сходження умовно поділяються на три групи чинників:

«сталі», до яких віднесено особливості конструкції вагонів й устрій колії за планом і профілем на ділянці сходження;

«квазі-сталі», до яких віднесено чинники, що в цілому відбивають експлуатаційні параметри й характеристики, змінні в різних подіях сходжень, зокрема, геометричні розміри деталей та вузлів ходових частин вагонів, які мають розкид значень в широких межах внаслідок технологічних допусків та експлуатаційного зношування;

стохастичні, стосовно яких інформація взагалі відсутня.

Такий поділ чинників проведено з огляду на значну кількість чинників події сходження, а також недостатність інформації стосовно окремих з них. Крім того, розробка комп'ютерних моделей динаміки рухомого складу, за якими визначаються показники безпеки руху під час комп'ютерного експерименту, не є тривіальним завданням. Метод системи твердих тіл, за яким наразі проводиться моделювання динаміки рухомого складу, враховує структуру вагонів або локомотивів і відбиває її в розроблюваній комп'ютерній моделі. Водночас, не розроблено підходів, що дозволяють варіювати структурою системи, тоді як параметричне варіювання в моделях динаміки не викликає ускладнень. Отже, ще на етапі розробки комп'ютерної моделі динаміки рухомого складу мають бути враховані конструкційні особливості й забезпечена можливість відбиття в моделі всіх чинників, за якими буде в подальшому проводитися комп'ютерний експеримент, а саме чинників події сходження.

За чинниками події сходження, віднесених до «сталих», формування варіантів плану комп'ютерного експерименту не здійснюється, їх значення визначаються в комп'ютерній моделі динаміки вагона одноразово і не змінюються на протязі всього комп'ютерного експерименту. Формування множини ймовірних чинників події сходження $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$, за якими проводиться комп'ютерний експеримент, виконується за чинниками, що віднесено до «квазі-сталих».

При формуванні множини чинників F для проведення комп'ютерного експерименту щодо технічного стану вантажного вагона, що зійшов з рейок першим, за методом ОРС рекомендується включати:

радіуси коліс вагона $r_j, (j = \overline{1,8})$;

просідання пружин ресорних комплектів $\Delta h_j, (j = \overline{1,4})$;

зазори в ковзунах $\Delta zkl_j, (j = \overline{1,4})$;

знос в підп'ятникових вузлах в поздовжньому wr_j і поперечному напрямках $wg_j, (j = \overline{1,2})$;

зазори в буксових прорізах в поздовжньому напрямку $w_bj, (j = \overline{1,16})$;

завищення клинів $kl_j, (j = \overline{1,8})$.

Прийнята кількість факторів K залежить від обставин певної події сходження й може мінятися в широких межах. При цьому потрібно враховувати те, що загальна кількість варіантів розрахунків, необхідних для проведення комп'ютерного експерименту, експоненціально залежить від K . Отже, при формуванні множини чинників F належить приймати заходи щодо обґрунтованого обмеження кількості чинників, обираючи їх за принципом «необхідності й достатності».

Практичне використання методу ОРЗ включає встановлення рівнів та інтервалів I_k кожного чинника, включеного до переліку F . Теоретично для кожного з відібраних чинників можливо обрати декілька рівнів l , наприклад 2, 3 або й більше. Але виходячи з того, що збільшення кількості рівнів приводить до збільшення кількості дослідних варіантів, а також доцільніше встановлювати однакове число рівнів за всіма факторами, рекомендується для оперативного розслідування сходження використовувати мінімальне число рівнів $l = 2$.

Інтервал варіювання I_k й основний (нульовий рівень) за кожним фактором визначаються як

$$I_k = \frac{f_{k \max} - f_{k \min}}{2}, \quad (1)$$

$$f_{0k} = \frac{f_{k \max} + f_{k \min}}{2}, \quad (2)$$

де $f_{k \min}$ і $f_{k \max}$ – це мінімальне (рівень 1) й максимальне (рівень 2) значення факторів.

Крім того, для подальшого спрощення розрахунків замість реальних (натурних) рівнів f_k використовуються нормовані значення чинників, що здійснюється за допомогою перетворення:

$$f_k = \frac{\tilde{f}_k - f_{k0}}{I_k}, \quad (3)$$

де \tilde{f}_k – натуральне значення фактора; I_k – інтервал варіювання; f_{k0} – основний рівень; f_k – нормоване значення.

В результаті цього перетворення кожний фактор f_k приймає на границях варіювання значення $f_k = \pm 1$, а на основному рівні – $f_k = 0$.

Спосіб організації плану проведення експерименту. На підставі одного розрахунку (далі дослід) на підставі комп'ютерного моделювання з прийнятним ступенем точності кількісно обчислюються значення показників безпеки руху вантажного вагона, що рухався з певною швидкістю V_c на ділянці сходу L_c .

Як показали проведені дослідження, для здійснення комп'ютерного експерименту з визначення впливу чинників на сходження вантажних вагонів за методом ОРЗ достатньо прийняти загальний шлях вагона $L_c = 300$ м. При цьому мають також бути відтворені всі особливості колії щодо характеристик й геометрії профілів рейок та стану утримання на відрізьку L_c . Щоб відобразити стан утримання колії на підставі даних колієвимірювального вагона за розробленим алгоритмом формуються нерівності рейок з лівого і правого боку в горизонтальному й вертикальному напрямках. При цьому принципове значення має «синхронізація» нерівностей за ділянкою сходу і місцем події сходження.

Виходячи з цілі дослідження й значної кількості необхідних розрахункових варіантів, які виникають при математичному опису завдання розслідування сходження, перебирання факторів з множини $F = \{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ має бути впорядкованим і ґрунтуватися на теорії планування експериментів, щоб забезпечити отримання максимальної кількості інформації при проведенні найменшої кількості дослідів.

Прийняття рішення щодо плану експерименту покладається на дослідника. Основними вимогами, що висуваються до плану експерименту, є їх ортогональність і рототабельність. В ортогональному плані виконується умова парної ортогональності стовпчиків матриці планування. Використання рототабельного плану забезпечує для будь-якого напрямку від центру експерименту рівнозначність точності оцінювання функції відгуку на рівних відстанях від центру експерименту.

За екстремальними значеннями показників безпеки руху, що визначені на ділянці сходження за кожним дослідом, здійснюється їх опрацювання щодо побудови функції множинної регресії від факторів за методом найменших квадратів. Рівняння множинної регресії обрано з врахуванням головних лінійних ефектів факторів і їх взаємодії не вище другого порядку у вигляді:

$$y = Y(f_1, f_2, \dots, f_K) = b_0 + b_1 f_1 + \dots + b_K f_K + b_{1,1} f_1 f_1 + b_{1,2} f_1 f_2 + \dots + b_{K,K} f_K f_K, \quad (4)$$

де b_0 – вільний член рівняння; b_k ($k = \overline{1, K}$) – головний (лінійний) ефект k -го фактору; b_{k_1, k_2} ($k_1 = \overline{1, M}, k_2 = \overline{1, M}$) – ефекти взаємодії факторів і квадратичні ефекти.

Шукані коефіцієнти b_0, b_k, b_{k_1, k_2} рівняння (4) визначаються в результаті розв'язку системи рівнянь такого вигляду:

$$y_i = b_0 + b_1 f_{1i} + \dots + b_K f_{Ki} + b_{1,1} f_{1i} f_{1i} + b_{1,2} f_{1i} f_{2i} + \dots + b_{K,K} f_{Ki} f_{Ki}, \quad (i = \overline{1, N}), \quad (5)$$

де f_{ki} – значення k -го фактору при проведенні i -го дослід; y_i – екстремальні значення показника безпеки руху, що визначені на ділянці події сходження.

Зазначене завдання вирішується відповідно принципу максимальної правдоподібності, що забезпечує обчислення коефіцієнтів b_0, b_k, b_{k_1, k_2} за методом найменших квадратів [10]. При цьому мінімізується функція $\Phi(b_0, b_1, \dots, b_{K, K})$, яка сформована за принципом

$$\Phi(b_0, b_1, \dots, b_{K, K}) = \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_0, b_1, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K})]^2 \quad (6)$$

Таким чином ця задача зводиться до системи рівнянь, що отримуються як перші похідні від функції Φ за кожним параметром $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial b_{K, K}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Після запису системи рівнянь (7) з врахування (6) отримуємо систему лінійних рівнянь щодо визначення параметрів $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_m)] \cdot Y'_{b_0}(f, b_1, b_2, \dots, b_{K, K}) = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_m)] \cdot Y'_{b_1}(f, b_0, b_1, \dots, b_{K, K}) = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n [y_i - Y(f_i, b_m)] \cdot Y'_{b_m}(f, b_0, b_1, \dots, b_{K, K}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язавши систему рівнянь (8) відносно параметрів $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$, знаходимо всі коефіцієнти, а отже й конкретний вигляд шуканої функції регресії. Для обчислення коефіцієнтів застосовано числовий метод Ньютона-Гаусса, за яким розроблено комп'ютерну програму в системі Mathcad, що була протестована при обробці даних комп'ютерного експерименту щодо можливості сходження напіввагона в порожньому стані.

Встановлено, що включення в функцію регресії (5) додаткових членів, які враховують взаємодію факторів вище другого порядку, переускладнює модель регресії і не надає додаткової інформації щодо оцінювання впливу чинників події сходження на показники безпеки руху, зокрема, на коефіцієнт запасу стійкості колеса проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки k_{cc} [17].

В результаті розрахунку коефіцієнтів $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$ визначається аналітичний опис функціонального зв'язку показників безпеки руху з чинниками динамічної системи за результатами проведеного експерименту, що дозволяє оцінювати вплив цих чинників на рівень показників. Таким чином, коефіцієнти $b_0, \dots, b_K, b_{1,1}, \dots, b_{K, K}$ характеризують внесок кожного фактора й їх взаємодії в значення

показника безпеки руху вагона на ділянці сходження. Процес переносу початку координат в центр простору факторів з координатами дуже важливий при обробці даних будь-яких експериментів, що описуються моделлю у вигляді гіперплощини, оскільки дозволяє отримати усереднене значення для b_0 .

Функція відгуку. Принциповим етапом використання методу ОРЗ є з'ясування, за яким з показників безпеки руху слід аналізувати вплив чинників на подію сходження. За допомогою комп'ютерних моделей динаміки вагонів на підставі моделювання проводиться дослідження силової взаємодії вагона з колією. Вихідні величини, що отримуються за кожним дослідним варіантом, включають повний спектр унормованих показників безпеки руху й динамічних якостей вагона [17].

З аналізу матеріалів розслідувань транспортних інцидентів виходить, що найбільш поширеним механізмом сходження вантажних вагонів з рейок є перекидання колеса через головку рейки. Тому при розробці методу ОРС враховано, що для вантажних вагонів основним показником безпеки руху є коефіцієнта запасу стійкості проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки k_{cc} , який залежить від кута нахилу до горизонту твірної конусоподібної поверхні гребеня колеса, коефіцієнта тертя ковзання поверхонь колеса і рейки, що взаємодіють, та відношення вертикальної і горизонтальної складових сил взаємодії колеса з рейкою, що діють одночасно [17].

В методі ОРС на підставі рівня коефіцієнта стійкості k_{cc} формуються функції відгуку, що відображають схильність або потенційну можливість сходження вантажного вагона з рейок. В якості допоміжного показника безпеки, за яким також формується функція відгуку, характеризуючи подію сходження рухомого складу з рейок, розглядається комбінований показник безпеки $K_{\delta\delta}$ колісної пари, який дозволяє адекватно оцінити процес повного вкочування колеса на головку рейки і є більш чутливим до розпізнавання події сходження [18]. Суть критерію за комбінованим показником $K_{\delta\delta}$ полягає в тому, що процес вкочування поділено на дві фази: до критичної точки і вище критичної точки, де за критичну точку на профілі гребеня прийнята перша точка контакту в процесі вкочування з найбільшим кутом нахилу утворюючої гребеня. Впродовж другої фази продовження вкочування колеса на рейку від критичної точки пропонується використовувати безпосередньо величину підйому колеса z над головою рейки для оцінювання безпеки сходження, починаючи з положення, при якому гребневий контакт виявився в критичній точці. Застосування нормування одиниці відстані максимальної висоти підйому за вертикаллю від критичного положення колеса до його повного вкочування на головку рейки перетворює цей комбінований показник безпеки при продовженні вкочування в неперервний і такий, що зменшується до 0 при виході гребеня на вершину головки рейки.

Обираючи показники безпеки руху відповідно інших типових механізмів сходження рухомого складу з рейок, запропонований метод також дозволяє будувати функції відгуку від визначених чинників події, зокрема для коефіцієнтів запасу стійкості за умови витискання k_{ce} й коефіцієнтів запасу стійкості від перекидання k_{cn} в разі прикладення до вагона поздовжніх сил, рамних сил H_p або бокових сил H_b . Для цього на ділянці безпосереднього сходження оцінювання виконується за вказаними вихідними величинами, причому з врахування того, що силові показники мають оцінюватися за максимальними значеннями, на відміну від коефіцієнтів, що оцінюються за мінімальними значеннями.

Особливий інтерес при удосконаленні запропонованого метода складають випадки сходження, коли механізм сходу не виявлено. В такому разі можливо застосовувати функції відгуку за сукупністю показників, що поєднує часткові показники безпеки

руху за різними типовими механізмами сходження на підставі врахування їх відносної значущості або проводити пошук суттєвих чинників з залученням методів векторної оптимізації. При цьому складності обумовлює те, що критерієм сходження за одними показниками є мінімальні значення, тоді як для інших – максимальні значення.

Аналіз результатів та інтерпретація функції регресії. За методом ОРС аналіз результатів виконується на підставі побудованої функції множинної регресії (5), що дозволяє визначити взаємозалежність між показником безпеки, що аналізується, й чинниками події сходження, серед тих, що відібрані до множини факторів F . Рівняння регресії трактується як рівняння поверхні в багатофакторному просторі. У випадку розгляду в якості функції відгуку коефіцієнта запасу стійкості проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки, що пропонується за методом ОРС, шукане рішення складають координати із значеннями факторів впадини цієї поверхні. Оскільки кількість чинників, що відбираються для проведення комп'ютерного експерименту щодо виявлення найсуттєвіших чинників події сходження, включає значну кількість факторів K ($K > 2$), то відображення результатів у вигляді поверхні можливо здійснити тільки за двома факторами, при фіксуванні інших.

Інтерпретація результатів за методом ОРС включає оцінку величини й напрямку впливу окремих факторів та їх взаємодії, а також співставлення впливу сукупності факторів. Коефіцієнти рівняння регресії надають інформацію про вагу впливу окремих чинників на рівень коефіцієнтів запасу стійкості k_{cc} .

Для прикладу розглянуто результати комп'ютерного експерименту за шістьма факторами $K = 6$ стосовно оцінки стійкості руху напіввагона на прямій ділянці колії із задовільним станом утримання. В якості факторів були вибрані: коефіцієнт тертя ковзання в п'ятникових вузлах fp ; зноси в поздовжньому напрямку в п'ятникових вузлах wp (м); коефіцієнт тертя в ковзунах fs ; завищення клинів kl (м); зноси в поздовжньому напрямку буксових вузлів $wb1$ (м) і $wb2$ (м) першого і другого візків відповідно. Для кожного з відібраних факторів було визначено два або три рівні (табл. 1).

Таблиця 1. Рівні факторів

Фактор	fp	wp	fs	kl	$wb1$	$wb2$
Розмірність		м		м	м	м
Рівень 1	0,1	0	0,1	0	0	0
Рівень 2	0,4	0,005	0,4	0,015	0,004	0,004
Рівень 3					0,008	0,008

За методом ОРС рекомендується аналіз й інтерпретацію результатів проводити на підставі карт Парето. Ці діаграми показують зміну у відсотках очікуваного середнього значення функції відгуку на верхніх та нижніх рівнях кожного з факторів. Чинники або причини втрати якості приводяться в спадному порядку значущості. На рис. 2 і 3 наведено карти Парето, що отримані в межах застосування методу ОРС щодо коефіцієнта запасу стійкості k_{cc} напіввагона при швидкостях руху 60 і 80 км/год.

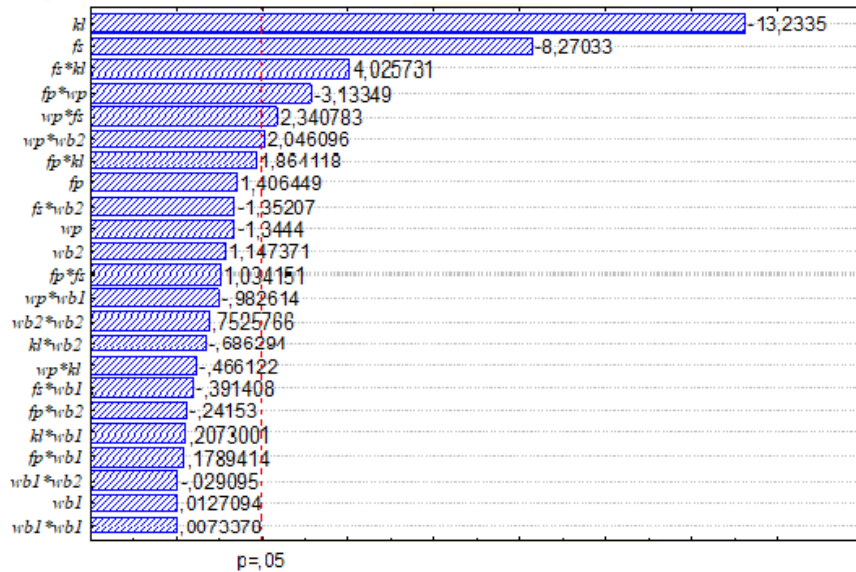


Рис. 2. Оцінка ефекту при 60 км/год

Подана на рис. 2 карта Парето дозволяє встановити, що при швидкості 60 км/год визначальний вплив на коефіцієнт запасу стійкості від сходжень здійснюють непрацюючі клини чи збільшене тертя в п'ятникових вузлах (до 0,4) або обидва ці фактори разом.

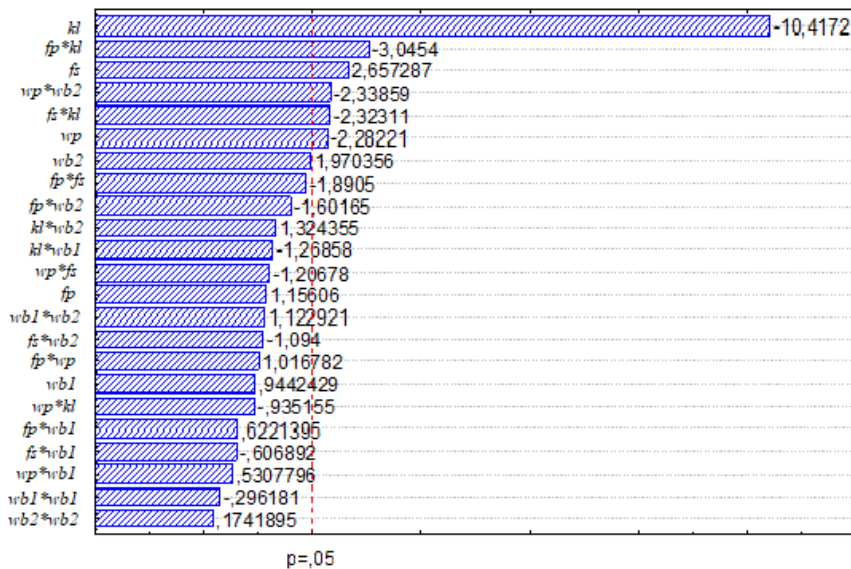


Рис. 3. Оцінка ефекту при 80 км/год

Як видно з рис. 3, головними факторами щодо зменшення запасу стійкості від сходжень колеса з рейки для порожнього напіввагона при швидкості руху 80 км/год стають непрацюючі клини, збільшені коефіцієнти тертя ковзання в п'ятникових вузлах разом зі збільшеними коефіцієнтами тертя в ковзунах, зноси в поздовжньому напрямку в п'ятникових вузлах та сполучення цих факторів.

Однаковий вплив чинників на рівень запасу стійкості рухомого складу проти сходження з рейок, зустрічається досить рідко, частіше причиною події є наявність декількох значущих в негативному сенсі чинників. За принципом Парето стверджується таке: вплив

факторів на втрату якості досить погано розподілений, невелике число можливих причин, що погіршують стан, відповідають за більшість виникаючих проблем. Отже, карти Парето допомагають визначити, на що саме необхідно звернути увагу з ціллю підвищення безпеки руху рейкових транспортних засобів.

Висновки. Метод оперативного розслідування сходження (ОРС) розроблено з метою виявлення найбільш суттєвих механічних чинників сходження рухомого складу з рейок. Цей метод встановлює загальний методичний порядок проведення шляхом комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу багатоваріантних досліджень щодо розрахунку показників безпеки руху поїздів та забезпечує виявлення значущих механічних чинників, які спровокували певну подію сходження.

Метод ОРС рекомендується до використання у випадках, коли причина сходження за матеріалами розслідування транспортної події не є очевидною або однозначною. Використання методу гарантує отримання об'єктивної кількісної інформації щодо показників безпеки руху на ділянці сходження одиниці рухомого складу й виявлення функціональних та стохастичних залежностей між показниками безпеки руху й певними чинниками, що супроводжували транспортну подію.

Відповідно методу ОРС за чинниками події будується множинна регресійна залежність між мінімальними значеннями коефіцієнта запасу стійкості проти сходження з рейок за умов вкочування гребеня колеса на головку рейки, що оцінюється за кожним комп'ютерним дослідом на ділянці безпосереднього сходження й відображають схильність або потенційну можливість сходження певної одиниці рухомого складу. Використання цього методу розповсюджується на виявлення чинників події сходження різних одиниць рухомого складу за умови розробки адекватних комп'ютерних моделей їх динаміки з врахуванням конструкційних особливостей та технічного стану ходових частин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Garg V.K., Dukkipati R.V. Dynamics of Railway Vehicle Systems. Academic Press, 1984. 407 p.
2. Wickens A.H. Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability. Lisse, the Netherlands: Swets & Zeitlinger B.V., 2003. 286 p.
3. Dusza M. The study of track gauge influence on lateral stability of 4-axle rail vehicle model. // Archives of Transport. 2014. 30(2). Pp. 7-20.
4. Kardas-Cinal E. Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety. // Archives of Transport. 2013. 31(3). Pp. 37-45.
5. Burdzik R., Nowak B., Rozmus J., Słowiński P., Pankiewicz J. Safety in the railway industry. // Archives of Transport. 2017. 44(4). Pp. 15-24.
6. Fan Y-T., Wu W-F. Stability analysis and derailment evaluation of rail vehicles. // Int. J. Heavy Vehicle Systems. 2006. 13(3). Pp.194-211.
7. Molatefi H. On the investigation of wheel flange climb derailment. Mechanism and methods to control it. // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2016. 54(2). Pp. 541-550.
8. Opala M. Study of the derailment safety index Y/Q of the low-floor tram bogies with different types of guidance of independently rotating wheels. // Archives of Transport. 2016. 38(2). Pp. 39-47.
9. Domin R., Domin Iu., Cherniak G., Mostovych A., Konstantidi V., Gryndei P. Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways. // Archives of Transport. 2016. 40(4). Pp. 79-91.
10. Wilson N., Fries R., Haigermoser A., Mrang M., Evans J., Orlava A. Assessment of safety against derailment using simulations and vehicle acceptance tests: a worldwide comparison of state-of-the-art assessment methods. // Journal of Vehicle System Dynamics. 2011. 49. Pp. 1113-1157.
11. Iwnicki S., Stichel S., Orlova A., Hecht M. Dynamics of railway freight vehicles. // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2015. 53(7). Pp. 1-39.
12. Saviz M.R. Dynamic, stability and safety analysis of wagons on md52 bogies with modified suspension springs. // International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (ИТРЕ). 2015. 7(4). Pp. 75-85.
13. Malcolm C. Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio. // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2016. 54(5). Pp. 568-584.

14. Domin R., Domin Yu., Cherniak G. Estimation of stability of flat cars with various types of running gear against derailment. // *Problemy kolejnictwa*. 2019. 63(185). Pp. 119-124.
15. Domin R. *Mechanical Safety of Railway Vehicles*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 133 p.
16. Pogorelov D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software. // *Rail vehicle dynamics and associated problems*. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005. Pp. 13-58.
17. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 354 с.
18. Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Показатель для оценки безопасности схода подвижного состава путем вкатывания колеса на головку рельса // *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. 2010. №5(147). С. 64-71.

REFERENCES

1. Garg, V.K., & Dukkipati, R.V. (1984). *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. Academic Press, 407 p.
2. Wickens, A.H. (2003). *Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability*. Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, the Netherlands, 286 p.
3. Dusza, M. (2014). The study of track gauge influence on lateral stability of 4-axle rail vehicle model. *Archives of Transport*, 30(2), pp. 7-20.
4. Kardas-Cinal, E. (2013). Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety. *Archives of Transport*, 31(3), pp. 37-45.
5. Burdzik, R., Nowak, B., Rozmus, J., Słowiński, P., Pankiewicz, J. (2017). Safety in the railway industry. *Archives of Transport*, 44(4), pp. 15-24.
6. Fan, Y-T., & Wu, W-F. (2006). Stability analysis and derailment evaluation of rail vehicles. *Int. J. Heavy Vehicle Systems*, 13(3), pp.194-211.
7. Molatefi, H. (2016). On the investigation of wheel flange climb derailment. Mechanism and methods to control it. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(2), pp. 541-550.
8. Opala, M. (2016). Study of the derailment safety index Y/Q of the low-floor tram bogies with different types of guidance of independently rotating wheels. *Archives of Transport*, 38(2), pp. 39-47.
9. Domin, R., Domin, Iu., Cherniak, G., Mostovych, A., Konstantidi, V., Gryndei, P. (2016). Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways. *Archives of Transport*, 40(4), pp. 79-91.
10. Wilson, N., Fries, R., Haigermoser, A., Mrang, M., Evans, J., Orlova, A. (2011). Assessment of safety against derailment using simulations and vehicle acceptance tests: a worldwide comparison of state-of-the-art assessment methods. *Journal of Vehicle System Dynamics*, 49, pp. 1113-1157.
11. Iwnicki, S., Stichel, S., Orlova, A., Hecht, M. (2015). Dynamics of railway freight vehicles. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 53(7), pp. 1-39.
12. Saviz, M.R. (2015). Dynamic, stability and safety analysis of wagons on md52 bogies with modified suspension springs. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE)*, 7(4), pp. 75-85.
13. Malcolm, C. (2016). Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 54(5), pp. 568-584.
14. Domin, R., Domin, Yu., Cherniak, G. (2019). Estimation of stability of flat cars with various types of running gear against derailment. *Problemy kolejnictwa*, 63(185), pp. 119-124.
15. Domin R. (2017). *Mechanical Safety of Railway Vehicles*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 133 p.
16. Pogorelov, D.Yu. (2005). Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software. *Rail vehicle dynamics and associated problems*. Gliwice: Silesian University of Technology, pp. 13-58.
17. Нормы для расчета и проектирования вагонов зжелезныкх дорог МПС колеи1520 мм (несамокходныкх) [Norms for the calculation and design of railroad cars of the Ministry of Railways of gauge 1520 mm (not self-propelled)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZHT, 1996, 154 [in Russian].
18. Pogorelov D.Yu. & Simonov V.A. (2010). Pokazatel' dlya otsenki bezopasnosti skhoda podvzhnogo sostava putem vkatyvaniya kolesa na golovku rel'sa [Indicator for assessing the safety of rolling stock derailment by rolling a wheel onto the rail head]. *Vіsник Shkhidnoukr. nats. un-tu ім. V. Dallya : nauk. zhurnal*, № 5 (147), pp. 40-46.

Rostyslav Domin¹, Yurii Domin², Ganna Chernyak³, Volodymyr Nozhenko⁴

¹ Acting Director, Branch "Research and Design and Technological Institute of Railway Transport" JSC "Ukrzaliznytsia", st. I. Fedorova, 39, Kyiv, 03038, Ukraine

² Professor, Department of Railway, Road Transport and Hoisting and Transport Machines, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59a Tsentralny Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine

³ Senior Research Fellow, Department of Railway, Road Transport and Hoisting and Transport Machines, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59a Tsentralny Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine

⁴ Vice-Rector, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 59a Tsentralny Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine

METHOD OF OPERATIONAL INVESTIGATION OF ROLLING STOCK DERAILMENT

The article presents the principles of the method of operational investigation of rolling stock derailment. This method is intended to identify the most significant mechanical reasons for transport accidents in order to find directions to further improving the safety requirements for the state of maintenance of freight cars and tracks on the basis of the data. The developed method establishes a general methodological order of conducting computer simulation of the dynamics of rolling stock of multivariate studies on calculating the safety indicators of train's motion, and shows the significance of technical factors that provoked a certain event. By this method, the operational investigation of rolling stock derailment is based on the development of adequate computer models of dynamics of cars in trains. In this case, in detail, all the features of the car, which descended from the rails, are first. The presented method is based on the principles of factor analysis, where the intervals of varying events are presented in natural units of measurement. In this case, the assessment of security indicators for each research of the experiment plan is also carried out taking into account their dimension. As a result, the function of multiple regressions on the chosen indicator of motion safety allows not only to determine the significance of the factor of the ascent, but also to establish the level of factors, with exceeding the criteria for motion safety, that is, to determine the boundaries of the region with an acceptable level of motion safety.

Keywords: rolling stock, derailment, computer simulation, dynamic of motion safety indicators.

УДК 656.2

Горобченко О. М.^{1*}, Неведров О. В.², Незліна О. А.³, Ткаченко В. А.⁴

¹ Професор кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9868-3852>

² Аспірант кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9347-0973>

³ Доцент кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1613-4057>

⁴ Доцент кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету, вулиця Михайла Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 02000, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5147-0772>

* Автор, відповідальний за листування: gorobchenko.a.n@gmail.com

РОЗРОБКА МЕТОДУ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ПОЇЗНИХ СИТУАЦІЙ

Впровадження інтелектуальних систем керування локомотивом потребує більш якісних підходів до оцінки та контролю поточної поїзної ситуації, ніж ті, які використовуються на сучасному тяговому рухомому складі. Автоматичне виявлення складних нештатних ситуацій в теперішній час не передбачено. Наприклад визначення неефективності дії гальм, перевищення швидкості, наявності переешкод або людей на колії, погіршення тягових властивостей рухомого складу та інше покладається виключно на машиніста локомотива. Враховуючи важливий вплив перелічених факторів на безпеку руху, пропонується включити в функції автоматизованих та інтелектуальних систем керування рухом розпізнавання нештатної ситуації і оповіщення про її виникнення. При керуванні поїздом всі об'єкти класифікації (поїзні ситуації) розбиті на кінцеве число класів. Для кожного класу відомо і вивчено кінцеве число об'єктів – прецедентів. Завдання розпізнавання образів полягає в тому, щоб віднести нову розпізнавану ситуацію до якого-небудь класу. Класифікатором або вирішальним правилом є правило віднесення образу поїзної ситуації до одного з класів на підставі його вектору ознак. Розроблено порядок класифікації поїзних ситуацій, який дозволяє виділяти кластери як завгодно складної форми за умови, що різні частини таких кластерів з'єднані ланцюжками близьких один до одного елементів. Мірою відмінності служить квадрат евклідової відстані

Ключові слова: поїзд, розпізнавання ситуацій, безпека руху, кластеризація, класифікатор.

Вступ. Впровадження інтелектуальних систем керування локомотивом потребує більш якісних підходів до оцінки та контролю поточної поїзної ситуації, ніж ті, які використовуються на сучасному тяговому рухомому складі. В теперішній час основу інформації про поточний стан поїзду системи керування отримують з різноманітних датчиків у вигляді кількісних показників. Однак машиніст локомотива, при керуванні поїздом керується в основному якісними показниками, що найбільш природньо для роботи людського мозку та поведінки людини [1, 2].

Розмаїтість експлуатаційних умов, під якими звичайно розуміють вагу і довжину поїзда, його опір руху, порядок пропуску поїзда по перегонах, погодні умови, установлені попередженнями обмеження швидкості руху та ін., ставить перед машиністом у кожній поїзді завдання вибору і реалізації раціонального режиму ведення поїзда, що відповідає саме даним умовам [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. Існує декілька підходів до формалізації умов, в яких працює людина-оператор. В роботі [5] виконана оцінка надійності людини, представлений новий підхід до оцінки показників людської діяльності щодо залежностей серед відповідних PSF, що називається індексом ефективності роботи залізниць (HuPeROI). Результати показують, що HuPeROI можна ефективно використовувати для оцінки ефективності роботи операторів як функції якості відповідних R-PSF. Однак в цих роботах не в повній мірі проведено оцінку інформаційної складовою факторів, що впливають на безпеку руху. Це не дає розуміння того, який інформаційний вклад в опис та формалізацію небезпечної ситуації надає кожен з факторів. Досвід показує, що виникнення окремих транспортних подій стало можливим тому, що локомотивна бригада невчасно виявила та відреагувала на розвиток НС [6].

Велику низку робіт при описанні поїзних ситуацій спрямовано на дослідження найбільш енергоефективних способів ведення поїзду [7–10]. Тут процес керування поїздом розглядається як вибір оптимальних траєкторій руху з одночасним урахуванням максимальної кількості різних факторів. Причому в різних роботах наведено різний перелік впливів на ефективність керування поїздом. При впровадженні інтелектуальних систем керування рухом потрібно мати повний перелік факторів, що впливають на енергоефективність перевізного процесу [11]. Крім того, для більш якісного їх використання необхідно провести оцінку їх інформативності та впливу на якість керування поїздом [12]. Так в роботі [13] розглянуто системні властивості інформаційних потоків, представлено модель, що дозволяє реєструвати первинну інформацію, яка відображає синхронно тимчасові процеси донормальні, аномальні, постнормальні, а також способи організації синхронно записаних первинних даних та способи їх формування в єдиний інформаційний простір. Але тут не розглянуто інформаційних потоків, що надходять безпосередньо до локомотивної бригади та дозволяють найбільш якісно визначити поточну поїзну ситуацію.

Мета і завдання дослідження. В процесі керування рухом поїзду перед машиністами та автоматизованими системами керування постає важливе завдання – забезпечення безпеки руху та енергоефективності процесу перевезень. Для цього необхідно виявляти нештатні ситуації на етапі їх виникнення та не допускати їх розвитку в аварію або катастрофу. Розпізнавання нештатної ситуації дуже відповідальний процес.

Автоматичне виявлення складних нештатних ситуацій в теперішній час не передбачено. Наприклад визначення неефективності дії гальм, перевищення швидкості, наявності перешкод або людей на колії, погіршення тягових властивостей рухомого складу та інше покладається виключно на машиніста локомотива. Враховуючи важливий вплив перелічених факторів на безпеку руху, пропонується включити в функції автоматизованих та інтелектуальних систем керування рухом розпізнавання нештатної ситуації і оповіщення про її виникнення.

Методи кластерного аналізу при визначення основних підходів до розпізнавання поїзних ситуацій. Завдання кластерного аналізу полягає в тому, щоб на підставі даних, що містяться у множині Ω , розбити множину об'єктів ω на m [14] (m – ціле число, що відповідає кількості простих поїзних ситуацій) кластерів (підмножин)

C_1, C_2, \dots, C_m , так, щоб кожен об'єкт ω_j належав одній і тільки одній підмножині розбиття і щоб об'єкти, що належать одному і тому ж кластеру, були східними, в той час як об'єкти, що належать різним кластерам були різнорідними.

Рішенням задачі кластерного аналізу є розбиття, що задовольняє деякому критерію оптимальності. Цей критерій може представляти собою деякий функціонал, що виражає рівні бажаності різних розбивок і угруповань, який називають цільовою функцією [15]. Наприклад, як цільова функція може бути взята внутрішньогрупова сума квадратів відхилень

$$W = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2, \quad (1)$$

де x_j – являє собою вимірювання j -го об'єкта.

Для вирішення задачі кластерного аналізу необхідно визначити поняття подібності і різнорідності.

Об'єкти i -й та j -й потрапляли б в один кластер, коли відстань (віддаленість) між точками X_i і X_j була б досить маленькою і потрапляли б в різні кластери, коли ця відстань була б досить великою. Таким чином, попадання в один чи різні кластери об'єктів визначається поняттям відстані між X_i і X_j з E_p , де E_p – p -мірне евклідовий простір. Невід'ємна функція $d(X_i, X_j)$ називається функцією відстані (метрикою), якщо:

а) $d(X_i, X_j) \geq 0$, для всіх X_i і X_j з E_p

б) $d(X_i, X_j) = 0$, тоді і тільки тоді, коли $X_i = X_j$

в) $d(X_i, X_j) = d(X_j, X_i)$

г) $d(X_i, X_j) \leq d(X_i, X_k) + d(X_k, X_j)$, де X_j, X_i і X_k – будь-які три вектори з E_p .

Значення $d(X_i, X_j)$ для X_i і X_j називається відстанню між X_i і X_j і еквівалентно відстані між G_i і G_j відповідно обраним характеристикам $(f_1, f_2, f_3, \dots, f_p)$.

Найбільш часто вживаються наступні функції відстаней:

1. Евклідова відстань
$$d_2(X_i, X_j) = \left[\sum_{k=1}^p (x_{ki} - x_{kj})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

2. l_1 – норма
$$d_1(X_i, X_j) = \left[\sum_{k=1}^p |x_{ki} - x_{kj}| \right].$$

3. Сюзремум-норма
$$d_\infty(X_i, X_j) = \sup \{ |x_{ki} - x_{kj}| \}$$

 $k = 1, 2, \dots, p$

4. l_p – норма
$$d_p(X_i, X_j) = \left[\sum_{k=1}^p |x_{ki} - x_{kj}|^p \right]^{\frac{1}{p}}.$$

Евклідова метрика є найбільш популярною. Метрика l_1 найбільш легка для обчислень. Сюзремум-норма рахується легко і включає в себе процедуру упорядкування, а l_p -норма охоплює функції відстаней 1, 2, 3

Нехай n вимірювань X_1, X_2, \dots, X_n подані у вигляді матриці даних розміром $p \times n$:

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{pmatrix} = (X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (2)$$

Тоді відстань між парами векторів $d(X_i, X_j)$ може бути представлена у вигляді симетричної матриці відстаней:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Поняттям, протилежним відстані, є поняття подібності між об'єктами ω_i та ω_j . Не негативна функція $S(X_i, X_j) = S_{ij}$ є мірою подібності, якщо:

- 1) $0 \leq S(X_i, X_j) < 1$ для $X_i \neq X_j$
- 2) $S(X_i, X_j) = 1$
- 3) $S(X_i, X_j) = S(X_j, X_i)$

Пари значень мір подібності можна поєднати в матрицю подібності:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Величину S_{ij} називають коефіцієнтом подібності.

Розробка алгоритму кластеризації поїзних ситуацій. Розглянемо $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$ як множину кластерів $\{I_1\}, \{I_2\}, \dots, \{I_n\}$. Виберемо два з них, наприклад, I_i та I_j , які в деякому сенсі більш близькі один до одного й об'єднаємо їх в один кластер. Нова множина кластерів, що складається вже з $n-1$ кластерів, буде $\{I_1\}, \{I_2\}, \dots, \{I_i, I_j\}, \dots, \{I_n\}$.

Повторюючи процес, отримаємо послідовні множини кластерів, що складаються з $(n-2)$, $(n-3)$, $(n-4)$ і т. д. кластерів. В кінці процедури можна отримати кластер, що складається з n об'єктів і збігається з початковою множиною $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$.

Як міру відстані візьмемо квадрат евклідової метрики d_{ij}^2 і обчислимо матрицю $D = \{d_{ij}^2\}$, де d_{ij}^2 - квадрат відстані між I_i та I_j (табл. 1).

Таблиця 1. Попередня матриця відстаней

	I_1	I_2	I_3	....	I_n
I_1	0	d_{12}^2	d_{13}^2	....	d_{1n}^2
I_2		0	d_{23}^2	....	d_{2n}^2
I_3			0	....	d_{3n}^2
....			
I_n					0

Нехай відстань між I_i та I_j буде мінімальною:

$$d_{ij}^2 = \min \{d_{ij}^2, i \neq j\}. \quad (5)$$

Утворимо за допомогою I_i і I_j новий кластер $\{I_i, I_j\}$. Побудуємо нову $((n-1), (n-1))$ матрицю відстаней (табл. 2)

Таблиця 2. Матриця відстаней

	{I _i , I _j }	I ₁	I ₂	I ₃	....	I _n
{I _i ; I _j }	0	d _{ij} ² ₁	d _{ij} ² ₂	d _{ij} ² ₃	....	d _{ij} ² _n
I ₁		0	d ₁₂ ²	d ₁₃	....	d _{1n} ²
I ₂			0	d _{ij} ² ₁	....	d _{2n}
I ₃				0	....	d _{3n}
I _n						0

У ній (n-2) рядки для останньої матриці взяті з попередньої, а перший рядок обчислено заново. Обчислення можуть бути зведені до мінімуму, якщо вдасться виразити $d_{ij}^2, k = 1, 2, \dots, n; (k \neq i \neq j)$ через елементи первісної матриці.

Початково визначено відстань лише між одноелементними кластерами, але треба визначати відстані між кластерами, що містить більш ніж один елемент. Це можна зробити різними способами, в залежності від обраного способу ми отримаємо алгоритми кластерного аналізу з різними властивостями. Можна, наприклад, покласти відстань між кластером $i + j$ та деяким іншим кластером k , рівним середньому арифметичному з відстаней між кластерами i і k і кластерами j і k :

$$d_{i+j,k} = \frac{1}{2} (d_{ik} + d_{jk}). \quad (6)$$

Але можна також визначити $d_{i+j,k}$ як мінімальне з цих двох відстаней:

$$d_{i+j,k} = \min (d_{ik} + d_{jk}). \quad (7)$$

Таким чином, описаний перший крок роботи агломеративного ієрархічного алгоритму. Наступні кроки аналогічні.

Досить широкий клас алгоритмів може бути отриманий, якщо для перерахунку відстаней використовувати таку загальну формулу:

$$d_{i+j,k} = A(w) \min(d_{ik} d_{jk}) + B(w) \max(d_{ik} d_{jk}), \quad (8)$$

де

$$A(w) = \frac{wn_i}{wn_i + n_j}, \text{ якщо } d_{ik} \leq d_{jk}$$

$$A(w) = \frac{wn_j}{n_j + wn_i}, \text{ якщо } d_{ik} > d_{jk}$$

$$B(w) = \frac{n_i}{wn_i + n_j}, \text{ якщо } d_{ik} \leq d_{jk}$$

$$B(w) = \frac{n_j}{wn_j + n_i}, \text{ якщо } d_{ik} > d_{jk}$$

де n_i і n_j – кількість елементів у кластерах i та j , а w – вільний параметр, вибір якого визначає конкретний алгоритм. Наприклад, при $w = 1$ ми одержуємо так званий алгоритм «середнього зв'язку», для якого формула перерахунку відстаней приймає вигляд:

$$d_{i+j,k} = \frac{n_i}{n_i + n_j} d_{ik} + \frac{n_j}{n_i + n_j} d_{jk}. \quad (9)$$

В даному випадку відстань між двома кластерами на кожному кроці роботи алгоритму виявляється рівною середньому арифметичному з відстаней між усіма такими парами елементів, що один елемент пари належить до одного кластера, інший – до іншого.

Наочний сенс параметра w стає зрозумілим, якщо припустити $w \rightarrow \infty$. Формула перерахунку відстаней приймає вигляд:

$$d_{i+j,k} = \min(d_{ik}, d_{jk}). \quad (10)$$

Це буде так званий алгоритм «найближчого сусіда», який дозволяє виділяти кластери як завгодно складної форми за умови, що різні частини таких кластерів з'єднані ланцюжками близьких один до одного елементів. В даному випадку відстань між двома кластерами на кожному кроці роботи алгоритму виявляється рівною відстані між двома самими близькими елементами, що належать до цих двох кластерів.

Досить часто припускають, що початкові відстані (відмінності) між елементами, що групуються, задані. У деяких задачах це дійсно так. Однак, задаються тільки об'єкти та їх характеристики і матрицю відстаней будують виходячи з цих даних. Залежно від того, обчислюються відстані між об'єктами або між характеристиками об'єктів, використовуються різні способи.

У разі кластер аналізу об'єктів найбільш часто мірою відмінності служить квадрат евклідової відстані

$$d_{ij}^2 = \sum_{h=1}^m (x_{ih} - x_{jh})^2, \quad (11)$$

де x_{ih}, x_{jh} – значення h -ї ознаки для i -го та j -го об'єктів;
 m – число характеристик.

Якщо ознакам приписується різну вагу, то ці ваги можна врахувати при обчисленні відстані

$$\delta_{ij}^2 = \sum_{h=1}^m w_h (x_{ih} - x_{jh})^2. \quad (12)$$

Іноді як міра відмінності використовується відстань, що обчислюється за формулою

$$\Delta_{ij} = \sum_{h=1}^m |x_{ih} - x_{jh}|, \quad (13)$$

які називають: "хеммінговим", "манхеттенським" або "сіті-блок" відстанню.

Природною мірою подібності характеристик об'єктів у багатьох задачах є коефіцієнт кореляції між ними

$$r_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^N (x_{hi} - m_i)(x_{hj} - m_j)}{\delta_i \delta_j}, \quad (14)$$

де $m_i, m_j, \delta_i, \delta_j$ - відповідно середні і середньоквадратичні відхилення для характеристик i та j . Мірою відмінності між характеристиками може служити величина $1 - r$. У деяких завданнях знак коефіцієнта кореляції неважливий і залежить лише від

вибору одиниці вимірювання. В цьому випадку в якості міри відмінності між характеристиками використовується $|1 - r_{ij}|$.

Метод визначення поїзної ситуації на основі кластерного аналізу. Отримання вектору характеристик поточної поїзної ситуації у вигляді:

$$C_{nom} = \begin{pmatrix} f_{1пот} \\ f_{2пот} \\ \dots \\ f_{iпот} \\ \dots \\ f_{nпот} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

де $f_{iпот}$ – значення i -го фактору, що характеризує поїзну ситуацію.

Нормалізація отриманих величин факторів згідно з виразом

$$f'_{iпот} = \frac{f_{iпот} - f_{imin}}{f_{imax} - f_{imin}}, \quad (16)$$

де f_{imax} (f_{imin}) – максимально (мінімально) можливе значення i -го фактора в експлуатації.

Визначити евклідову відстань між першою ситуацією та поточною C_{nom}

$$D(c_1) = \sqrt{\sum_{h=1}^n (f(c_1)_h - f_{hпот})^2}, \quad (17)$$

де $f(c_1)_h$ – значення h -го фактора, що характеризує ситуацію c_1 .

Визначити всі відстані між C_{nom} та $D(c_i)$, при $i \in [1;12]$ згідно (17).

Перерахувати значення відстаней $D(c_i)$ у відповідності до вагових коефіцієнтів

$$D'(c_i) = D(c_i) \cdot \gamma_i, \quad (18)$$

де $D'(c_i)$ – приведені значення відстані між поточною ситуацією та i -м кластером (елементарною поїзною ситуацією);

γ_i – ваговий коефіцієнт, що визначає відносну важливість кожної i -ї ситуації.

Таким чином отримана множина D , що складається з відстаней від поточних факторів, що формують поточну ситуацію керування локомотивом, від базових поїзних ситуацій.

Елементи D ранжуються від мінімального до максимального значення $D = \{D_{min}, \dots, D_i, \dots, D_{max}\}$.

Перший елемент визначає основну ситуацію, другий і декілька наступних елементів визначають додаткові впливи на основну поїзну ситуацію. Знання основної та впливаючих поїзних ситуацій необхідно для вироблення керуючого рішення, що враховує всі наслідки для тієї або іншої ситуації.

Висновки. Розглядаючи перелік поїзних ситуацій можна сказати, що під час керування поїздом машиніст часто знаходиться в складних обставинах, що обумовлені одночасним знаходженням у декількох поїзних ситуаціях. І якщо для людини постійний моніторинг та визначення обстановки це природній процес, то для інтелектуальних та автоматизованих систем керування необхідно розробити формалізоване описання цієї процедури.

В разі керування поїздом всі об'єкти класифікації (поїзні ситуації) розбиті на кінцеве число класів. Для кожного класу відомо і вивчено кінцеве число об'єктів – прецедентів. Завдання розпізнавання образів полягає в тому, щоб віднести нову розпізнавану ситуацію до будь-якого класу. Класифікатором або вирішальним правилом є правило віднесення образу поїзної ситуації до одного з класів на підставі його вектору ознак.

Розроблено порядок класифікації поїзних ситуацій, який дозволяє виділяти кластери як заведено складної форми за умови, що різні частини таких кластерів з'єднані ланцюжками близьких один до одного елементів. Мірою відмінності служить квадрат евклідової відстані.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kuric I. et al. Research of vehicle control informative functioning capacity //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. Vol. 776. №. 1. P. 012036.
2. Butko, T., Babanin, A., Gorobchenko, A. Rationale for the type of the membership function of fuzzy parameters of locomotive intelligent control systems //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. №. 3 (73). P. 4-8.
3. Горобченко О. М. Моделирование возникновения нештатной ситуации в эргатичной системе локомотивна бригада-поїзд //Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. 2014. №. 38. С. 144-147.
4. Горобченко О. М. Розробка методу оцінки факторів, що впливають на дії локомотивних бригад в нештатних ситуаціях //Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2010. №. 24. С. 113-121
5. Kyriakidis M., Majumdar A., Ochieng W. Y. The human performance railway operational index—a novel approach to assess human performance for railway operations //Reliability engineering & system safety. 2018. Val. 170. P. 226-243.
6. Горобченко О., Слободянюк М., Неведров О. Формалізація поїзних ситуацій при керуванні локомотивом на основі методів нечіткої логіки. Транспортні системи і технології, № 34, С. 65-70, doi:10.32703/2617-9040-2019-34-1-5.
7. Gorobchenko O. et al. Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(3-91), 60-67. doi:10.15587/1729-4061.2018.121713.
8. Zhou Y. et al. Integrated optimization on train control and timetable to minimize net energy consumption of metro lines //Journal of Advanced Transportation. 2018. Vol. 2018.
9. Jia J. et al. Designing train-speed trajectory with energy efficiency and service quality. Engineering Optimization. 2018. Val. 50. №. 5. P. 797-818.
10. Фалендиш А., Гатченко В., Возненко С., Клецька, О., Барибін, М. Математичне моделювання основних параметрів в тягових розрахунках. Транспортні системи і технології, (35), С. 102-112. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
11. Gorobchenko O. et al. Intelligent locomotive decision support system structure development and operation quality assessment //2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). IEEE, 2018. P. 239-243.
12. Gorobchenko O., Nevedrov O. Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and as-sessment of its effectiveness. Archives of Transport. 2020. Val. 56. №. 4. P. 47-58.
13. Holub, H., Kulbovskyi, I., Skok, P., Melnychenko, O., Kharuta, V., Bambura, O., Tretynchenko, Y. System model of information flows in networks of the electric supply system in transport infrastructure projects. Transport Means - Proceedings of the International Conference. 2020, 132-135.
14. Wierzchoń S. T., Kłopotek M. A. Modern algorithms of cluster analysis. Springer, 2018. 421 p.
15. Anderberg M. R. Cluster analysis for applications: probability and mathematical statistics: a series of monographs and textbooks. – Academic press, 2014. Vol. 19.

REFERENCES

1. Kuric, I., Gorobchenko, O., Litikova, O., Gritsuk, I., Mateichyk, V., Bulgakov, M., & Klackova, I. (2020). Research of vehicle control informative functioning capacity. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 776(1) doi:10.1088/1757-899X/776/1/012036.
2. Butko, T., Babanin, A. & Gorobchenko, A. (2015). Rationale for the type of the membership function of fuzzy parameters of locomotive intelligent control systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3), 4-8. doi:10.15587/1729-4061.2015.35996.
3. Горобченко, О. М. (2014). Моделирование возникновения нештатной ситуации в эргатичной системе локомотивна бригада-поїзд. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту* (38). С. 144-147.
4. Горобченко, О. М. (2010). Розробка методу оцінки факторів, що впливають на дії локомотивних бригад в нештатних ситуаціях. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*, (24). С. 113-121.
5. Kyriakidis, M., Majumdar, A., & Ochieng, W. Y. (2018). The human performance railway operational index—a novel approach to assess human performance for railway operations. *Reliability engineering & system safety*, 170, 226-243.
6. Gorobchenko, O., Slobodianiuk, M., & Nevedrov, O. (2019). Formalization situations at train locomotive management on the basis of fuzzy logic. *Transport Systems and Technologies*, (34), 65-70. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-5>

7. Gorobchenko, O., Fomin, O., Fomin, V., & Kovalenko, V. (2018). Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3-91), 60-67. doi:10.15587/1729-4061.2018.121713.
8. Zhou, Y., Bai, Y., Li, J., Mao, B., & Li, T. (2018). Integrated optimization on train control and timetable to minimize net energy consumption of metro lines. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
9. Jia, J., Yang, K., Yang, L., Gao, Y., & Li, S. (2018). Designing train-speed trajectory with energy efficiency and service quality. *Engineering Optimization*, 50(5), 797-818.
10. Falendish, A., Hatchenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Varybin, M. (2020). Математичне моделювання основних параметрів в тягових розрахунках. *Транспортні системи і технології*, (35), 102-112. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
11. Gorobchenko, O., Fomin, O., Gritsuk, I., Saravas, V., Grytsuk, Y., Bulgakov, M., . . . Zinchenko, D. (2018). Intelligent locomotive decision support system structure development and operation quality assessment. Paper presented at the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2018 - Proceedings, 2018-January 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487.
12. Gorobchenko, O., Nevedrov, O., (2020). Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*, 56(4), 47- 58. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517>.
13. Holub, H., Kulbovskiy, I., Skok, P., Melnychenko, O., Kharuta, V., Bambura, O., & Tretynychenko, Y. (2020). System model of information flows in networks of the electric supply system in transport infrastructure projects. Paper presented at the Transport Means - Proceedings of the International Conference, 132-135.
14. Wierzchoń, S. T., & Kłopotek, M. (2018). *Modern algorithms of cluster analysis* (421 p.). Berlin, Germany: Springer.
15. Anderberg, M. R. (2014). *Cluster analysis for applications: probability and mathematical statistics: a series of monographs and textbooks* (Vol. 19). Academic press.

Gorobchenko O,^{1*}, Nevedrov O², Nezlina O³, Tkachenko V.⁴

¹ Professor of the Department of Electromechanics and Railway Rolling Stock, State University of Infrastructure and Technology, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9868-3852>

² Postgraduate student of the Department of Electromechanics and Railway Rolling Stock, State University of Infrastructure and Technologies, vul. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9347-0973>

³ Associate Professor of Electromechanics and Railway Rolling Stock, State University of Infrastructure and Technology, st. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1613-4057>

⁴ Associate Professor of the Department of Transport Law and Logistics, National Transport University, M. Omelianovycha-Pavlenka Str., 1, Kyiv, 01010, Ukraine

* Author responsible for correspondence: gorobchenko.a.n@gmail.com

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CLUSTERIZATION OF TRAIN SITUATIONS

The introduction of intelligent locomotive control systems requires better approaches to assessing and monitoring the current train situation than those used in modern traction rolling stock. Automatic detection of complex abnormal situations is currently not provided. For example, determining the inefficiency of the brakes, speeding, the presence of obstacles or people on the track, the deterioration of the traction properties of rolling stock, etc. relies solely on the driver of the locomotive. Given the important impact of these factors on traffic safety, it is proposed to include in the functions of automated and intelligent traffic control systems recognition of abnormal situations and notification of its occurrence. When driving a train, all objects of classification (train situations) are divided into a finite number of classes. A finite number of precedent objects are known and studied for each class. The task of pattern recognition is to assign a new recognizable situation to a class. The classifier or decisive rule is the rule of assigning the image of a train situation to one of the classes on the basis of its vector of features. An order of classification of train situations has been developed, which allows to allocate clusters of any complex shape, provided that different parts of such clusters are connected by chains of close to each other elements. The measure of difference is the square of the Euclidean distance.

Keywords: train, situation recognition, traffic safety, clustering, classifier.

UDC 656.11

Ivan Kulbovskyi¹, Halyna Holub^{2}, Viktor Melenchuk³, Viktor Chmyr⁴*

¹ Department of automation and computer-integrated transport technologies, State University of Infrastructure and Technologies, srt. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5329-3842>

² Department of automation and computer-integrated transport technologies, State University of Infrastructure and Technologies, str. Kyrylivska, 9, Kyiv, 04071, Ukraine. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4028-1025>

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 Vehicles and Special Equipment, National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, str. Shevchenko, 46, Khmelnytsky, 29000, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0465-2589>

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

DEVELOPMENT OF A SYSTEM MODEL OF TECHNICAL OPERATION MANAGEMENT IN TRANSPORT INFRASTRUCTURE PROJECTS

The article considers the problems of quality management of repair and operation of technical means in projects of development and maintenance of transport infrastructure, which is the most important factor in improving living standards, economic, social and environmental safety. The project quality management system and planning methodology are considered. It is investigated that in order to improve this system it is necessary to solve the problem of integration of quality management principles and their adaptation to transport infrastructure projects on quality management of repair and operation of technical means and the ways of solution are shown.

A set of interrelated organizational and technological tasks and measures aimed at restoring the normative transport and operational indicators of repair and operation of technical means of transport is considered.

It is investigated that the process of project quality assurance at the level of quality management in transport infrastructure projects consists of the adoption of planned systematic measures to ensure the implementation of all envisaged processes. On the basis of researches the system model of criteria by means of which it is possible to define system efficiency of development and realization of the corresponding projects of transport infrastructure is offered.

As a result of solving this problem, a model of management and decision support for diagnostics of technical means in transport infrastructure projects has been developed, which opens prospects for planning and timely maintenance and repair of technical means of transport to ensure and improve traffic safety.

Keywords: *technical means, model, control system, monitoring, project, quality, system analysis.*

Introduction. In today's market there is an increased interest in the issue of project management quality. Increased interest in quality management of repair and operation of technical means in projects of development and maintenance of transport infrastructure is the most important factor in improving living standards, economic, social and environmental safety. It is almost impossible to solve this problem only by controlling the system, ie by traditional methods.

There should be a comprehensive, systematic approach, the implementation of which is possible only within the management system based on systems analysis, namely the development of strategy and organization of the technological process of operation of technical means [1].

Analysis of recent research and problem statement. One of the key issues in the development of quality management of repair and operation of technical means in projects of development and maintenance of transport infrastructure of Ukraine is project activity. Accordingly, the relevance of the study of integration issues of quality management, as well as the methodology of organization, planning, management, coordination of human, financial and logistical resources during the life cycle, which aims to effectively achieve the project goal and defined results in terms of composition and scope of work, their cost, sometimes, quality through the application of modern methods of management technologies [2].

The most important parameter of the project, which can and should be managed is its quality, and quality management involves the processes necessary to meet the needs for which it is designed, as well as the quality and products of the project [3]. Examining the project quality management system and planning methodology, the problem of integration of quality management principles and their adaptation to transport infrastructure projects for quality management of repair and operation of technical means remains relevant, which requires further systematic research.

The purpose and tasks of the study. The purpose of the study is to form a system model for ensuring the quality of design work during operation, repair and maintenance of technical means of transport.

Objectives of the study: 1. To analyze the problems of quality management of repair and operation of technical means in projects of development and maintenance of transport infrastructure. 2. Investigate a set of technological tasks and measures that are necessary to ensure the operation of technical means in transport infrastructure projects. 3. Define procedures for the implementation of transport infrastructure projects for the operation of technical means of transport. 4. Develop a system model for managing the operation of technical means of transport.

Materials and methods of research. Recently, quality management is perceived in its final form as the final product. However, the problem of improving the quality of products and services is so complex and diverse that its successful solution is possible only if all participants in the production and technological process of repair and operation of technical means not only care about the pragmatic side of this case, but also form a modern system of views. , will improve the system and quality management, will develop the planning methodology in infrastructure projects [4].

Quality in modern economic conditions is an integral target characteristic of each project product. Without compliance with the planned parameters, quality standards of the project object it is impossible to achieve the goal.

Under the project management we will consider a set of interrelated organizational and technological tasks and measures aimed at restoring the normative transport and operational indicators of repair and operation of technical means of transport and carried out under financial and other resource constraints in a timely manner. The main reason for the development and implementation of projects for the operation of technical means of transport is non-compliance with regulatory indicators.

Within project management, there are two types of processes, the first of which are management processes that are common regardless of the type of project, aimed at achieving a common goal and include such groups of processes as initiation, planning, implementation, monitoring and management and completion. The second type of process is a product-oriented

process and consists in determining the main properties, characteristics and purpose of the product, with the subsequent implementation of this complex in reality, in accordance with the interests of all stakeholders in creating a project product. Good project management, aimed at both groups of processes, is not enough to succeed. The key to success is a detailed, specific, measurable quality criterion for managing all types of project processes [5]. Therefore, there is a need to integrate quality management in the management of all types of processes, which will meet the requirements of the customer not only the quality of the final product of the project, but also its quality functional system.

The main parameter of the project quality is the quality of the product, namely the transportation of passengers, goods, which is the result of execution. The quality of a product or service is often understood as a set of its properties that determine the level of ability to meet certain needs of consumers in accordance with their purpose.

In the management of the quality of operation and repair of technical means in transport infrastructure projects, the concept of «quality» is considered in four aspects [6]:

1) product quality as compliance with market needs and consumer expectations, which is achieved through accurate and effective identification of customer needs and expectations in order to meet them;

2) the quality of development and planning, which is achieved through detailed and careful development of the project and its product;

3) the quality of work on the project in accordance with the planning documentation, which is ensured by compliance with the implementation of its plan, as well as ensuring the developed characteristics of the product and the project itself;

4) the quality of resources involved in the implementation of the project and is achieved through high-quality logistics of the project throughout its life cycle.

The quality assurance process at the level of quality management in transport infrastructure projects consists of the adoption of planned systematic measures to ensure the implementation of all envisaged processes necessary for the project to meet quality requirements.

The planning methodology is the most important factor influencing the quality of the project and includes the following stages:

1. Definition of goals and their description. Quite often projects start without a clear goal.
2. Definition of technological stages. Implementation technology must be selected for the project, which determines the stages of development. One of the typical planning mistakes is the inconsistency of the technological cycle plan.
3. For technological stages it is necessary to define the list of tasks, to specify their interrelation, sequence and the forecasted duration.
4. The need to agree on the resources allocated to the project. It should be noted that all resources of the organization should be distributed centrally. Quite often there is a planning error due to the fact that some scarce resources are used simultaneously in two different projects at the same time.
5. Analysis and assessment of risks lead to the emergence of new tasks and to attract additional resources.
6. Determining the price of resources determines the budget. One of the common mistakes is that the budget is set without paying attention to the projected cost of the project.

The formation of a quality assurance plan should be based on a systematic approach. The quality management process is a component of any project planning.

Quality assurance involves defining a standard, appropriate methods and quality requirements. The integration of the requirements of ISO 10006: 2005 and PMBOK [7] makes it possible to

form a logical set of quality assurance measures, which can be presented in the form of a quality assurance plan. Thus, the quality of the final result can be influenced by the method of influencing its forming processes. All processes are elements of the system in which they operate. The quality of construction of this system and the mechanism of its functioning affects the quality of its components.

Transport infrastructure projects for the operation of technical means of transport are not typical and are implemented according to a certain procedure. Quality parameters and the process of its provision should be formed for each project separately. The task of ensuring the quality of the project at the appropriate level is relevant at all stages of its life cycle and is implemented by various procedures that are interrelated [8].

In order to ensure compliance of the achieved results of the project with the previously established indicators, it is necessary to implement quality management through the following processes: planning, quality assurance and control [9].

Quality planning is carried out as part of project planning, which must include work, the implementation of which ensures the quality of results. The quality plan should determine how the project will ensure the quality of work from the standpoint of organizational structure, resources, technological support. An important element, at the stage of quality planning, is the development of documents governing actions for quality control of project management and quality management procedures. Quality planning begins with defining quality objectives, policies and standards related to the content of the project. The actions and responsibilities of the team members, which are necessary to achieve the goals and adhere to the standards, are then determined. The result of quality planning [10, 11] is presented in the form of quality assurance plans and management processes that ensure the implementation of these plans, and is achieved by synchronization with the main (content planning, schedule, cost) and auxiliary (risk planning, team) planning processes.

Quality assurance is carried out through the process of performing planned systematic operations on quality management, which ensure the implementation of all the envisaged processes necessary for the project to meet the established quality requirements. To control the quality of the project, it is necessary to define control points and criteria, to determine the compliance of project quality with the standards set in the quality assurance plan. The knowledge and experience of quality assurance gained in the current project should be used in drawing up quality assurance plans for subsequent projects.

The system model of criteria of management of operation of technical means thanks to which it is possible to define system efficiency of development and realization of the corresponding projects of transport infrastructure of improvement of management of quality of repair and maintenance of technical means of transport is presented. The system model of quality of design works at operation, repair and the maintenance of technical means of transport is the following:

$$A = \left(\frac{\int_0^T \phi_1(i, G_i, \overline{G}_1) |G_1(i) - \overline{G}_1(i)| di}{\int_0^T \overline{G}_1(i) di} \right) \quad (1)$$

$$G_i = G_{1i}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

where G_i – value that characterizes the production and technological potential in transport infrastructure projects in the i -th period of time;

G_{ii} – useful work performed by transport infrastructure units for operation and repair of technical means in the i -th period of time.

$$G_{ii} = \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N h_{ji} L_{ji} \right) (1+r_i) + \left(\sum_{k=1}^K a_k c_k q_k \right) (1+r_i) + \left(\sum_{j=1}^M b_j \tilde{c}_j \tilde{q}_j \right) (1+r_i) + \left(\sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P c_{1ip} Q_{ip} \right) * \\ *(1+r_i) = (1+r_i) \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N h_{ji} L_{ji} + \sum_{k=1}^K a_k c_k q_k + \sum_{j=1}^M b_j \tilde{c}_j \tilde{q}_j + \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P c_{1ip} Q_{ip} \right); \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K; p = 1, 2, \dots, P,$

where r_i – the set level of profitability of functioning of technological processes of operation and repair of technical means of transport on the i -th period of time ($0 < r_i < 1$); .

c_{1ip} – the cost of the service provided to the p -name for the i -th period of time;

Q_{ip} – number of services provided and performance of works in the environment of functioning of technological processes on repair and operation on the i -th period of time.

$$h_{ji} = h_{zij} k_{zi} + h_{Mj} k_{Mi} + h_{zrj} k_{zri} + h_{eij} k_{ei} + h_{Tij} k_{Ti} + h_{CTij} k_{CTi}; \quad (4)$$

where h_{zij} , h_{Mj} , h_{zrj} – according to the standards of wage costs, materials, spare parts for the mechanisms of the j -th name in the base period;

k_{zi} , k_{Mi} , k_{zri} – respectively, the index of growth of costs for wages, materials, spare parts for the i -th period of time;

h_{eij} , h_{Tij} , h_{CTij} – respectively, the standards of costs for electricity, heat and compressed air in the base period;

k_{ei} , k_{Ti} , k_{CTi} – respectively, the growth indices of regulatory costs for electricity, heat and compressed air in the i -th period of time.

$$A_i = \left| G_{1i} - \overline{G_{1i}} \right|, \text{ for } G_{1i} > \overline{G_{1i}}, \quad (5)$$

$$A_i = \int_0^T \phi_1(i, G_1, \overline{G_1}) \left| G_1(i) - \overline{G_1}(i) \right| di, \quad (6)$$

where $\phi_1(i, G_1, \overline{G_1})$ – weight function, which shows that the same deviations at different points in time are not the same.

Criteria for system efficiency of works and implementation of relevant transport infrastructure projects are defined by expression:

$$E_c = \max \{R_a, P_w\} \wedge \max \{C_a, M_o, K_e, S_{tm}\} \wedge \max \{P_{ip}\} \wedge \min \{T, E, C_m, C_e, C, L_{js}\}, \quad (7)$$

where R_a – return on assets; P_w – productivity; C_a – capital adequacy; M_o – mechanical armament; K_e – equipment load factor; S_{tm} – suitability of technical means; P_{ip} – technological process productivity; T – technological process costs; E – energy consumption of the technological process; C_m – material costs; C_e – cost of equipment; C – cost of operation of technological processes; L_{js} – level of job specialization.

Quality control is a mandatory element in order to achieve the planned quality indicators of the project in the process of its provision. Which on the basis of intermediate observations of project results makes it possible to determine compliance with regulations and standards and to develop actions to eliminate deviations [12-15].

Taking into account the system approach of the process, a model of management and decision-making support of diagnostics of technical means in transport infrastructure projects has been developed. Due to the functional and information communication and information exchange processes between diagnostic procedures, the model is presented in the form of a diagram (Fig. 1). The model itself reflects the mechanism of the intellectual decision support system in assessing the state of technical means [1, 14], as well as the prospects of planning and timely maintenance and repair.

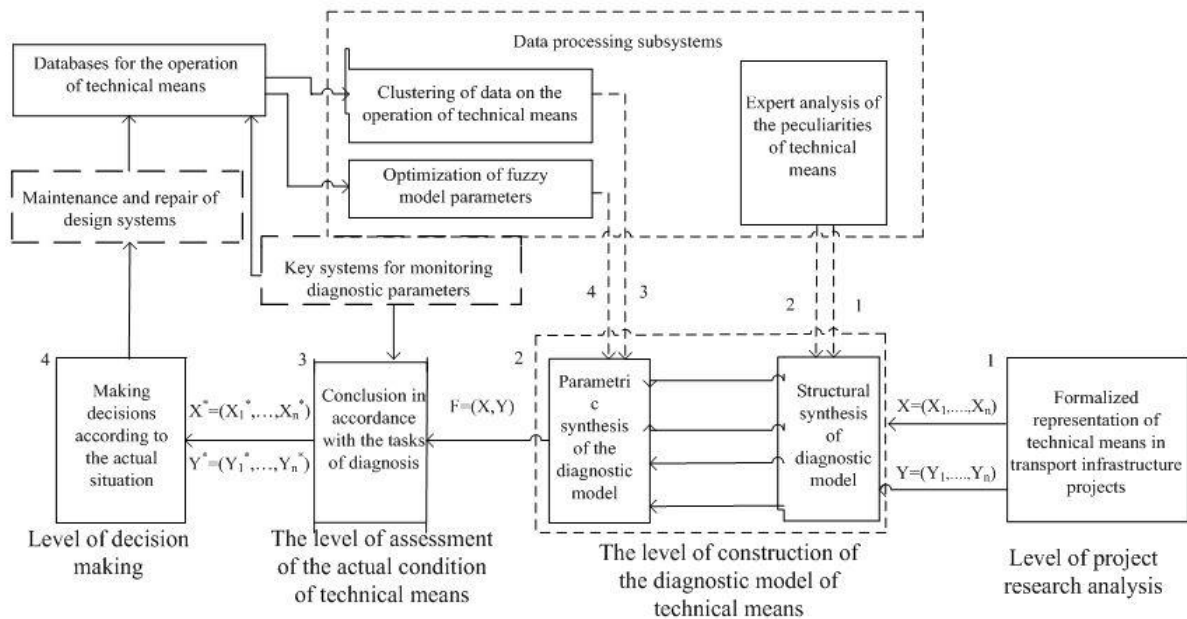


Fig. 1. Model of management and decision support of diagnostics of technical means in transport infrastructure projects

The analysis of the object of transport infrastructure includes the study of structural and functional features of technical means. A list of key parameters that are diagnostic features of subsystems and components of technical means, a set of inspection methods and a list of defective conditions for each type of technical means is needed [6, 7]. Diagnostic assessment of technical means is determined by the classification task:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow Y = (y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (8)$$

where $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ —these are diagnostic parameters of technical means aggregated by the principle of association with its elements and presented in the form of hierarchy; Y - many classes of state of technical means connected with algorithms of actions on the investigated object.

The obtained fuzzy model is used to estimate the actual technical condition Y^* depending on the monitoring of data on the parameters X^* . Recommendations for operation, maintenance and repair work are formed on the basis of diagnostic results and used by engineering and technical personnel at the planning stage.

It is possible to develop recommendations on individual elements, including the analysis and elimination of typical defects, as well as, accordingly, a comprehensive assessment of the state of technical means, which helps to determine further strategies for operation.

Thus, the proposed control model opens the possibility of interaction between the control subsystem of monitoring and diagnostics and planning of the subsystem of a certain complex based on the actual technical condition. At the same time, monitoring can be performed periodically or on-line.

Conclusions. The problem of quality management of repair and operation of technical means in projects of development and maintenance of transport infrastructure is analyzed. It is determined that it is possible to solve it by improving the quality management system and developing the planning methodology in transport infrastructure projects. The complex of technological tasks and measures which is necessary for maintenance of process of operation of technical means is investigated. The quality assurance process at the level of quality management in transport infrastructure projects consists of the adoption of planned systematic measures to ensure the implementation of all envisaged processes necessary for the project to meet quality requirements. The formation of the quality assurance plan is based on a systematic approach, which became the basis for the development of a management model and support for decision-making diagnostics of technical means in transport infrastructure projects. The paper develops a system model of operation management of technical means of transport, which opens the possibility to determine the system efficiency of development and implementation of relevant transport infrastructure projects, improvement of quality management of repair and maintenance of technical means of transport.

REFERENCES

1. Kulbovskiy I., Sapronova S., Holub H., Tkachenko V., Afanasieva I., Safronov O. (2019). Development of a model for managing the quality of repair and maintenance of rolling stock in transport infrastructure projects. *2019. 23rd international scientific conference TRANSPORT MEANS 2019*, 2, 201-205.
2. Blokhin, L.M., & Burichenko, M.Yu. (2003). *Statychna dynamiky system upravlinnya* [Static dynamics of control systems]. Kyiv: National Aviation University [in Ukrainian].
3. Levkovets, P.R., Gedz, Y.M., & Kanarchuk, O.V. (2002). *Systemna efektyvnist' na transporti. Metody, modeli i statelyi* [Static dynamics of control systems]. Kyiv: National transport University [in Ukrainian].
4. Gorbachev, P.F., & Dmitriev, I.A. (2002). *Osnovy teorii transportnykh sistem* [fundamentals of the theory of transport systems]. Kharkiv: KhNADU [in Russian].
5. Melnychenko, O.I., Kulbovskiy, I.I., & Shestak, V.G. (2010). *Pryntsypy otsinky investytsiynykh proektiv koliynoho hospodarstva metropolitenu* [Principles of evaluation of metro track investment projects.]. *Zbirnyk naukovykh prats' «Transportni systemy i tekhnolohiyi» DETUT - Collection of scientific works «Transport systems and technologies» DETUT*, 16, 232-240 [in Ukrainian].
6. Melnychenko, O.I., & Kulbovskiy, I.I. (2011). *Rozrobka stratehiy vykorystannya vyrobnycho-tekhnolohichnoho potentsialu pidrozdiliv koliynoho hospodarstva metropoliteniv* [Development of strategies for the use of production and technological potential of subway railway subdivisions]. *Upravlinnya proektamy, systemnyy analiz i lohistyka - Project management, systems analysis and logistics*, 8, 146-150 [in Ukrainian].
7. *Rukovodstvo k svodu znaniy po upravleniyu proyektami (Rukovodstvo RMVOK)* [Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guidelines)]. (2010). *Amerikanskiy natsional'nyy standart: ANSI/PMI 99-]001-CIIIA: Project Management Institute* [in Russian].
8. Bushuyev, S.D., Bushuyeva, N.S., Babayev, I.A., Yakovenko V.B., et al. (2010). *Kreativnyye tekhnologii upravleniya proyektami i programmami* [Creative technologies for project and program management]. Kiev: Summit-Book [in Russian].
9. Melnychenko, O.I., Kulbovskiy, I.I., & Kishka S.P. (2014). *Formuvannya systemnoho pidkhodu do upravlinnya proektamy v protsesi ekspluatatsiyi tekhninykh zasobiv* [Formation of a systematic approach to project management in the process of operation of technical means]. *Zbirnyk naukovykh prats' «Transportni systemy i tekhnolohiyi» DETUT - Collection of scientific works «Transport systems and technologies» DETUT*, 24, 28-31 [in Ukrainian].
10. Kulbovskiy I., Sapronova, S., Holub, H., Tkachenko, V., & Musorina, M. (2019). *Modeling of Management Strategies for Manufacturing Technological Processes in Metro Power Supply Projects. TRANSBALTICA 2021: TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology*, 211-219.
11. 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].

12. Kulbovskiy, I., Holub, H., Skliarenko, I., Honnoshyna, I., Klochkov, Yu., & Kharuta, Val. (2019). Research on the possibilities of solution of the monitoring projects of railway power supply system. *Technology Audit and production reserves*, 6/2 (50), 13-15. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.187278

13. Sytnik, V.F., & Karagadova, Je.A.: *Mathematical models in planning and managing the enterprise* (1985). K. 214 p.

14. 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].

15. 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].

Іван Кульбовський¹, Галина Голуб^{2*}, Віктор Меленчук³, Віктор Чмир⁴

¹ Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

² Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна

³ Кафедра ремонту та експлуатації автомобільної та спеціальної техніки, Військова академія, вул. Фонтанська дорога, 10, м. Одеса, 65009, Україна

⁴ Кафедра транспортних засобів та спеціальної техніки, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, вул. Шевченка, 46, м. Хмельницький, 29000, Україна

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

РОЗРОБКА СИСТЕМОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ ТЕХНІЧНИМИ ЗАСОБАМИ В ПРОЕКТАХ ІНФРАСТРУКТУРИ ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто проблеми управління якістю ремонту та експлуатації технічних засобів в проєктах розвитку та підтримки інфраструктури транспорту, що є найважливішим чинником підвищення рівня життя, економічної, соціальної й екологічної безпеки. Розглянуто систему управління якістю проєкту та методологію планування. Досліджено, що для вдосконалення даної системи необхідно вирішити проблему інтеграції принципів управління якістю та їх адаптацію до проєктів інфраструктури транспорту з управління якістю ремонту та експлуатації технічних засобів та показано шляхи вирішення.

Розглянуто комплекс взаємопов'язаних організаційно технологічних завдань і заходів, які спрямовані на відновлення нормативних транспортно-експлуатаційних показників ремонту та експлуатації технічних засобів транспорту.

Досліджено, що процес забезпечення якості проєкту на рівні управління якістю в проєктах інфраструктури транспорту складається з прийняття планових систематичних заходів, що забезпечують виконання усіх передбачених процесів. На основі досліджень запропоновано системну модель критеріїв за допомогою якої можна визначити системну ефективність розробки та реалізації відповідних проєктів інфраструктури транспорту.

У результаті вирішення поставленої проблеми розроблено модель управління та підтримки прийняття рішень діагностики технічних засобів в проєктах інфраструктури транспорту, яка відкриває перспективи планування і своєчасного технічного обслуговування та ремонту технічних засобів транспорту для забезпечення та підвищення безпеки руху.

Ключові слова: *технічні засоби, модель, система управління, моніторинг, проєкт, якість, системний аналіз.*

ЗМІСТ

ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Фомін О.В., Кара С.В., Прокопенко П.М, Туровець Д.А.</i> Випробування несучих конструкцій спеціального рухомого складу після тривалої експлуатації	5
<i>Mironovich A., Eitutis G.</i> Conditions for the development of the crushed stone production in Ukraine and competition on the transport market	12
<i>Шапошник В.Ю., Шикунів О.А.</i> Проблема обривів автозчепів	21
<i>Ловська А.О., Фомін О.В.</i> Дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу з круглих труб, завантаженого контейнерами-цистернами	31
<i>Фомін О.В., Ловська А.О., Скуріхін Д.І, Бонаренко В.В.</i> Моніторинг виробничих процесів підприємств залізничного транспорту	41
<i>Радкевич М.М., Сапронова С.Ю, Ткаченко В.П.</i> Дослідження залишкового ресурсу спеціальних вагонів	50
<i>Волошин Д.І., Шевченко О.В., Волошина Л.В.</i> Аналіз забезпечення збереження вантажних вагонів в сучасних умовах експлуатації	59
<i>Fomin O., Prokopenko P., Kara S., Fomin V.</i> Assessment carts strength indicators wagons with expired service life	68
<i>Krasheninin A., Shapatina O., Ponomarenko V.</i> Estimation of vehicle operating time taking into account the influence of a number of factors	76
<i>Твердомед В.М., Саяпіна І.О.</i> Теоретичні дослідження можливості улаштування безстикової колії в кривих ділянках радіуса менше 350 метрів	86
<i>Сулим А. О., Устенко О.В., Мельник О.О., Ломонос А.І., Мужичук С.О., Соловей В.С.</i> Процедура вибору асинхронного тягового електроприводу для інноваційного рухомого складу метрополітену	97
<i>Шикунів О.М.</i> Модель деформування волокнистих матеріалів багатоспрямованого армування з розорієнтованими волокнами	119

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<i>Герцій О.А., Бутрик Н.О.</i> Порівняльний аналіз методів компактного представлення графічної інформації	130
<i>Тимченко Л.І., Кокряцька Н.І., Жук Д.О., Каплун В.А.</i> Застосування ПЛІС для обробки зображень лазерних трас	144
<i>Тимченко Л.І., Кокряцька Н.І., Тихонов А.О., Дубова Н.Б.</i> Розробка математичних моделей паралельно-ієрархічного перетворення для ефективного оброблення зображень	156

ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ І БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТУ

<i>Kurdel P., Zaremba J., Korba L.</i> The level of danger in controlled airport security	165
<i>Дьомін Р.Ю., Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю., Ноженко В.С.</i> Метод оперативного розслідування сходження рухомого складу з рейок	173
<i>Горобченко О.М., Неведров О.В., Незліна О.А., Ткаченко В.А.</i> Розробка методу кластеризації поїзних ситуацій	187
<i>Kulbovskiy I., Holub H., Melenchuk V., Chmyr V.</i> Development of a system model of technical operation management in transport infrastructure projects	196

Науково-виробниче видання
Scientific and production edition

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS
OF THE STATE UNIVERSITY OF INFRASTRUCTURE AND TECHNOLOGIES

Серія «Транспортні системи і технології»
Series "Transport Systems and Technologies"

Випуск 37

Issue 37

Відповідальний за випуск І. О. Саяпіна

Підписано до видання 14.06.2021.
Ум. друк. арк. 11,97. Обл.-вид. арк. 17,75.
Наклад 50 прим. Зам. № 2151-09/21.

Надруковано в друкарні редакційно-видавничого відділу
Державного університету інфраструктури та технологій.
Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 6148 від 18.04.2018.
03049, м. Київ-49, вул. І. Огієнка, 19.