



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 203

Харків 2023

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті:
<https://bit.ly/3vVHlv3>.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті
<http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

Реферативна база

«Наукова періодика України»: <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р.
Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 2 від 27 березня 2023 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20, Rue
Bachaumont, 75002 PAPIIS, FRANCE

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2023.

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-
Universitet Weimar F. A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ,
м. Чернігів)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.
(VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська
політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н. професор (НУ «Львівська
політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Нерубацький В. П., Геворкян Е. С., Зінченко О. Є., Гордієнко Д. А., Морозова О. М.* Особливості підвищення енергоефективності високотемпературних промислових печей із резистивним нагріванням 6
- Кириченко О. М., Раківненко В. П., Колісник А. В.* Удосконалення вібраційного обладнання для очищення забруднень деталей і вузлів в авторемонтному виробництві 19

Теплоенергетика (144)

- Редько І. О., Гвоздецький О. В., Чайка Ю. І., Заїка В. Ю.* Основні помилки під час ремонту існуючих систем централізованого опалення житлового фонду 26

Залізничний транспорт (273)

- Візняк Р. І.* Визначення динамічних сил, що діють на піввагон при розвантаженні роторним вагоноперекидачем 35
- Калабухін Ю. Є., Мартинов І. Е., Мартинов С. І.* Формалізація оцінки ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда 44
- Панченко С. В., Панченко В. В., Туренко О. Г.* Дослідження аварійних режимів роботи тягового асинхронного електропривода 56
- Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Шовкун В. О., Шарий О. Л., Мартиросян С. Р.* Аналіз технічного стану буксових вузлів вантажних вагонів 63

Транспортні технології (275)

- Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А., Філіп'єва М. В.* Дослідження точності моделювання втрат потужності в силових діодах і транзисторах 73
- Korobkova O., Pavlovska L., Shpak N.* Improvement of the interaction algorithm of participants during customs and logistics service of cargo 88
- Мельник О. М., Шумило О. М., Онищенко О. А., Михайлова Ю. В., Обнявко Т. С., Коробко Т. О.* Концепція та перспективи використання водневого палива на морському транспорті 96
- Ломотько Д. В., Примаченко Г. О.* Формалізація вантажних мультимодальних залізничних перевезень як багатоетапної та багатоцільової транспортної задачі 105

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.783.2

**ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧЕЙ ІЗ РЕЗИСТИВНИМ
НАГРІВАННЯМ**

Канд. техн. наук В. П. Нерубацький, д-р техн. наук Е. С. Геворкян,
канд. техн. наук О. Є. Зінченко, аспірант Д. А. Гордієнко, аспірантка О. М. Морозова

**FEATURE OF INCREASE IN ENERGY EFFICIENCY OF HIGH-TEMPERATURE
INDUSTRIAL FURNACES WITH RESISTIVE HEATING**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, Dr. Sc. (Tech.) E. S. Gevorkyan, PhD (Tech.)
O. Y. Zinchenko, postgraduate D. A. Hordiienko, postgraduate O. M. Morozova

***Анотація.** Досліджено технологічні процеси спікання керамічних виробів у високотемпературних електричних печах, що працюють як у захисному середовищі, так і на повітрі. Підібрано алгоритм розрахунку для виконання порівняльних оцінок енергоємності та можливої реалізації, яку можна використовувати при аналізі конкретних ситуацій відносно різних типів керамічних деталей, температура спікання яких перевищує 1400 °С. Отримано фактографію залежностей розподіленої за площею пода потужності від площі пода та питомої потужності від внутрішнього об'єму для гами моделей печей Mobilotherm, призначених для випалу кераміки з максимальною робочою температурою. Виявлено, що додаткове зниження енерговитрат при спіканні в електричних печах на випуск одного виробу та підвищення продуктивності виробництва пов'язано з урівноважуванням теплового балансу печі, зниженням теплових втрат і застосуванням конструкцій печей, у яких можна використовувати залишкове тепло. Проведені дослідження дають змогу припустити, що при розроблених методах розрахунку теплового балансу можна вибрати найбільш оптимальні режими нагрівання печей, рекомендувати найбільш теплостійкі і теплоізолюючі матеріали футеровки.*

***Ключові слова:** високотемпературна піч, керамічний виріб, нагрівач, резистивне нагрівання, спікання, тепловий баланс.*

***Abstract.** For the sintering of ceramic products, high-temperature electric furnaces are used, which work both in a protective environment and in air. In some technological processes, for example, for the production of ceramic carriers for afterburning car exhaust gases based on SiC and Al₂O₃, only air furnaces are used. Silicon carbide (SiC – silicate) heaters and molybdenum disilicide (MoSi₂) are used as resistive heaters in such furnaces. Due to the relatively small resource of their work, it is energetically beneficial to use the residual heat when cooling the furnace. At the same time, there is a significant saving of electricity for heating. The residual heat is largely determined by the thermal insulation of the lining and the correct distribution of the heat balance of the furnace. The speed of temperature rise affects the thermal balance of the furnace in general, and even the speed of cooling of the furnace, which creates additional energy saving opportunities, which reduces the cost of ceramic products.*

The article examines the technological processes of sintering ceramic products in high-temperature electric furnaces. A calculation algorithm was selected for performing comparative assessments of energy intensity and possible implementation, which can be used in the analysis of specific situations regarding different types of ceramic parts, the sintering temperature of which exceeds 1400 °C. A factography of the dependences of the power distributed over the floor area on the floor area and the specific power on the internal volume for a range of models of Mobilotherm furnaces designed for firing ceramics with the maximum operating temperature was obtained. It was found that the additional reduction in energy consumption during sintering in electric furnaces for the production of one product and the increase in production productivity are associated with the balancing of the thermal balance of the furnace, the reduction of heat losses and the use of furnace designs in which residual heat can be used. The conducted studies make it possible to assume that the developed methods of calculating the heat balance allow choosing the most optimal furnace heating modes, recommending the most heat-resistant and heat-insulating lining materials.

Keywords: high temperature furnace, ceramic product, heater, resistive heating, sintering, thermal balance.

Вступ. Печі є основним обладнанням керамічної лабораторії. Вони можуть розрізнятися за розміром від невеликих коробчастих печей з електричним нагріванням, так званих муфельних печей, що можуть поміститися на лаві, до величезних газових печей, використовуваних для плавлення скла. Середніми є печі різних форм і розмірів, призначені для роботи при різних температурах і атмосферах [1].

На цей час для виробництва різних керамічних виробів, наприклад виготовлення стільникових керамічних носіїв автомобільних каталізаторів, в основному використовуються високотемпературні електричні печі з нагрівачами, що працюють у різних середовищах, у тому числі повітряних [2]. Поширення електричних печей порівняно з паливними викликано їхніми суттєвими перевагами:

– отримання дуже великих швидкостей нагрівання і практично будь-яких необхідних температур за рахунок концентрування виділення великої кількості енергії в дуже малих об'ємах (електрична дуга, низькотемпературна плазма, індукційне, електронно-променеве і пряме нагрівання);

– розташування джерела виділення тепла по стінках нагрівальної камери і застосування примусової циркуляції

атмосфери для забезпечення високої рівномірності нагрівання виробів;

– відсутність труднощів під час регулювання потужності, що підводиться, і температури, простота процесу автоматизації регулювання температурного режиму печі;

– легкість включення електричних печей у технологічний потік та автоматичні лінії за рахунок зручності механізації та автоматизації процесів завантаження та вивантаження матеріалів або виробів, що нагріваються, і їх переміщення всередині печі;

– герметизація печей для захисту деталей, що нагріваються, від окиснення захисною атмосферою чи вакуумом або, навпаки, розміщення їх у спеціальній атмосфері для насичення поверхні вуглецем, азотом або іншими речовинами;

– менше забруднення атмосфери, чистота, компактність, зручність обслуговування, покращення умов праці порівняно з паливними печами.

Електричні печі опору поділяються на два типи. Перший – печі опору прямої дії (джоулеве тепло виділяється в самих нагрівальних тілах), другий – печі опору непрямої дії (джоулеве тепло виділяється в нагрівачах і передається тілам випромінюванням, конвекцією або теплопровідністю) [3].

Передача тепла в печі опору непрямої дії може здійснюватися:

- лише випромінюванням (вакуумні печі);
- переважно виборчим випромінюванням (інфрачервоне нагрівання з короткохвильовим або довгохвильовим діапазоном);
- випромінюванням та конвекцією (високо- та середньотемпературні печі);
- конвекцією та випромінюванням (середньо- та низькотемпературні печі);
- конвекцією і теплопровідністю (електродні ванни або ванни з зовнішнім обігрівом).

Визначення основних внутрішніх розмірів робочого простору електричної печі здійснюється виходячи зі штучної продуктивності, часу нагрівання та коефіцієнта завантаження пода аналогічно полум'яним печам.

Внутрішні розміри камери печі мають бути такими, щоб садок не тільки міг розміститися в ній раціонально, з точки зору оптимальних умов для теплопередачі, але її можна було зручно завантажувати і виймати з печі. Крім того, внутрішні розміри камери печі та робочих вікон мають бути такими, щоб у ній можна було провести робочий ремонт. Ці вимоги стосуються не тільки маленьких печей, але і печей зі знімним або легко розбиральним склепінням.

Зовнішні габарити печі визначаються її внутрішніми розмірами і товщиною кладки. Кладка має забезпечити низькі температури кожуха печі (не вище 60 °С при температурі навколишнього повітря 20 °С) і, отже, малі теплові втрати печі.

Час нагрівання заготовки та продуктивність – два тісно пов'язані виробничо-технічні показники будь-якої електроконтактної нагрівальної установки. Зазвичай задається продуктивність установки і в ній уточнюється час нагрівання, інколи ж навпаки: задається час нагрівання і тоді уточнюється продуктивність установки. Але в будь-якому разі час нагрівання (швидкість) має бути розрахований або перевірений, якщо він заданий довільно [4].

Карбідокремнієві електронагрівачі можуть застосовуватися при високих температурах (до 1450 °С на поверхні нагрівачів), у процесі роботи вони не окиснюються, майже не деформуються, не піддаються корозії, легко встановлюються в піч, можуть бути легко замінені без тривалої зупинки печі, мають довший термін експлуатації. Тому карбідокремнієвий електронагрівач широко використовується в різних високотемпературних електричних печах та інших електронагрівальних приладах при виробництві магніту, кераміки, скла, порошкової металургії, машинобудуванні і т. п. До основних факторів, що визначають термін служби електронагрівача, належать температурно-часовий режим роботи електропечі, значення питомої поверхневої потужності, схема з'єднання нагрівачів, спосіб регулювання температури печі, склад пічної атмосфери. Зовнішній вигляд електронагрівача з карбиду кремнію наведено на рис. 1.

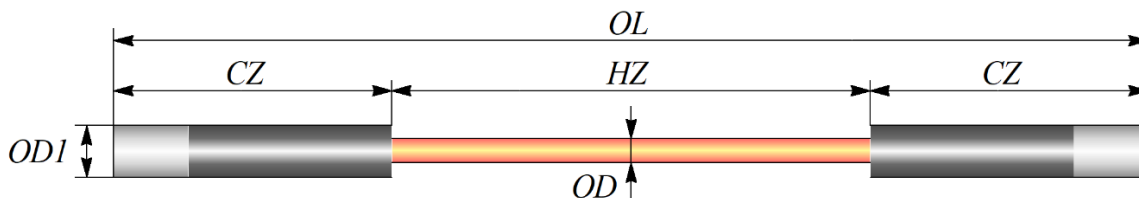


Рис. 1. Зовнішній вигляд електронагрівача з карбиду кремнію:
 OD – зовнішній діаметр, мм; HZ – довжина зони нагрівання, мм;
 CZ – довжина холодного виведення, мм; OL – загальна довжина, мм

Так, електронагрівач типу ED 25/400/400 має такі розміри: $OD = 25$ мм, $HZ = 400$ мм, $CZ = 400$ мм, $OL = 1200$ мм.

Нагрівальні елементи можна вважати чисто резистивними навантаженнями, і до них застосовуються звичайні закони електрики:

$$U = I \cdot R = \sqrt{W} \cdot R = \frac{W}{I}; \quad (1)$$

$$W = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}; \quad (2)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\sqrt{W}}{R} = \frac{W}{U}; \quad (3)$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U^2}{W} = \frac{W}{I^2}, \quad (4)$$

де U – напруга, В;

I – сила струму, А;

W – потужність, Вт;

R – опір, Ом.

Для компенсації підвищення електроопору, що неминуче в процесі експлуатації елементів, зазвичай використовується змінна напруга джерел живлення. Величина необхідного резерву напруги залежатиме від темпів «старіння» і передбачуваного терміну служби елементів, але зазвичай становить близько 50...100 % напруги, необхідної для того, щоб дати повну потужність з новими елементами електронагрівання у вихідному стані.

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих у роботах [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [7] подано структуру та оптимізовану електричну систему керування високотемпературною вакуумною піччю опору для спікання карбиду кремнію. Проведено експеримент із

високотемпературного спікання. Як матеріал нагрівача використовувався високочистий графіт. Під час спікання застосовувався низький вакуум та індукція аргоном, щоб захистити графітовий нагрівач від пошкоджень, спричинених випаровуванням. Було прийнято ступінчасту криву нагрівання. Експериментальні результати показали, що піч стабільно працювала при 2500 °С, перехідна температура досягала 2800 °С, а термін служби графітового нагрівача було збільшено.

Також для отримання високої температури необхідно мати компоненти печі, що можуть витримувати такі температури без погіршення якості. Ці матеріали відомі як вогнетриви. Найбільш поширеним вогнетривким матеріалом в електропечобудуванні, особливо електричних печей опору, є шамот із вмістом глинозему від 30 до 45 % [8]. Оскільки ці печі працюють в основному при температурі, що не перевищує 1300 °С, то вогнетривкі і механічні властивості шамоту цілком задовольняють вимоги до цих печей. В електричних печах бажано застосовувати шамотну цеглу першого сорту з вмістом не менше 38 % Al_2O_3 . Шамотні вироби за своєю вогнетривкістю поділяються на три класи: клас А має вогнетривкість не нижче 1730 °С, клас Б – не нижче 670 °С, клас В – не нижче 1610 °С [9]. Однак робоча температура шамоту набагато нижча, оскільки він втрачає свою механічну міцність при $1300...1400$ °С, гранична робоча температура шамоту становить $1350...1450$ °С. Шамот має порівняно малий коефіцієнт розширення та добре витримує різні коливання температури [10]. Вироби з нього мають низьку електропровідність, що дає змогу використовувати шамот в електричних печах одночасно як вогнетривкий та електроізоляційний матеріал.

Хоча вуглець зазвичай вважається відновником у процесах пірометалургічної плавки, він також може застосовуватися як вогнетривкий матеріал у системі захисної оболонки печі. Робота [11] присвячена

вогнетривким матеріалам і їхній ролі в конструкції системи захисної оболонки печі. Також розглянуто вуглецевмісні вогнетривкі матеріали та їхнє відповідне застосування, включаючи вогнетривку футеровку системи захисної оболонки печі.

Експлуатація електродугової печі схильна до коливань за основними її показниками, такими як витрати електроенергії, час плавки, вихід сталі та інші. У роботі [12] докладно проаналізовано дані електродугової печі, досліджено витрати нею електроенергії. Добре відомо, що на витрати електроенергії впливають вага і тип брухту, що завантажується, операційні затримки і температура випуску. З іншого боку, можна стверджувати, що вихідні матеріали, такі як вуглець і кисень, також можуть впливати на витрати електроенергії через їхню роль в окиснювально-відновних рівняннях та енергетичний баланс ванни. Тому особлива увага приділяється аналізу відношення вуглецю до кисню під час роботи електродугової печі та подальшому впливу доступності кисню на витрати електроенергії.

У роботі [13] розроблено електричну піч для випалу керамічних виробів і реалізовано її автоматичне керування. Печі (100×50×50 см) можна використовувати для випалу навіть невеликих керамічних виробів, наприклад дрібничок. ПЛК використовується для автоматизації системи. Тепло від печі вимірювалося за допомогою термопар і передавалося на програмовані логічні контролери аналоговим модулем, а тепло печі контролювалося відповідно до отриманих значень тепла. Крім того, відстежувався необхідний ступінь нагрівання та кількість тепла в печі на екрані панелі керування. Зразки продукції, обпалені в печі, довели, що система працює успішно та без проблем.

У роботі [14] проведено дослідження, спрямовані на удосконалення процесів спікання за рахунок заміни існуючих печей старого типу на нові версії цих агрегатів з

удосконаленою конструкцією робочої камери та покращеним регулюванням температури у ній. Оцінено теплову роботу стандартної печі для виробництва, а також нового вдосконаленого типу. Обидва результати порівнюються. Усі отримані дані зіставляються з відповідними їм під час використання стандартних одиниць та умов. Отримані результати дають змогу зробити висновок про те, що заміна обладнання є обґрунтованою і не лише покращує характеристики та якість продукції, а й знижує коливання продуктивності процесу.

У роботі [15] розглядається підхід до реалізації енергоємних технологічних процесів у міських багатопверхових виробничих кластерах на прикладі виробництва керамічних і металокерамічних виробів. Використання сучасних керамічних мікро- та нанопорошків дає змогу перейти на більш енергозберігаючі технології за рахунок зниження температури спікання та скорочення технологічного циклу. Використання запропонованих показників для оцінювання енергоефективності пінокерамічних фільтрів, що спікаються, дає змогу вдосконалити технологічний процес і скоротити час завершення його термічного циклу на 19 %, а також знизити максимальну температуру нагрівання на 20 % до 1350 °С. Прийняття іншої оксидної технологічної альтернативи і використання запропонованої моделі та показників для оцінювання енергоефективності технології спікання пінокерамічних фільтрів дає змогу вибрати менш енергоємне обладнання та заощадити до 40 % електроенергії.

В електричних печах опору динасові вироби застосовуються рідко, а магнезитові зазвичай не застосовуються. У деяких випадках у високотемпературних печах опору застосовуються карборундові вироби для виконання муфелю, жаростійких подових плит та інших елементів печі.

Одним з найпоширеніших теплоізоляційних матеріалів, використовуваних в електропечобудуванні, є діатоміт і трепек у

вигляді цегли, плит, фасонних виробів і засипки. За цими рекомендаціями складають ескіз печі. Маючи розрахунковий ескіз печі, складають її тепловий баланс, яким обчислюють потужність печі.

Міжнародна енергетична агенція (МЕА) з 1997 року публікує звіти про вплив тенденцій підвищення енергетичної ефективності на кінцеве споживання енергії, відомі як звіти про показники енергоефективності. Протягом цього періоду МЕА спільно з іншими фахівцями з енергоефективності очолювало роботу з розроблення показників енергоефективності, а також тісно співпрацювало з країнами та іншими зацікавленими сторонами для покращення збирання енергетичних даних і пов'язаних з ними характеристик кінцевого споживання. Посібники «IEA Energy Statistics Manual» (IEA, 2005), «Oil Crises & Climate Challenges: 30 Years of Energy Use in IEA Countries» (IEA, 2004) та «Energy Use in the New Millennium» (IEA, 2007) є прикладами результатів цієї співпраці.

Як енергоресурс, енергоефективність має унікальний потенціал одночасного сприяння довгостроковій енергетичній безпеці, економічному зростанню і навіть покращенню здоров'я та добробуту людей; зокрема вона є основним інструментом скорочення викидів парникових газів. Заходи з енергоефективності через скорочення або обмеження споживання енергії можуть підвищити стійкість до різноманітних ризиків, таких як зростання і мінливість цін на енергію, навантаження на енергетичну інфраструктуру та збої в системах енергопостачання [16].

«Звіт про ринок енергоефективності» (IEA, 2013) надає велике значення енергоефективності як найбільшому енергетичному ресурсу, так і найважливішій ролі, яку вона відіграє на світовому енергетичному ринку. У звіті зроблено висновок, що інвестиції в енергоефективність забезпечили зменшення споживання енергії, що перевищує обсяги виробництва будь-якого іншого

енергетичного ресурсу в багатьох країнах МЕА. Це вказує на те, що енергоефективність є прихованим паливним резервом і фактично «паливом номер один». Показники енергоефективності використовуються для того, щоб кількісно оцінити, наскільки великий обсяг цього прихованого або «першого» палива.

Для кращого розуміння рушійних сил і потенціалу енергоефективності важливо розробити та підтримувати добре обґрунтовані показники енергоефективності. Однак вибір і розроблення відповідних показників не є досить очевидними. Такі документи, як «Показники енергоефективності: основи формування політики» та «Показники енергоефективності: основи статистики» (IEA, 2014), призначені для забезпечення необхідними інструментами під час процесу початку або поглиблення розроблення детальних показників для підтримки формування результативної політики енергоефективності. Крім того, вони є корисними для фахівців зі статистики та енергоаналітиків, які збирають необхідну інформацію для розроблення показників енергоефективності. Тому, виходячи з показників енергоефективності, має розглядатися експлуатація промислових електропечей, використовуваних для виробництва керамічних і металокерамічних виробів.

Будемо розглядати лише високотемпературні печі з температурою нагрівання, що перевищує 1400 °C, які працюють у повітряному середовищі. У цей час для роботи такого типу печей використовуються в основному два типи нагрівачів, карбідокремневі (SiC) і молібденові дисиліцид (MoSi₂). Недоліком перших є гранична температура 1450 °C, а других – низький ресурс роботи в умовах термоциклювання, хоча температура нагрівання може досягати 1800 °C. Тому гальмування охолодження печі поступовим зниженням електричної потужності зазвичай не потрібно, але навіть при п'ятикратному запасі прийнятій максимально можливій швидкості

охолодження ця стадія в інтенсифікованих технологіях кераміки займає 30...40 % часу нагрівання. Тому частка енерговитрат на охолодження в повному термічному циклі якщо і не нульова, то дуже мала величина. Скоротити допоміжний час на розвантаження-завантаження печі в повному робочому циклі виробництва кераміки можна з використанням конструкцій з рухомим дном, наприклад печей Mobilotherm. На відміну від звичайних камерних печей, у них завантаження дна печі (висувного пода) здійснюється поза піччю.

Отже, питання використання залишкового тепла печей від режиму охолодження до кінця і подальше удосконалення процесів спікання керамічних виробів є актуальним невіршеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення енергоефективності високотемпературних промислових печей із резистивним нагріванням, що дасть можливість значно

скоротити час технологічного процесу та заощадити електроспоживання.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– подати особливості та можливості печей у взаємозв'язку зі структурно-параметричними характеристиками технологічних регламентів;

– запропонувати методи розрахунку теплового балансу, що дали б змогу вибрати найбільш оптимальні режими нагрівання печей.

Основна частина дослідження

Матеріали та методи. Як вироби для експерименту використовувалися керамічні стільникові блоки з оксиду алюмінію (Al_2O_3) і карбїду кремнію (SiC) з розмірами $D = 100$ мм, висотою $h = 50$ мм.

Дослідження проводили на електричних печах Mobilotherm (Німеччина). Основні характеристики моделей печей європейської торгової марки Mobilotherm для випалу кераміки з максимальною робочою температурою $T = 1400$ °C наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики гами моделей печей

Модель	Внутрішні розміри, мм	Потужність, кВт
W1000/14	800×1600×800	69
W1500/14	900×1900×900	99
W2200/14	1000×2200×1000	126
W3300/14	1000×2800×1200	168
W5000/14	1000×3600×1400	220
W7500/14	1000×5400×1400	336

Скорочення обсягу непродуктивного часу експлуатації печі забезпечується за рахунок того, що для кожної печі одночасно задіюють два поди: коли один з них знаходиться в печі, інший може навантажуватися. Оскільки для обміну висувних подів необхідний досить короткий час, практично не залежний від обсягу навантаження пода, використання системи висувних подів означає відсутність простою печі. Такий механізм використання системи

висувних подів завдяки скороченню часу на розвантаження печі дає змогу також більшою мірою використовувати залишкове тепло, що особливо проявляється при експлуатації великих печей з повним завантаженням. Печі стандартного виконання можна відкривати при температурі приблизно до 500 °C, якщо це необхідно робити при більш високих температурах, то може використовуватися піч з підйомними дверима і рухомим рейковим подом (рис. 2).

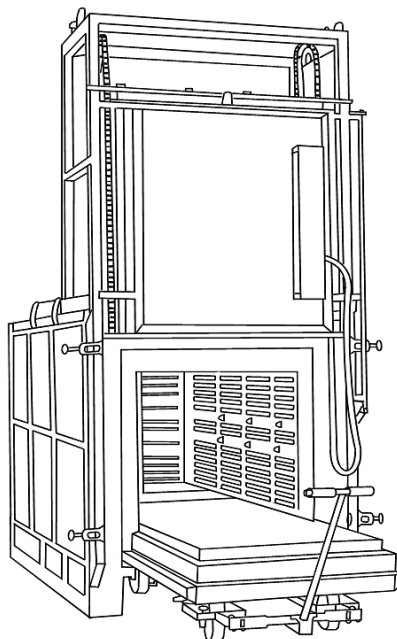


Рис. 2. Піч Mobilotherm W3300/G з висувним подом

Розрахунок часу нагрівання може бути виконаний двома способами: розрахунковим шляхом і за експериментальними даними, наведеними в літературних джерелах. У першому випадку необхідно скористатися рівнянням теплового балансу [17]

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (5)$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється електричним струмом під час проходження по заготовці (деталі);

Q_1 – тепло, витрачене на нагрівання заготовки (деталі);

Q_2 – теплові втрати в навколишній простір.

$$Q = I_{сер}^2 \cdot R_3 \cdot \tau; \quad (6)$$

$$Q_1 = c \cdot G \cdot (t_k - t_n); \quad (7)$$

$$Q_2 = q_{\Sigma} \cdot F \cdot \tau. \quad (8)$$

Розв'язуючи рівняння теплового балансу відносно часу нагрівання, отримаємо [17]

$$\tau = \frac{c \cdot G \cdot (t_k - t_n)}{I_{сер}^2 \cdot R - q_{\Sigma} \cdot F}, \quad (9)$$

де q_{Σ} – сумарні теплові втрати з заготовки в навколишній простір, що складаються з втрат на випромінювання q_m^e , конвекцію q_m^k і теплопровідність (через контакти) q_m^m .

$$q_m^e = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – відносний коефіцієнт випромінювання, що враховує відбивні властивості поверхні заготовки (для окисненої сталі $\varepsilon = 0,8 \dots 0,9$, окисненої міді $\varepsilon = 0,7$, латуні $\varepsilon = 0,6$);

T_3 – температура поверхні заготовки;

T_0 – температура навколишнього повітря.

$$q_m^k = \alpha_k \cdot (t_3 - t_0). \quad (11)$$

Теплові втрати теплопровідністю визначаються за кількістю і температурою води, що відводиться [17]:

$$q_m^m = g \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{860}, \quad (12)$$

де g – годинні витрати води на один контакт (25...50 дм³);

Δt – температурний перепад у воді, що охолоджує контакти (близько 30...40 °С).

Якщо знехтувати тепловими втратами (що практично припустимо), то рівняння (9) набуває вигляду

$$\tau = \frac{c \cdot G \cdot (t_k - t_n)}{I_{cep}^2 \cdot R}. \quad (13)$$

Тоді для будь-якого розрахункового інтервалу час нагрівання можна обчислити як [17]

$$\tau_i = \frac{c \cdot G}{\alpha_i \cdot F} \cdot \ln \frac{I_i^2 \cdot R_{zi} - \alpha_i \cdot F \cdot (t_{ni} - t_0)}{I_i^2 \cdot R_{zi} - \alpha_i \cdot F \cdot (t_{ki} - t_0)}, \quad (14)$$

де τ_i – тривалість нагрівання протягом інтервалу;

α_i – середній коефіцієнт тепловіддачі в інтервалі температур $t_{ki} - t_{ni}$ для температури $(t_{ki} - t_{ni}) / 2$;

t_{ni}, t_{ki} – температури заготовки на початку та наприкінці інтервалу;

I_i – середнє значення струму в інтервалі для $t_{cepi} = (t_{ki} + t_{ni}) / 2$;

R_{zi} – активний опір заготовки при температурі $t_{cepi} = (t_{ki} + t_{ni}) / 2$.

Повний час нагрівання

$$\tau_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_i + \dots + \tau_k. \quad (15)$$

Час циклу можна отримати, додавши час завантаження та вивантаження установки τ_0 :

$$\tau_{ци} = \tau_n + \tau_0. \quad (16)$$

Тепловий ККД можна визначити теоретично, враховуючи види втрат і виходячи з теоретичного мінімуму енергії, необхідного для нагрівання цієї маси металу деталі, що нагрівається до відповідної граничної температури.

Слід зазначити, що опір нагрівальних елементів збільшується приблизно на 5...6 % кожні 1000 год при безперервному режимі на чистому повітрі за температури 1400 °С, а при температурі 1000 °С – на 3 % кожні 1000 год. Необхідно брати до уваги, що будь-які незначні зміни в умовах експлуатації можуть вплинути на темпи «старіння» [18]. Карбідокремнієві елементи не мають спеціальних номінальних значень у ватах, і номінальна потужність – це функціональна залежність необхідної робочої температури, робочої атмосфери та режиму експлуатації. Навантаження, Вт/см², на поверхню обчислюється за рахунок поділу потужності кожного елемента на площу поверхні «гарячої» зони. Оскільки навантаження на поверхню безпосередньо залежить від температури елемента, необхідно вибрати найменше навантаження на одиницю потужності для оптимального терміну служби елемента, як правило, це 3...8 Вт/см².

Результати та обговорення.

Встановлено, що зі збільшенням внутрішніх розмірів пічної камери відношення максимальної споживаної потужності N_{max} (кВт) до площі пода печі S_f (м²) або розподілена по площі пода потужність W_s

(кВт/м²) відносно невеликою мірою змінюється зі зміною площі пода. Як впливає з рис. 3, зі зміною площі пода приблизно вдвічі навколо середнього

значення у наведеній гамі моделей печей Mobilotherm (табл. 1), яким приймемо відповідне моделі W3300/14 ($S_f = 2,8 \text{ м}^2$), величина W_s змінюється в межах 10 %.

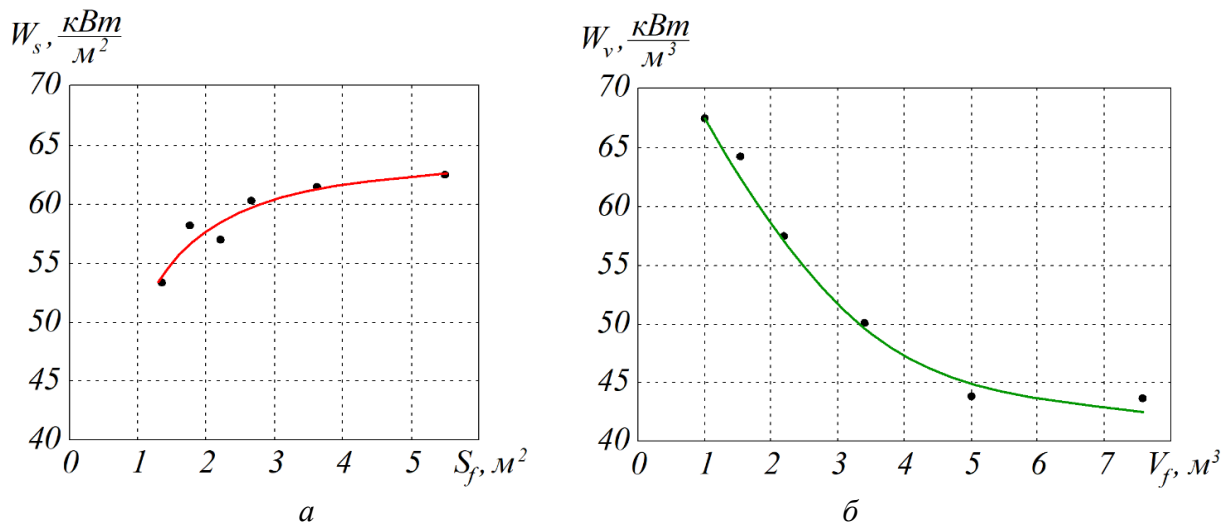


Рис. 3. Фактографія залежностей розподіленої за площею пода потужності W_s від площі пода S_f (а) і питомої потужності W_v від внутрішнього об'єму V_f (б) для гамі моделей печей Mobilotherm, призначених для випалу кераміки з максимальною робочою температурою $T_{\max} = 1400 \text{ °C}$

Тому при одноярусному завантаженні печі використання цієї зміни на користь економії енерговитрат, що припадають на одиницю та весь випуск продукції, відносно малозначуще. Наприклад, при виготовленні партії виробів габаритні розміри становили $D = 100 \text{ мм}$, $h = 50 \text{ мм}$ при внутрішніх розмірах пічної лабораторної камери $400 \times 400 \times 450 \text{ мм}^2$ і призначені для виготовлення в першу чергу стільникових керамічних носіїв каталізаторів автомобілів та інших виробів. Якби ця партія виготовлялася в печах Mobilotherm, то при переході від моделі W1000/14 до моделі W7500/14 при тому самому коефіцієнті використання площі пода в перерахунку на один виріб, що і в лабораторних умовах ($k_{us} \approx 0,9$), випуск деталей за один термічний цикл печі збільшується з 10 до 50 виробів, при зростанні сумарних енерговитрат майже в п'ять разів або майже в 1,5 раза в перерахунку на один виріб.

З іншого боку, зі збільшенням внутрішніх розмірів пічної камери, тобто об'єму печі, відношення максимальної споживаної потужності N_{\max} (кВт) до робочого об'єму печі V_f (м³), або питома потужність W_v (кВт/м³), змінюється помітно більшою мірою в межах аналізованої гамі моделей печей (рис. 3). Зі збільшенням робочого об'єму печі з $V_f = 1,024 \text{ м}^3$ до $V_f = 7,56 \text{ м}^3$, або приблизно в 7,4 раза, питома потужність знижується більш ніж у 1,5 раза, що дає змогу в деяких випадках розглядати питання доцільності багатоярусного завантаження печі, особливо зі змінними висувними подами, якщо розміри виробу і конструкція форми, що містить його, дають змогу здійснювати таке завантаження.

Так, при вирішенні виробничого завдання, розглянутого вище та відповідного, приймаючи значення коефіцієнтів використання площі та висоти

пода в перерахунку на один виріб відповідно $k_{us} = 0,9$ і $k_{uh} = 0,5$, у межах аналізованої гами моделей печей (табл. 1) можна збільшити випуск, наприклад стільникових носіїв каталізаторів за один термічний цикл печі з 64 до 364 виробів, або приблизно на 470 %, причому зменшення енерговитрат у перерахунку на один виріб становить близько 15 %. Разом з розмірами робочої камери важливі конструктивні

особливості агрегату випалу не менше можуть визначати обсяг споживаної енергії.

У табл. 2 наведено результати узагальнення деяких рекламних даних сучасних виробників термічного обладнання про техніко-економічні показники різних типів печей, рекомендованих для випалу кераміки з максимальною робочою температурою $T_{max} = 1400$ °С.

Таблиця 2

Відносне середнє питоме споживання енергії різними агрегатами

Агрегат	Питоме споживання, %
Піч з рухомим подом	100
Звичайна тунельна піч	93
Піч з верхніми та нижніми пальниками, візками з легкою вогнетривкою футеровкою для прискореного випалу	61
Піч для прискореного випалу з верхніми пальниками та рухомим подом	50
Роликова піч	31

З поданого випливає, що зниження енергоспоживання при випалі можна досягти ускладненням конструкції печей, а отже, підвищенням їхньої відпускної ціни та непродуктивних експлуатаційних витрат.

З точки зору споживача, економічна доцільність використання такого прогресивного, але дорогого обладнання виникає при досить великих обсягах замовлень і сталому попиті. До того ж з використанням обладнання підвищеної складності виникають додаткові питання резервування надійності технологічних систем, що включають його, вирішення яких також пов'язане з додатковими витратами, знову ж таки тим більше виправданими, чим більші і стабільніші масштаби виробництва.

Слід зазначити, що дещо вищий рівень питомого споживання енергії при використанні печей з рухомим подом без додаткових верхніх пальників порівняно зі звичайними тунельними печами завдяки можливості більш ефективного використання залишкового тепла, як це було

зазначено раніше, певною мірою компенсується в загальній структурі енерговитрат потокового виробництва (до того ж більш продуктивного при використанні схеми обміну висувними подами при розвантаженні печі).

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– при проектуванні та прогнозуванні нових і реконструйованих керамічних виробництв рекомендується, зокрема, звертати увагу на облік конструктивних, геометричних, температурних та енергетичних особливостей і можливостей печей, що розглядаються у взаємозв'язку зі структурно-параметричними характеристиками технологічних регламентів, що освоюються. Для апріорного порівняльного оцінювання енергоемності та принципових технологічних поліваріантів і технічного середовища їхньої можливої реалізації необхідна розрахункова схема, що буде

використана при аналізі конкретних ситуацій відносно різних типів керамічних деталей, температура спікання яких перевищує 1400 °С;

– на підставі досліджень енергозберігаючих продуктивних технологій для виготовлення стільникових керамічних носіїв, а також з урахуванням світових тенденцій удосконалення техніки і технологій аналогічного застосування можна стверджувати, що додаткове зниження енерговитрат при спіканні в

електричних печах на випуск одного виробу та підвищення продуктивності виробництва пов'язано з урівноважуванням теплового балансу печі, зниженням теплових втрат і застосуванням конструкцій печей, у яких можна використовувати залишкове тепло. Розглянуті методи розрахунку теплового балансу дають змогу вибрати найбільш оптимальні режими нагрівання печей, рекомендувати найбільш теплостійкі і теплоізолюючі матеріали футеровки.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Використання нетрадиційних методів отримання нанопорошків і спікання при розробці модифікованої муліто-ZrO₂ кераміки стійкої до термоудару» (державний реєстраційний номер 0121U1094401).

Список використаних джерел

1. Furnaces. In: Ceramic Materials. Springer. New York, NY. 2007. P. 139–153. DOI: 10.1007/978-0-387-46271-4_9.
2. Zhang Y., Li Q., Zhou H. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces. Academic Press. New York, NY. 2016.
3. Электрические печи сопротивления и дуговые печи: учеб. для техникумов / М. Б. Гутман, Л. С. Кацевич, М. С. Лейканд и др.; под ред. М. Б. Гутмана. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
4. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник / Е. С. Геворкян, Г. Д. Семченко, Л. А. Тимофеева, В. П. Нерубацький. Харків: «Діса плюс», 2015. 344 с.
5. Опанування процесів синтезу оксидних сполук з застосуванням потужного джерела швидкого нагріву вихідних інгредієнтів / В. О. Чишкала, С. В. Литовченко, Е. С. Геворкян та ін. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2021. Вип. 196. С. 118–128. DOI: 10.18664/1994-7852.196.2021.242226.
6. Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Gutsalenko Y., Morozova O. Determining the influence of ultra-dispersed aluminum nitride impurities on the structure and physical-mechanical properties of tool ceramics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 6, No. 12 (114). P. 40–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245938.
7. Xiao J., Jiang S. Experimental study of high temperature vacuum furnace for sintering SiC ceramics. Jingangshi yu Moliao Moju Gongcheng / Diamond and Abrasives Engineering. 2007. Vol. 2. P. 50–52.
8. Фомин Н. И., Затуловский Л. М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. Москва: Металлургия, 1979. 247 с.
9. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: учеб. для вузов / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др.; под ред. А. Д. Свенчанского. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоиздат, 1981. 296 с.
10. Rovnanik P., Safrankova K. Thermal Behaviour of Metakaolin / Fly Ash Geopolymers with Chamotte Aggregate. Materials. 2016. Vol. 9 (7). P. 535. DOI: 10.3390/ma9070535.

11. Thethwayo B. M., Steenkamp J. D. A review of carbon-based refractory materials and their applications. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol. 120 (11). P. 641–650. DOI: 10.17159/2411-9717/1011/2020.
12. Logar V., Skrjanc I. The Influence of Electric-Arc-Furnace Input Feeds on its Electrical Energy Consumption. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021. Vol. 7. P. 1013–1026. DOI: 10.1007/s40831-021-00390-y.
13. Bayindir R. Design and construction of an electrical furnace to fire ceramic product. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2007. Vol. 66 (2). P. 135–140.
14. Gankov A., Stanev R. Improvement of sintering process of platinum layers in electrical furnaces. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017. Vol. 52, No. 2. P. 346–354.
15. Gevorkyan E., Chmiel J., Wiśnicki B., Dzhuguryan T., Rucki M., Nerubatskyi V. Smart sustainable production management for city multifloor manufacturing clusters: An energy efficient approach to the choice of ceramic filter sintering technology. *Energies*. 2022. Vol. 15, Is. 17. P. 6443. DOI: 10.3390/en15176443.
16. Про енергетичну ефективність: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. Чинний. 2022. № 2. Ст. 8.
17. Логачев М. В., Іваницький Н. І., Давидович Л. М. Расчёты нагревательных устройств: в 3 ч. Минск: БНТУ, 2010. Ч. 2. Расчёты электрических печей и установок. 131 с.
18. Remanufacturing and Advanced Machining Processes for New Materials and Components / E. S. Gevorkyan, M. Rucki, V. P. Nerubatskyi, W. Żurowski, Z. Siemiątkowski, D. Morozow, A. G. Kharatyan. Taylor & Francis, 2022. 204 p.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 596-32-16.

E-mail: edsgev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Зінченко Олена Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 790-37-95.

E-mail: lena.zinchenko15@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2294-9527.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Морозова Оксана Миколаївна, аспірантка кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (097) 170-62-95.

E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Gevorkyan Edwin Spartakovych, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 596-32-16. E-mail: edsgev@gmail.com.

ORCID iD: 0000-0003-0521-3577.

Zinchenko Olena Yevhenivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (067) 790-37-95.

E-mail: lena.zinchenko15@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2294-9527.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Morozova Oksana Mykolaivna, Postgraduate, Department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (097) 170-62-95. E-mail: oksanabakan2012@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7397-2861.

Статтю прийнято 20.03.2023 р.

УДК 629.7

УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ В АВТОРЕМОНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Кандидати техн. наук О. М. Кириченко, В. П. Раківненко, А. В. Колісник

IMPROVEMENT OF VIBRATING EQUIPMENT FOR CLEANING CONTAMINATION OF PARTS AND UNITS IN AUTO REPAIR INDUSTRY

PhD (Tech.) O. M. Kirichenko, PhD (Tech.) V. P. Rakivnenko, PhD (Tech.) A. V. Kolisnyk

***Анотація.** У роботі наведено приклади обладнання для вібраційного очищення забруднень на поверхні окремих деталей і вузлів автомобілів, що підлягають ремонту. Розглянуто удосконалення устаткування, яке полягає в забезпеченні підвищення довговічності та безпечної експлуатації роботи вібраційних пристроїв шляхом усунення резонансного биття під час пускового моменту. Запропоноване обладнання безрезонансного вібраційного очищення від забруднень деталей дає змогу підвищити довговічність і безпеку пристрою за рахунок виключення резонансного биття вібраційного обладнання в момент запуску.*

***Ключові слова:** поверхні деталей автомобілів, віброрідинний спосіб, безрезонансний віброрідинний спосіб, явище резонансу, роторний гідравлічний дебаланс.*

***Abstract.** The paper considers the task of increasing the durability and safe operation of the device by eliminating the resonant beat of the vibration equipment during the starting torque.*

During the operation of automobiles, contaminants form on the surface of individual parts and assemblies, their high-quality cleaning is achieved by chemical and mechanical action on these contaminants. The use of more active chemicals is more costly and pollutes the environment. Therefore, it is desirable to achieve an increase in the efficiency of washing and cleaning by increasing the mechanical effect on pollution.

It is proposed to improve the equipment for the vibrational cleaning of contamination of parts, which allows to ensure the elimination of resonant beating of the vibrating equipment during the application of the starting torque.

The disadvantage of existing technologies is that during the washing and cleaning of parts with the help of vibrating machines, a phenomenon of resonance occurs, that is, a momentary beating occurs, which destroys bearing assemblies and seals, and there is a possibility of chemical liquid spilling out. To ensure the durability and safe operation of vibration devices, it is necessary to eliminate the resonant beating of the vibration equipment during the application of the starting moment.

The technical result, which can be obtained when using a device for resonance-free vibration cleaning of contamination of parts, allows to ensure the elimination of resonant beating of vibrating equipment during the starting moment.

The proposed technology for non-resonant vibration cleaning of contamination of parts, which contains a frame bath, flexible flange and membrane, metal washers, rubber gaskets and a vibration unit with a rotary hydraulic imbalance, in the process of operation, allows to increase the durability and safety of the device by eliminating the resonant beating of the vibrating equipment during starting moment.

Keywords: *vibro-fluid method, non-resonant vibro-liquid method, resonance phenomenon, rotary hydraulic unbalance.*

Вступ. Для забезпечення належної чистоти і якості поверхні деталей автомобілів, що підлягають ремонту та очищенню, розроблено ряд процесів з використанням хімічного і механічного впливу на ці забруднення. Таке спеціальне обладнання, що виготовляється для очищення та миття деталей і вузлів від різних забруднень, дуже потрібно на авторемонтному виробництві. Задовольнити потреби промисловості в цьому плані можна за рахунок впровадження очисних і мийних машин, побудованих на основі вібраційних методів, що забезпечують високу уніфікацію і гнучкість. Використання більш активних хімічних речовин пов'язане зі значними витратами, а також вони забруднюють навколишнє середовище. Тому підвищення ефективності миття і очищення бажано досягати за рахунок збільшення механічної дії на забруднення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто методика проектування вібраційних машин для очищення та миття деталей при ремонті у дрібносерійному та одиничному виробництві. У роботі [5] проведено аналіз вібраційних приводів для машин очищення та миття. Визначено, що основним критерієм вибору виду привода є постійність амплітуди коливань привода при зміні частоти коливань. Таким вимогам відповідають механічні ексцентрикові та кривошипно-шатунні приводи. Вони рекомендуються для застосування у вібраційних машинах для очищення та миття. У роботі [2] проаналізовано умови роботи деталей у вузлах вібраційної машини під час роботи і наведено найбільш навантажені деталі, що зазнають циклічних впливів. Подано особливості методики визначення параметрів конструктивних

елементів вузла пульсації вібраційної машини для очищення та миття у програмному продукті Cosmos Works. Недоліком існуючих технологій є те, що під час миття та очищення деталей за допомогою вібраційних машин виникає явище резонансу, тобто з'являється миттєве биття, яке руйнує підшипникові вузли та ущільнення, і виникає можливість виливання хімічної рідини назовні.

Визначення мети та завдання дослідження. Запропоновано удосконалення обладнання для вібраційного очищення забруднень деталей, що дає змогу усунути резонансне биття вібраційного устаткування під час прикладання пускового моменту.

Виклад основного матеріалу. Існують різні конструкції машин і пристроїв з вібраційним приводом, застосовувані для очисних операцій. В одному з таких способів обробка здійснюється у вібраційних камерах – контейнерах [3], у які завантажуються деталі, абразивні наповнювачі та хімічне робоче середовище. У камері здійснюється вібрація у двох чи трьох напрямках. Принципова схема установки наведена на рис. 1.

За останні роки конструкція вібростендів значно змінилася, застосована оригінальна система підвіски рухомих частин, що забезпечує малий опір по осі руху і велику жорсткість по перпендикулярних осях. На сьогодні випускаються електродинамічні вібраційні установки типу УВЕП-4000 [4]. Завдяки новій підвісці та конструкції рухомого столу з застосуванням композиційних матеріалів вдалося значно знизити кількість пошкоджень і досягти малих коефіцієнтів нерівномірності розподілу прискорення та поперечних складових до великих значень частот.

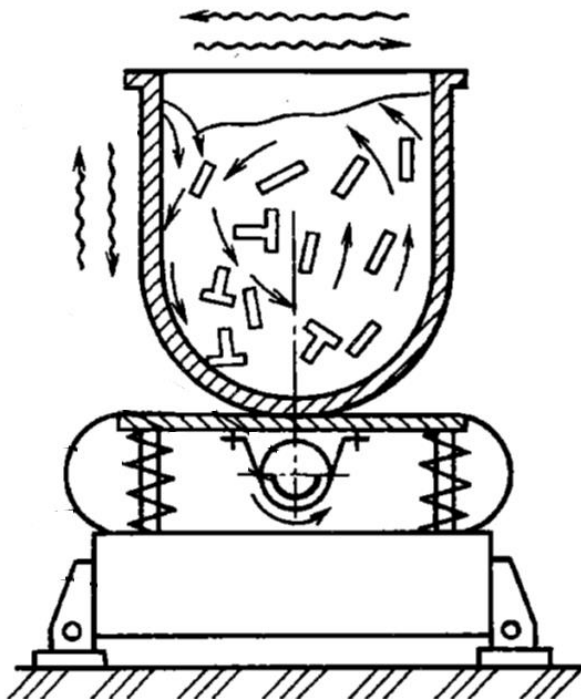


Рис. 1. Схема камери вібраційно-абразивної обробки деталей

Розглянемо вібраційний верстат для обробки деталей у середовищі гранульованого наповнювача [5], що здійснює вібраційну обробку деталей абразивом. Пристрій являє собою двигун, пружно встановлену на основі платформу з контейнером тороїдальної форми, вібратор і розвантажувальний пристрій, виконаний у вигляді з'єднаної з контейнером циліндричної горловини з кришкою.

Він забезпечений дебалансним валом, з'єднаним з двигуном і розміщеним у центральному отворі камери, причому вал виконаний ступінчастим, а вібратор – у вигляді двох дебалансів, один з яких жорстко встановлений на верхньому ступені вала, а другий виконаний з фіксатором і встановлений на його нижньому ступені з можливістю переустановки відносно верхнього дебалансу, при цьому горловина прислана до контейнера по дотичній, а внутрішній радіус горловини дорівнює радіусу кривизни поперечного перерізу тороїдальної поверхні контейнера. Принципова схема установки наведена на рис. 2.

Розглянемо проблеми, що виникають при роботі вібраційних устаткувань, на прикладі пристрою [6] «Ванна для вібраційного рідкого очищення».

Забруднені деталі завантажуються в корзину, що висить на штангах, закріплених на верхньому поясі каркаса ванни.

Для захисту від вібрації ванна встановлена на пружинних опорах.

Коли частота обертання наближається до власної частоти коливань механічної системи, амплітуда вібрації різко зростає. Це явище називають резонансом [7] (який також називають критичним резонансом або критичною швидкістю обертання). У роторних системах вібрація, викликана обертовим дебалансом, породжує синхронну частоту, що дорівнює частоті обертання ротора. Коли частота обертання ротора наблизиться до власної частоти самої системи, амплітуда вібрації збільшиться. На власній частоті настане резонанс, а вібрація досягне максимальної амплітуди. Зі збільшенням частоти обертання роторного дебалансу відносно власної частоти системи амплітуда зменшуватиметься.

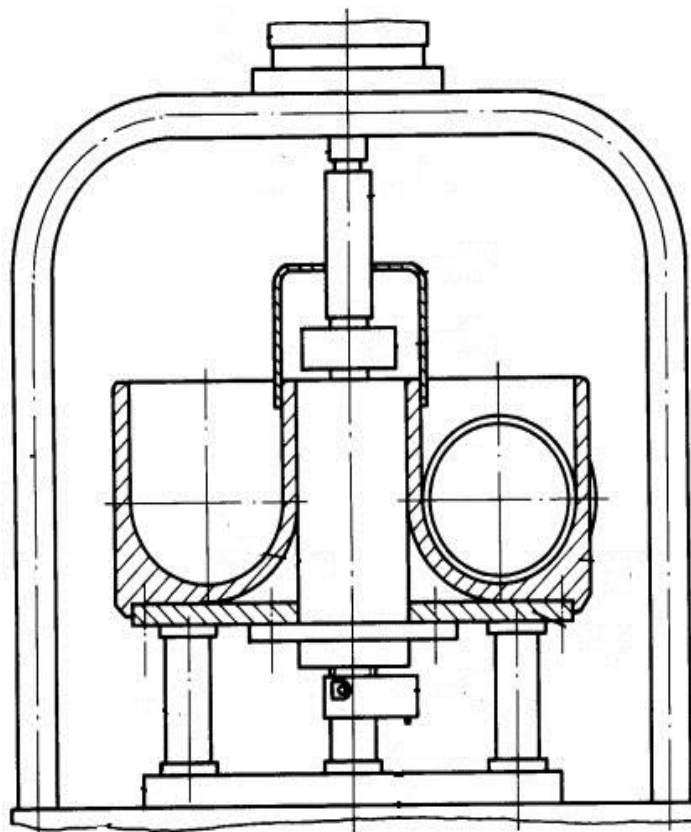


Рис. 2. Вібраційний верстат для обробки деталей у середовищі гранульованого наповнювача

Недоліком усіх вібраційних пристроїв є те, що в момент пуску частота обертання ротора на деяку мить співпадає з частотою вібрації пружинної опори, і виникає явище резонансу, тобто з'являється миттєве биття, яке руйнує підшипникові вузли та ущільнення, і виникає можливість виливання хімічної рідини назовні.

Сильна вібрація на резонансі породжує небезпеку великої напруги в роторі, контакту між ротором і статором і прискороеного зношування ущільнень, підшипників, інших вузлів та окремих деталей.

Для забезпечення довговічності та безпечної експлуатації роботи вібраційних пристроїв необхідно усунути резонансне биття вібраційного устаткування під час прикладання пускового моменту.

Розглянемо технологію [8] безрезонансного вібраційного устаткування для очищення забруднень деталей, що

містить каркасну ванну та вібраційний вузол з роторним гідравлічним дебалансом, який у процесі роботи дає змогу підвищити довговічність і безпечність пристрою шляхом усунення резонансного биття віброустаткування під час прикладання пускового моменту.

Принципова схема пропонованої установки наведена на рис. 3.

Пропонована установка містить корзину 1, що висить на штангах 2, каркасну ванну 3, мембрану 4, гнучкий фланець 6, кришку 7 зі шпильками 5, гумові прокладки 19 і 20, металеві шайби 8 і 9, стрижень 10 з кронштейном 11, на якому кріпляться підшипники кочення 12, у яких обертається роторний гідравлічний дебаланс 24, на який передається обертання через клинопасову передачу 17 від електродвигуна 16, встановленого на рамі 13.

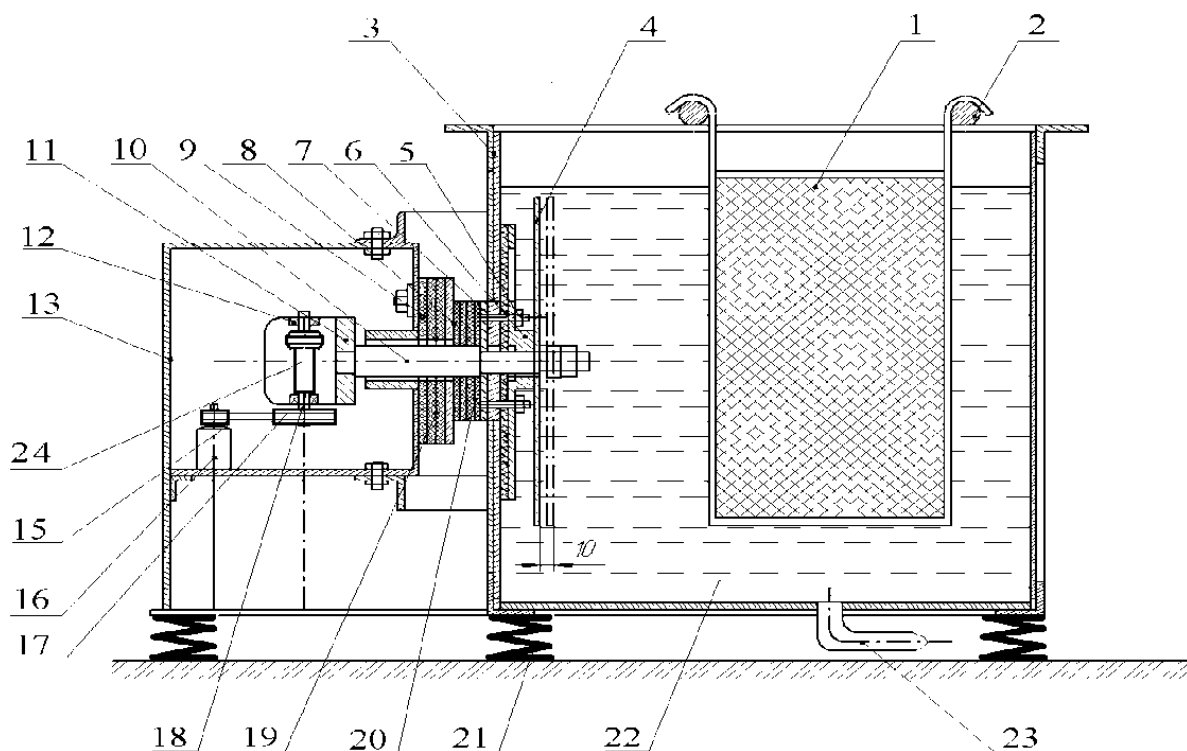


Рис. 3. Ванна для очищення деталей і вузлів безрезонансним віброрідинним способом

Ванна встановлена на пружинних опорах 21. Для зливу розчину 22 передбачений патрубок 23.

Для усунення резонансного биття віброустаткування під час прикладання пускового моменту використовується

запропонований пристрій «Роторний гідравлічний дебаланс» [9].

Принципова схема пропонованого пристрою «Роторний гідравлічний дебаланс» наведена на рис. 4.

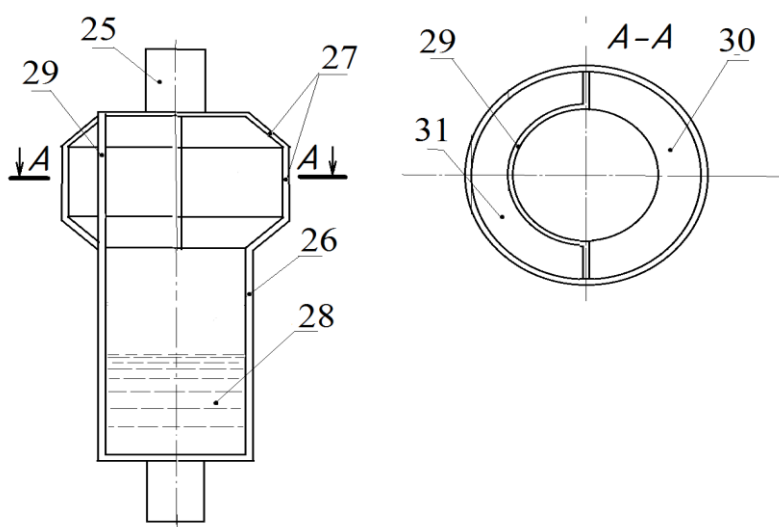


Рис. 4. Роторний гідравлічний дебаланс для установки на ванну для очищення деталей і вузлів безрезонансним віброрідинним способом

Роторний гідравлічний дебаланс містить вал-ротор 25 з порожнистим циліндром 26 і порожнистим циліндром з конічними переходами 27, у яких міститься робоча рідина 28. Перегородка 29 розділяє циліндр з конічними переходами 27 на дві частини – дебалансну камеру 30 і балансну камеру 31.

Принцип роботи пропонованого гідравлічного дебалансу є таким.

На рис. 5 показано різні положення рідини в гідравлічному дебалансі при наборі частоти обертів під час пуску:

а) у статичному положенні ($n=0$);

б) при резонансній частоті обертів ($n = n_{\text{резонанс}}$) під час пуску під дією відцентрової сили рідина починає розміщуватися вздовж стінок циліндра 2. У цьому випадку вібрація відсутня;

в) максимальному наборі частоти обертів ($n=n_{\text{макс}}$) рідина заповнює дебалансну камеру, і виникає постійна вібрація.

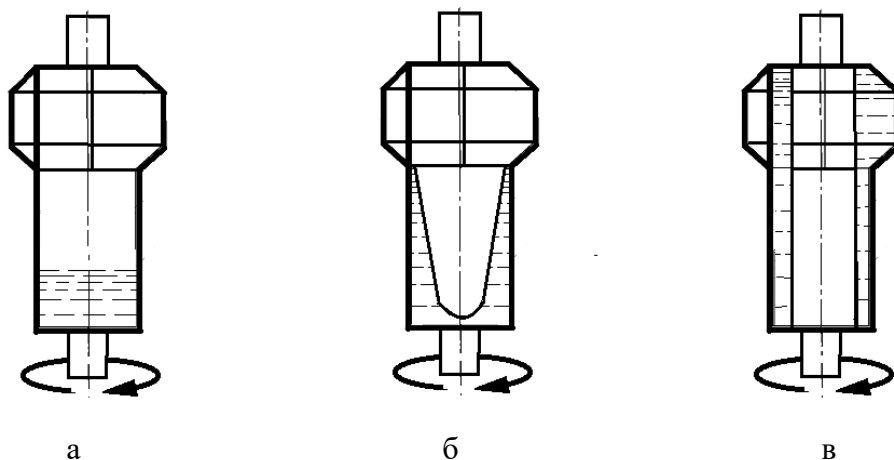


Рис. 5. Положення рідини в гідравлічному дебалансі при наборі частоти обертів під час пуску:

а – кількість обертів $n = 0$; б – кількість обертів $n = n_{\text{резонанс}}$; в – кількість обертів $n = n_{\text{макс}}$

Висновки. Порівняльний аналіз існуючої технології очищення і знежирення деталей у прототипі дає змогу зробити висновок, що пропонований пристрій має безсумнівні переваги експлуатації пристрою, до яких належать підвищення довговічності безрезонансної роботи пристрою у два і більше разів, а також відсутність потрапляння хімічної рідини в

навколишнє середовище. Технічний результат, що може бути отриманий при використанні пристрою для безрезонансного вібраційного очищення забруднень деталей, дає змогу забезпечити усунення резонансного биття вібраційного устаткування під час прикладання пускового моменту.

Список використаних джерел

1. Старий А. Р. Обґрунтування параметрів вібраційної машини для очищення та мийки деталей при ремонті: дис. ... д-ра філософ : 131 – Прикладна механіка. Хмельницький, 2022. 210 с.

2. Старий А., Гордєєв А. Особливості методики визначення параметрів конструктивних елементів вузла пульсації вібраційної машини для очистки та мийки у cosmos works. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/18421> (дата звернення 23.03.2023).
3. Энциклопедия по машиностроению XXL. Віброутворювальна установка. URL: <https://mash-xxl.info/page/021183073058229191211191215105144160133065059000/> (дата звернення 23.03.2023).
4. Електродинамічні вібраційні установки УВЕП. Лабораторні установки. URL: <http://proflab.com.ua/produkt/product-details/1014-elektrodinamicheskie-vibracionnye-ustanovki-uver.html/> (дата звернення 23.03.2023).
5. Вибрационный станок для обработки деталей в среде гранулированного наполнителя. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2014204C1/ru> (дата звернення 23.03.2023).
6. Ванна для вібраційного рідкого очищення. Энциклопедия по машиностроению XXL. URL: https://mash-xxl.info/searchdata/?squery=%D0%B2%D0%B8%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8&search_area=0 (дата звернення 23.03.2023).
7. Сілін Р. І., Гордєєв А. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія. Хмельницький : ХНУ, 2007. 386 с.
8. Метод підвищення довговічності роботи вібраційного пристрою шляхом усунення резонансного биття під час пуску / В. П. Раківненко О. М. Кириченко, Л. А. Гребеник, Л. П. Іванова. *Збірник наукових праць НАНГУ*. Харків, 2017. Вип. 2. С. 93-95.
9. Вертикальна безрезонансна віброустановка для виробництва бетонних труб великого діаметру: пат. № 107964, МПК В28В 21/14 /Л. А. Гребеник Л. П. Іванова. U201600036; Заявл. 14.01 2016; Опубл. 24.06.2016. Бюл. № 12.

Кириченко Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0001-9136-7593].

E-mail: Akirichenko987@gmail.com.

Раківненко Валерія Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувача кафедрою інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].

E-mail: Valeryrakivnenko@gmail.com.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20.

E-mail: avkolisnyk26@gmail.com.

Kirichenko Oleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor, department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0001-9136-7593]. E-mail: Akirichenko987@gmail.com.

Rakivnenko Valeriya PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].

E-mail: Valeryrakivnenko@gmail.com.

Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Senior Lecturer, department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine, ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20.

E-mail: avkolisnyk26@gmail.com.

Статтю прийнято 25.03.2023 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 697.347

**ОСНОВНІ ПОМИЛКИ ПІД ЧАС РЕМОНТУ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ
ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВОГО ФОНДУ**

Д-р техн. наук І. О. Редько, кандидати техн. наук О. В. Гвоздецький, Ю. І. Чайка,
аспірант В. Ю. Заїка

**MAIN ERRORS DURING THE REPAIR OF EXISTING CENTRALIZED HEATING
SYSTEMS OF THE HOUSING FUND**

Dr. Sc. (Tech.) I. Redko, PhD (Tech.) O. Gvozdeckiy, PhD (Tech.) Y. Chayka,
postgraduate student V. Y. Zaika

Анотація. У статті розглянуто основні помилки при проведенні ремонту, що проводиться не централізовано, а за рахунок власника квартири, існуючих систем опалення житлового фонду забудови з середини по кінець ХХ століття, виконаних зі сталевих трубопроводів, як нагрівальні прилади встановлені чавунні радіатори або сталеві конвектори. Такі системи опалення мають як фізичний, так і моральний знос. Розглянуто питання відмінності понять ремонту і реконструкції; наслідки заміни сталевих трубопроводів на неметалеві; нагрівальних приладів на інші типи, з іншою тепловою потужністю; зміни конфігурації системи опалення; реконструкції однотрубних нерегульованих систем опалення в однотрубні регульовані з установленням радіаторних клапанів і термостатичних елементів.

Ключові слова: ремонт, реконструкція, опалення, теплове навантаження, нагрівальні прилади, трубопроводи, радіаторні клапани.

Abstract. The article examines the main mistakes in the repair, which is not carried out centrally, but at the expense of the owner of the apartment, of the existing heating systems of the housing stock of buildings from the middle to the end of the twentieth century. The heating systems in these residential buildings are central, single-pipe (with upper or lower wiring), not adjustable, made of steel pipelines, either cast-iron radiators or steel "Accord" ("Comfort") convectors are installed as heating devices. Connection schemes of heating systems to heat networks are dependent. A decrease in the temperature of the heat carrier for the heating system of the residential part is provided with the help of an elevator unit. These systems have no regulation, neither local nor individual. These heating systems have both physical and moral wear and tear. Modern heating systems, which belong to the construction of the twenty-first century, are centralized or decentralized two-pipe heating systems, which are made of non-metallic pipelines, and bimetallic radiators or steel panel radiators are installed as heating devices. As a rule, these heating systems have both local and individual regulation. The article examines the difference between the concepts of repair and reconstruction; the consequences of changing steel pipelines to non-metallic ones; errors when choosing the type of pipes; replacement of existing heating devices with other types, with a different heat capacity; changes in the configuration of the heating system, additional installation of heating devices, creation of a heating system "Heat floor" in the apartment; reconstruction of one-pipe

unregulated heating systems into one-pipe regulated ones with the installation of radiator valves and thermostatic elements. In addition, the concepts of heating, heat capacity, heat load, types of regulation of heat supply systems are considered. The main conclusion is that any work related to the reconstruction of the heating system of the apartment leads to an imbalance of the hydraulic and thermal regime of the indoor heating system of the residential building and must be carried out with the knowledge of the balance keeper of the residential building, in accordance with the technical conditions of the heat supply organization and on the basis project solutions.

Keywords: repair, reconstruction, heating, heat load, heating devices, pipelines, radiator valves.

Вступ. Більшість споживачів теплової енергії в місті Харкові мають централізовані системи теплопостачання. Джерелом теплопостачання є теплоелектроцентралі (ТЕЦ), районні, квартальні або групові котельні. Теплова енергія, вироблювана джерелом теплопостачання, йде на потреби систем опалення, гарячого водопостачання та вентиляції. Для житлового фонду існує фактично два теплових навантаження: системи опалення, або тепловий потік системи опалення, і системи гарячого водопостачання.

За роботою [1], опалення – це штучне нагрівання приміщення в опалювальний період року для компенсації теплових втрат і підтримання нормативної температури з середньою незабезпеченістю 50 год/р.

За роботою [2], тепловий потік – фізична величина, яка визначає кількість теплоти, що проходить через ізотермічну поверхню за одиницю часу, спрямована в напрямку, протилежному градієнту температури, або є похідною за часом від кількості тепла, що проходить через таку поверхню.

За приєднанням систем опалення до джерела теплопостачання їх поділяють на централізовані та децентралізовані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основна забудова житлового фонду Харкова належить до забудови другої половини ХХ століття. Системи опалення в таких житлових будинках – централізовані, однотрубні (з верхньою або нижньою розводкою), нерегульовані, виконані зі сталевих трубопроводів, як нагрівальні прилади встановлені або чавунні радіатори,

або конвектори «Акорд» («Комфорт»). Схеми приєднання систем опалення до теплових мереж – залежні. Змішування передбачалося за допомогою елеваторного вузла. Такі системи не мають регулювання ані місцевого, ані індивідуального.

Сучасні системи опалення, що належать до забудови ХХІ століття, – централізовані або децентралізовані двотрубні системи опалення, виконані з неметалевих трубопроводів, як нагрівальні прилади встановлено біметалеві радіатори або сталеві панельні радіатори (останні, за роботою [3], встановлюються в децентралізованих системах опалення або централізованих системах опалення при незалежному приєднанні систем опалення до теплових мереж). Як правило, такі системи опалення мають як місцеве, так і індивідуальне регулювання.

Згідно з роботами [4-7] розглядається реконструкція однотрубних нерегульованих систем опалення в однотрубні або двотрубні регульовані системи опалення, що дає змогу знизити витрати теплової енергії в системі опалення.

Визначення мети та завдання дослідження. В існуючих роботах розглядаються технічні та економічні можливості реконструкції централізованих систем опалення з нерегульованих у регульовані. Але не висвітлено типові помилки при здійсненні ремонту або реконструкції систем централізованого опалення. Однак це важливе питання, особливо якщо стосується не централізованої реконструкції всієї системи опалення в цілому, а лише ремонту чи

реконструкції, що проводиться в одній квартирі чи групі квартир.

Авторами були зібрані дані про основні помилки при проведенні ремонту (реконструкції) власником квартири. Проведено аналіз можливих наслідків і надано висновки.

Основна частина дослідження. За параметрами та витратами теплоносія розрізняють [8, 12]:

- якісне регулювання (за температурою теплоносія, температурним графіком або опалювальним, або опалювально-побутовим);

- кількісне регулювання (за витратами теплоносія);

- якісне-кількісне регулювання (одночасне за температурою та витратами теплоносія).

У системах централізованого теплопостачання міста Харкова прийнято якісне регулювання, тобто при такому регулюванні витрати теплоносія в тепловій мережі є постійною величиною.

Кількість теплової енергії Q_0 , кВт, що подається в систему опалення, визначається за формулою

$$Q_0 = c \cdot G \cdot (\tau_1 - \tau_2), \quad (1)$$

де c – питома теплоємність води, $c = 4,187$ кДж/(кг·°С);

G – витрати теплоносія, кг/с;

τ_1 – температура теплоносія в подавальному трубопроводі, °С;

τ_2 – температура теплоносія у зворотному трубопроводі, °С.

Для гідравлічного ув'язування теплових мереж передбачають обмеження максимальних розрахункових витрат теплоносія. Робиться це для можливості рівномірного розподілу теплової енергії між споживачами відповідно до їхніх максимальних навантажень систем опалення. Як обмежувальні пристрої в житлових будинках сучасної забудови передбачають встановлення автоматичних і

ручних регулюючих пристроїв, до яких відносять клапани регуляторів перепаду тиску, регуляторів теплового потоку, балансувальні клапани тощо. Автоматичне регулювання дає змогу змінювати витрати теплоносія, що надходить до системи опалення, залежно від змін параметрів теплової мережі. Ручне регулювання такої можливості не має. Що стосується забудови другої половини ХХ століття, то на існуючих вузлах управління системою опалення обмеження розрахункових витрат теплоносія відбувається за рахунок встановлених сопел елеватора або дросельних шайб (за умови, що в житловому будинку не проводилася модернізація обладнання теплового пункту). Природно, що в цьому випадку неможливе збільшення або зменшення витрат теплоносія при заданих параметрах теплової мережі (перепаду тиску).

У статті розглянуто основні помилки при проведенні ремонтів систем опалення у квартирах, здійснюваних не централізовано, а безпосередньо власником квартири. Крім того, у статті розглядається житлова забудова другої половини ХХ століття, обладнана однотрубними, вертикальними, нерегульованими системами опалення, виконана зі сталевих трубопроводів, як нагрівальні прилади встановлено чавунні радіатори або конвектори. Такі системи опалення мають моральний і фізичний знос. Кількість помилок при ремонті систем опалення дуже велика, але розглянемо тільки основні, які найчастіше трапляються.

Помилка 1. Різниця між ремонтом і реконструкцією.

Багато власників квартир не розуміють різницю між ремонтом і реконструкцією. Визначення ремонту (капітальний ремонт) і реконструкції наведено в роботі [9].

Капітальний ремонт – сукупність робіт на об'єкті будівництва, введеному в експлуатацію в установленому порядку, без зміни його геометричних розмірів і функціонального призначення, що передбачають втручання в несучі та

огорожувальні системи при заміні або відновленні конструкцій чи інженерних систем та обладнання у зв'язку з їхньою фізичною зношеністю і руйнуванням, поліпшення його експлуатаційних показників, а також благоустрій території.

Реконструкція – перебудова введеного в експлуатацію в установленому порядку об'єкта будівництва, що передбачає зміну його геометричних розмірів і/або функціонального призначення, внаслідок чого відбувається зміна основних техніко-економічних показників (кількість продукції, потужність тощо), забезпечується удосконалення виробництва, підвищення його техніко-економічного рівня та якості продукції, що виготовляється, поліпшення умов експлуатації та якості послуг. Реконструкція передбачає повне або часткове збереження елементів несучих і огорожувальних конструкцій.

Для систем опалення ремонт – це заміна існуючої системи без зміни конфігурації системи в тих самих діаметрах трубопроводів, з того самого матеріалу, з установленням таких самих нагрівальних приладів, тобто заміна існуючих сталевих трубопроводів на такі самі сталеві трубопроводи такого самого діаметру, тільки нові. Заміна нагрівальних приладів на такі самі, чавунні радіатори на чавунні радіатори з такою самою тепловою потужністю однієї секції (без збільшення або зменшення їхньої кількості), конвектора на конвектор того самого типу без збільшення або зменшення їхнього розміру та конфігурації. Якщо власник квартири змінює матеріал трубопроводів або їхній діаметр, тип нагрівальних приладів, місця розташування нагрівальних приладів, додає їх або прибирає, – це вже реконструкція.

Для проведення реконструкції на діючих об'єктах споживач повинен подати заявку в теплопостачальну організацію на отримання технічних умов [10].

Будь-яка реконструкція веде до зміни роботи системи опалення, гідравлічної або теплової. Як результат, ми отримуємо розрегульовану систему опалення, де відбувається нерівномірний розподіл теплової енергії між квартирами, поверхами або стояками системи опалення.

Помилка 2. Заміна сталевих трубопроводів на неметалеві та правильний вибір їхнього діаметра.

При заміні сталевих трубопроводів на неметалеві в основному використовують поліпропіленові труби того або іншого виробника. Зазвичай вважають, якщо сталевий стояк має діаметр умовного проходу 20 мм, то його необхідно замінювати на поліпропіленовий з зовнішнім діаметром 25 мм. Але сталева труба, за роботою [11], маркується за діаметром умовного проходу, а поліпропіленова за зовнішнім діаметром. Сталева труба діаметром умовного проходу 20 мм має зовнішній діаметр 26,8 мм, товщина стінки труби (звичайної) 2,8 мм, тобто внутрішній діаметр складає 21,2 мм. Якщо розглядати поліпропіленову трубу з зовнішнім діаметром 25 мм, то в неї товщина стінки складає 3,5 мм, відповідно внутрішній діаметр 18 мм. Природно, що поліпропіленові труби мають менші гідравлічні опори, ніж сталеві, за рахунок меншого ступеня шорсткості стінок, проте завуження діаметра все одно призводить до збільшення втрат тиску.

Як приклад розглянемо заміну сталевого стояка діаметром умовного проходу 20 мм на поліпропіленовий з зовнішнім діаметром 25 мм, витрати теплоносія 0,1 кг/с, температура теплоносія 80 °С (табл. 1).

Як результат, питомі втрати тиску збільшуються на 26 %, що призведе до збільшення гідравлічного опору і зменшення кількості теплоносія і тепла, що потрапить до споживача, а це впливає на гідравлічний режим роботи системи опалення.

Таблиця 1

Дані швидкості та питомих втрат тиску сталевую та поліпропіленовою трубою

Труба	Внутрішній діаметр, мм	Витрати теплоносія, кг/с	Температура теплоносія, °С	Швидкість теплоносія, м/с	Питомі втрати тиску, Па/м
Сталева	21,2	0,1	80	0,28	82,2
Поліпропіленова	18			0,4	111

Помилка 3. Вибір типу поліпропіленових труб.

При заміні сталевих труб на неметалеві, як вище було вказано, в основному використовують поліпропіленові труби. За каталогом поліпропіленових труб фірми Wavin Ekorplastik [13], у системах централізованого опалення можуть бути використані труби з таким маркуванням: Stabi Plus S3/SDR7,4/Pn28 або Fiber Basalt Plus S3/SDR7,4/Pn28. Останній тип труб легший у монтажі, тому багато монтажників вибирають цей тип труб. Однак він армований шаром базальтового волокна, а не шаром алюмінію, як труби з маркуванням Stabi Plus. Армування шаром алюмінію не допускає дифузії кисню з атмосферного повітря в теплоносії через стінку трубопроводу внаслідок градієнта концентрацій. Тому в централізованих системах опалення мають бути використані поліпропіленові труби з маркуванням Stabi Plus S3/SDR7,4/Pn28.

Помилка 4. Заміна нагрівальних приладів зі зміною їхнього типу.

В існуючих системах опалення другої половини XX століття в основному встановлювалися чавунні радіатори М-140 або конвектори «Акорд», «Комфорт».

Власники квартир при заміні нагрівальних приладів найчастіше використовують біметалеві радіатори або сталеві панельні радіатори того чи іншого виробника. Щодо останніх, то, за роботою [3], їх встановлення заборонено в централізованих системах опалення при залежному підключенні систем опалення до теплових мереж. У зв'язку з тим, що ми розглядаємо житлові будинки того періоду забудови, підключені за допомогою елеваторних вузлів, можна зробити висновок, що їх розглядати як заміну не можна.

При заміні нагрівальних приладів ніхто не звертає увагу, що нові нагрівальні прилади повинні мати таку саму теплову потужність, як і раніше встановлені. У кращому випадку, якщо встановлений 10-секційний чавунний радіатор, його змінюють на 10-секційний біметалевий. Однак теплова потужність однієї секції при однаковому температурному напорі чавунного та біметалевого радіатора різні. Крім того, залежно від виробника геометричних розмірів, оребріння секції біметалевого радіатора тепловіддача різна. Порівняльні дані секцій нагрівальних приладів наведено в табл. 2. Технічні характеристики наведені відповідно до робіт [14-18].

Таблиця 2

Технічні дані однієї секції нагрівального приладу при температурному напорі 70 °С

Тип, марка	Матеріал	Розміри секції висота/ширина/глибина, мм	Теплова потужність однієї секції, кВт
М-140-500	Чавун	578/108/140	0,16
Mirado 500	Біметал	554/80/96	0,202
Альтермо 7	Біметал	556/80/96	0,185
KOER KR.100Bi-500	Біметал	560/80/96	0,238
KOER KR.120Bi-500 MAXI	Біметал	564/80/120	0,465

Якщо в кімнаті квартири встановлено 10 секцій чавунного радіатора сумарною тепловою потужністю 1,6 кВт при температурному напорі 70 °С, то при заміні їх на біметалеві радіатори фірми KOER тип KR.100Bi-500 слід встановити сім секцій. При встановленні 10 секцій такого типу нагрівального приладу ми отримуємо теплову потужність 2,38 кВт, тобто на 33 % більше, ніж необхідно.

Слід зазначити, що за відсутності індивідуального (приладового) регулювання збільшення тепловіддачі нагрівального приладу в одній квартирі призводить до зменшення тепловіддачі в іншій, тобто в сусідів. Як зазначалося раніше, на абонентських вводах встановлено обмежувальні пристрої максимальних розрахункових витрат теплоносія, тобто теплової енергії, відповідно збільшення кількості тепла від джерела теплопостачання (теплових мереж) ми не отримуємо, і збільшення тепловіддачі нагрівальних приладів в одній квартирі веде до зменшення кількості тепла в сусідів.

Помилка 5. Збільшення або зменшення площі нагрівання нагрівальних приладів без зміни сумарного теплового навантаження в кімнаті.

Це питання стосується переважно торцевих кімнат, якими проходять два стояки системи опалення. Багато власників квартир з естетичних міркувань додають або зменшують нагрівальні прилади, тобто з одного стояка прибирають і переносять їх на інший. При цьому загальна кількість секцій (якщо встановлені чавунні радіатори) у кімнаті не змінилася.

Однак якщо прибрати нагрівальний прилад (або частину секцій), ми розвантажуюмо стояк системи опалення, тобто зменшуємо гідравлічні опори. І навпаки, при додаванні секцій ми вносимо додаткові гідравлічні опори, як наслідок, отримуємо розрегулювання по стояках. Фактично стояк, що був додатково завантажений, вже працювати нормально не буде.

Помилка 6. Зміна конфігурації системи опалення.

Деякі власники квартир виводять додаткові нагрівальні прилади на засклену лоджію. Однак треба розуміти, що це призводить не тільки до гідравлічного розрегулювання системи опалення, але також і теплового. У зв'язку зі збільшенням площі нагрівання в одній квартирі інша квартира цього тепла недоотримує, тому що, як було вказано раніше, кількість теплової енергії, що подається від джерела теплопостачання (теплових мереж) до житлового будинку, обмежена за допомогою обмежувальних пристроїв.

Ще гірше, коли власники квартир підключають до стояка системи централізованого опалення систему «тепла підлога» у себе в квартирі. Така система переважно виконана з труб невеликого діаметра у вигляді змійовика або равлика. У цьому випадку вносяться великі додаткові гідравлічні опори, і стояк системи опалення фактично не працює, не кажучи вже про те, що система «тепла підлога» має працювати на теплоносії з низьким температурним потенціалом.

Помилка 7. Переробка однотрубною, вертикальною, нерегульованою системи опалення (рис. 1) в однотрубну, вертикальну, регульовану (рис. 2) і встановлення радіаторних клапанів.

При заміні стояків і нагрівальних приладів у своїй квартирі деякі власники передбачають замикальні ділянки на стояках, що дає змогу передбачати індивідуальне (приладове) регулювання. Такий підхід дає змогу встановити радіаторні клапани з термостатичними елементами на нагрівальних приладах.

Однак при виборі радіаторних клапанів більшість не звертають уваги, що вони бувають для двотрубних та однотрубних систем опалення. Радіаторні клапани для двотрубних систем опалення мають менше значення умовної пропускної спроможності і відповідно збільшені гідравлічні опори, що призводитиме до того,

що до нагрівального приладу надходитиме менші витрати теплоносія, ніж необхідні, і відповідно зменшується теплова потужність нагрівального приладу. Дані з умовної

пропускної здатності радіаторних клапанів фірми Danfoss [19] для двотрубних та однострубних систем опалення наведено в табл. 3.

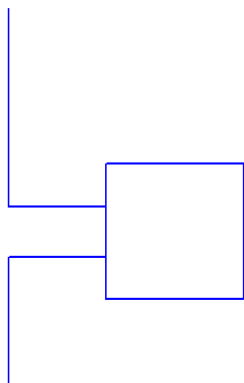


Рис. 1. Однострубна, вертикальна, нерегульована система опалення

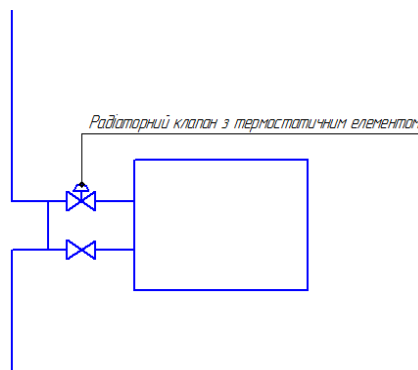


Рис. 2. Однострубна, вертикальна, регульована система опалення

Таблиця 3

Характеристики радіаторних клапанів

Тип	Діаметр, мм	Система опалення	KVs, м ³ /год
RA-N-15	15	Двотрубна	0,9
RA-N-20	20	Двотрубна	1,4
RA-G-15	15	Однострубна	2,06
RA-G-20	20	Однострубна	3,16

Висновки. Власник квартири має чітко розуміти, що таке ремонт і реконструкція. Проведення реконструкції системи опалення (заміна трубопроводів із сталевих на неметалеві, заміна нагрівальних приладів із зміною типу, характеристик) призводить до теплового і гідравлічного розрегулювання внутрішньобудинкової системи опалення.

Витрати теплоносія, а отже, і кількість теплової енергії, що подається на житловий будинок, обмежується за допомогою обмежувальних пристроїв на абонентських вводах. Відповідно ми не можемо отримати більше кількості тепла від джерела теплопостачання (теплових мереж), ніж

встановлена величина. Тому збільшення потужності опалювальних приладів в одній квартирі веде до зменшення кількості теплової енергії, яку отримує сусідня квартира. У свою чергу це може бути приводом до судових спорів між сусідами, теплопостачальною організацією і власником квартири.

Будь-які роботи, пов'язані з реконструкцією системи опалення квартири, мають здійснюватися з відома балансоутримувача житлового будинку відповідно до технічних умов теплопостачальної організації та на підставі проєктних рішень.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 141 с.
2. ДСТУ 3518-97. Термометрія. Терміни та визначення. Київ, 1997. 54 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.5-62:2012. Настанова з проектування та монтажу систем опалення з застосуванням сталевих панельних радіаторів. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 17 с.
4. Модернізація системи опалення багатоквартирного житлового будинку в м. Чугуєві Харківської області / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, Е. Д. Шахненко, С. В. Фомич. *Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць ХНУБА, ХОТВ АБУ*. Харків: ХНУБА, 2018. № 2 (92). С. 259-264.
5. Reconstruction of heating systems of existing residential buildings by means of equipping apartment heating systems with heat meters / O. Taraday, O. Sigal, V. Bugai, N. Pavliuk, Y. Shahnenko. *Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць ХНУБА, ХОТВ АБУ*. Харків: ХНУБА, 2019. № 3 (97). С. 70-744.
6. Чайка Ю. І., Гвоздецький О. В., Красненко Т. І. Економічне обґрунтування модернізації існуючих однотрубних систем опалення. *Науковий вісник будівництва : зб. наук. праць ХНУБА, ХОТВ АБУ*. Харків: ХНУБА, 2015. № 2 (80). С. 257-260.
7. Вплив конструкції внутрішньобудинкових систем опалення на вибір режимів регулювання централізованого теплопостачання / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, О. В. Гвоздецький, С. В. Дяченко. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: зб. праць / Інститут промислової екології*. Київ : ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 66-74.
8. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 57 с.
9. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. Київ: Мінрегіон України, 2014. 43 с.
10. Правила користування тепловою енергією: Постанова КМ України № 1198 від 03.10.2007 р. Київ, 2007. 11 с.
11. ДСТУ 8936:2019. Труби сталеві водогазопровідні. Технічні умови. Київ, 2019. 13 с.
12. Єнін П. М., Швачко Н.А. Теплопостачання. Ч. І. Теплові мережі і споруди: навч. посіб. Київ: Кондор, 2007. 244 с.
13. Каталог виробів Wawin. URL: <https://www.ekoplastik.ua/downloads/UKR-Katalog-Wavin-Ekoplastik-2021.pdf> (дата звернення: 12.01.2023).
14. Опалення: навч. посіб. / Н. О. Безпалько, Т. Б. Боброва, С. М. Високос та ін. Київ: Ресурсний центр ГУРТ, 2019. 133 с.
15. Любарець О. П., Зайцев О. М., Любарець В. О. Проектування водяних систем опалення: посіб. для проектувальників, інженерів і студентів ВНЗ. Відень-Київ-Сімферополь, 2010. 201 с.
16. Технічні характеристики нагрівального приладу. URL: <https://santehrai.com/catalog/sekcijni-radiatory/mirado-2/#mirado-500> (дата звернення: 12.01.2023).
17. Технічні характеристики нагрівального приладу. URL: <https://altermo.ua/products/model-altermo-7-f30031127> (дата звернення: 12.01.2023).

18. Технічні характеристики нагрівального приладу. URL: <https://koer-sanitary.com/bimetallicheskie-radiatory> (дата звернення: 12.01.2023).

19. Радіаторні клапана та термостатичні елементи. URL: <https://www.danfoss.com/uk-ua/products/dhs/radiator-and-room-thermostats/#tab-radiator-thermostats> (дата звернення: 12.01.2023).

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. Тел.: +38(050)400-77-99. E-mail: ihor.redko1972@gmail.com.

Гвоздецький Олександр Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0002-4239-9895. Тел.: +38(050)88-624-88. E-mail: npp-tghv@ukr.net.

Чайка Юрій Іванович, кандидат технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0003-1021-4662. Тел.: +38(050)634-18-76. E-mail: yuri.chayka@gmail.com.

Заїка Віталій Юрійович, аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова.

ORCID iD: 0000-0002-2681-1974. Тел.: +38(066)791-16-54. E-mail: 3bu@ukr.net.

Redko Ihor, Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. Tel.: +38(050)400-77-99. Email: ihor.redko1972@gmail.com.

Gvozdeckiy Oleksandr, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-4239-9895. Tel.: +38(050)88-624-88. E-mail: npp-tghv@ukr.net.

Chayka Yuriy, PhD (Tech). Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-1021-4662. Tel.: +38(050)634-18-76. E-mail: yuri.chayka@gmail.com.

Zaika Vitalii, postgraduate student, Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-2681-1974. Tel.: +38(066)791-16-54. E-mail: 3bu@ukr.net.

Статтю прийнято 10.03.2023 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.463.65:621.863

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ПІВВАГОН ПРИ РОЗВАНТАЖЕННІ РОТОРНИМ ВАГОНОПЕРЕКИДАЧЕМ

Канд. техн. наук Р. І. Візньак

THE SIGNIFICANCE OF DYNAMIC FORCES ACTING ON A GONDOLA CAR WHEN UNLOADING BY A ROTARY CAR DUMPER

PhD (Tech.), Associate Professor R. Viznyak

***Анотація.** У статті розглянуто фактори, що впливають на міцність піввагонів при розвантаженні на роторних вагоноперекидачах, перед чим був проведений попередній ретельний аналіз їхніх характерних пошкоджень і несправностей. Побудовано розрахункові схеми системної конструкції і виконано аналітичне визначення інерційних складових динамічного процесу перекидання. Запропоновано початкові рекомендації щодо проектування конструкції кузова, що зазнав впливу великих динамічних навантажень при обов'язкових розвантажувальних роботах транспортного засобу.*

***Ключові слова:** піввагон, кузов, розвантаження, насипний вантаж, пошкодження, збереження, міцність, удосконалення несучої конструкції.*

***Abstract.** The article considers the factors influencing the strength of gondola cars during unloading on rotary car dumpers, before which a preliminary careful analysis of their characteristic damage and malfunctions was carried out. The calculated schemes of the system design are constructed and the analytical determination of the inertial components of the dynamic overturning process is performed. Initial recommendations for the design of the body structure, which is exposed to high dynamic loads during the mandatory unloading of the freight vehicle. The issue of fleet conservation is important for owners and operators of rolling stock, based on the balance of working and non-working fleet. The main cause of damage to the load-bearing structure of the gondola is non-compliance with the content of regulatory documents when performing loading and unloading operations. Unloading of gondola cars in the method of overturning was introduced at industrial enterprises in the last century during the intensive industrialization of the German experience and supply of equipment and is now successfully carried out using special technical devices - stationary rotor tippers. According to the results: acceleration of the PV body occurs at an angle of rotation of about 60°; the maximum values of accelerations are observed at an angle of rotation of 125°. This is done at the final stage of the flow of the load, because the final component of the full angle of rotation no longer affects the dynamics, because the load in the body is not a large part. The results of theoretical research at the design stage of the PV allow to take into account possible dynamic factors due to the overturning of the PV body, and prevent probable damage, assess the margin of safety and reliability of the body structure, which will ultimately reduce maintenance costs and increase life cycle load.*

***Keywords:** gondola car, body, unloading, bulk cargo, damages, safety, strength, improvement of carrier constructing.*

Вступ. Питання збереження вагонного парку в сучасному перевізному процесі має важливе значення для власників та операторів рухомого складу виходячи з балансу робочого і неробочого парків. Головною причиною пошкоджень несучої конструкції піввагона є недотримання змісту нормативних документів при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт. Розвантаження піввагонів (ПВ) способом перекидання було введено на промислових підприємствах ще в минулому столітті під час інтенсивної індустріалізації за німецьким досвідом і поставленням техніки і зараз успішно здійснюється за допомогою спеціальних технічних пристосувань – стаціонарних вагоперекидачів роторного принципу дії (СРВП). Оскільки ПВ при перекиданні, знаходячись у єдиній механічній системі з СРВП, зазнає значного силового впливу з боку його робочих органів, важливим є питання визначення, контролювання та подальшого нормування динамічних навантажень, які діють під час розвантаження, що забезпечуватиме збереження несучої конструкції кузова ПВ, його вузлів та елементів, уникаючи при цьому характерних пошкоджень і несправностей, а також непередбачених витрат на ремонтні роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чітке визначення динамічних сил і ретельний аналіз впливу їхніх величин на збереження і міцність конструкції вузлів та елементів при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт є однією з обов'язкових процедур оцінювання технічного стану та експлуатаційної надійності вантажних вагонів, а саме ПВ, що отримало продовження досліджень цієї проблематики в роботах [1-6].

При проведенні досліджень з метою теоретичного визначення динамічних сил, діючих на елементи несучої конструкції кузовів ПВ, здійснювався їхній натурний огляд, зібрання та обробка статистичних

даних характерних пошкоджень і несправностей. Особливо приділялася увага тим пошкодженням і несправностям, що відповідають інтенсивному застосуванню робочих органів цих технічних засобів при вивантаженні кузовів з метою їхньої подальшої класифікації. Виявлено, що найбільш поширеною причиною пошкоджень в елементах конструкції є недотримання та відхилення від обов'язкового виконання умов ДСТУ: ГОСТів, що регламентують технічні параметри та нормативи для використання засобів механізації при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт, за роботами [1, 6-8]. Ця проблематика також досліджувалась у роботах [9, 10] і вже знайшла відповідні конструкційні технічні рішення. Але ще не досить повно відображено визначення кінематичних і динамічних факторів і їхній вплив на несучу конструкцію кузовів ПВ при виконанні процесу перекидання, а саме на СРВП, як найбільш продуктивного способу і технічного засобу, що в подальшому дасть змогу скласти реальне уявлення та вірогідно оцінити міцність при навантаженості з метою визначення технічного стану ПВ для подальшого здійснення належних функцій у перевізному процесі.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є визначення та уточнення силових факторів, що діють на вузли та елементи конструкції ПВ при розвантаженні на СРВП способом перекидання при обертальному русі. При цьому були поставлені такі основні завдання дослідження:

- з'ясування характеру дії експлуатаційних навантажень на ПВ із міркування їхнього впливу на рівень пошкоджень і збереження;
- доопрацювання розрахункових схем і особливостей фізичного процесу перекидання, отримання кінематичних параметрів;
- побудова уточненої математичної моделі для визначення динамічних

факторів, що діють на НВ під час розвантаження.

Основна частина дослідження. При вивантаженні з ПВ насипних вантажів способом перекидання основними пошкодженнями несучої конструкції при підвищених величинах навантажень, що діють на кузов, є злами обшивки, обриви і вигін стійок кузова, прогини верхньої обв'язки в місцях контакту з упорами СРВП, деформація торцевих стійок, випадання пружин ресорного підвішування візків, центруючих балочок і маятникових підвісок автозчепок, чек гальмових колодок. На відміну від попередніх способів розвантаження, рівень збереження і надійності ПВ залежить від наявності справного армування привалочної плити і упорів СРВП, а також виконання технічних вимог, що висуваються до збереження рухомого складу [11, 12].

Усі типи перекидачів працюють за принципом обертання вагона навколо свого центра тяжіння, тому навантаження, що діють на кузови, мають ураховуватися за деяким наближенням як ідентичні. Це такі їхні види, систематизовані на рис. 1, 2:

- ударне на бокову стіну ПВ при приляганні до привалочної плити, що характеризує величина кута повороту ротора на $9-16^\circ$. Величина сили залежить від багатьох факторів, у першу чергу кінематичних і геометричних;

- ударне на верхній обв'язочний пояс при контакті з верхніми упорами. Навантаження характеризується також швидкістю обертання ротора, масою платформи, справним станом упорів та іншими технічними факторами;

- ударні від переміщення мас шарів вантажу, що змерзлися чи злежалися, тому мають бути передбачені захисні властивості конструкції (щити). Вони підвищують масу СРВП, тому можливі пошкодження верхнього обв'язочного поясу і обшивки (вм'ятини, вигини, прогини);

- розподілені на верхній обв'язочний пояс при монолітному стані вантажу.

Достатньо слабкий за жорсткістю профіль поясу сприймає сумарне навантаження від ваги вантажу, тари і платформи СРВП з люлькою;

- на верхній обв'язочний пояс від упорів СРВП внаслідок перерозподілення центра ваги;

- торцеві секції в результаті нерівномірного прилягання кузова до верхніх упорів СРВП, що призводить до виникнення остатніх деформацій вигину елементів конструкції кузова ПВ;

- сили ваги на пружини, клинові гасники коливальних, деталі автозчепного обладнання та кришок люків при вмиканні вібропристроїв, що створюють і передають вимушені коливання через верхні упори на верхній обв'язочний пояс;

- сумарні знакозмінні в різних комбінаціях, що призводить до різного роду пошкоджень.

У розрахунку СРВП [11] досліджений процес перекидання ПВ. Однак навантаження і реакції, що діють на ПВ, не опрацьовано. Тому розрахункові схеми (рис. 1, 2) було уточнено і позначено додаткові навантаження і реакції зв'язків.

У СРВП висипання вантажу починає відбуватися після того, як кут повороту ротора φ_x за своєю величиною стає рівним φ_d (куту природнього відкосу вантажу) або більше за нього. Вихід вантажу відбувається нерівномірно, але значно зростає зі збільшенням кута повороту. Звичайно при експлуатації кут перекидання для висипання вугілля з ПВ не перевищує $135-140^\circ$. Однак на практиці має місце явище злежування і змерзання вантажу і, як наслідок, його часткове налипання або примерзання до стін ПВ у зимовий час. Максимальний кут повороту СРВП широкої колії складає 180° .

Під час зрушення з місця (рис. 1, а) на кузов діють сили розпору вантажу F і сили тяжіння вантажу G_2 , кузова ПВ G_4 , у подальшому, коли система починає обертання, люлька з кузовом ПВ починає зміщуватися на відстань K , долаючи кут

повороту, який буде змінюватися в межах від 0 до деякого φ_1 , при якому вагон переміщується до бокової стіни ротора СРВП (рис. 1, б). Рух люльки буде супроводжуватися прискоренням, яке викличе удар бокової стіни ПВ об привалочну плиту, що може викликати її

пошкодження у вигляді остатніх деформацій. Також бокова стіна ПВ прилягає не всією площиною до привалочної плити через випрямлення ресорних комплектів ходових частин (візків).

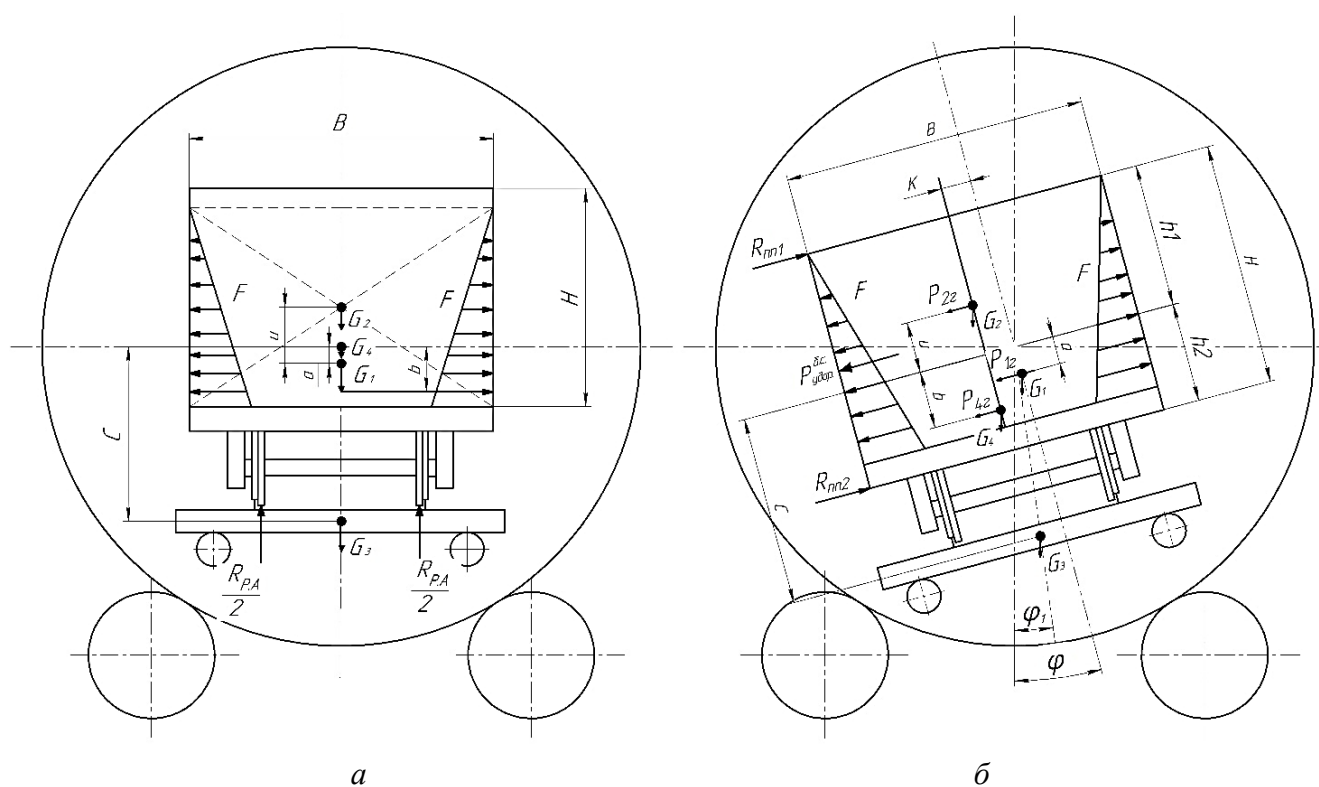


Рис. 1. Початкова стадія перекидання кузова ПВ:

a – початкове положення ПВ у роторі СРВП (0°); *б* – положення при контакті кузова ПВ з привалочною плитою ($9\div 16^\circ$);

R_{PA} – реакція від рейок люльки в початковому положенні; $R_{п.п.}$ – реакція привалочної плити від дії ударного навантаження бокової стіни ПВ ($R_{п.п.1}$ і $R_{п.п.2}$ змінюються при нерівномірній привалці всієї площини бокової стіни, що супроводжується розпрямленням ресорних комплектів візків); G_1 – Ц.В. ротора ВП; G_2 – Ц.В. вантажу; G_3 – Ц.В. люльки СРВП; G_4 – Ц.В. ПВ; F – сила розпору від дії вантажу на бокову стінку ПВ; φ – кут повороту системи; H – висота стінки ПВ; B – ширина кузова ПВ; K – зміщення люльки з кузовом ПВ відносно ротора СРВП; P_{1z} , P_{2z} , P_{3z} – відповідно горизонтальні складові G_1 , G_2 , G_4 , що впливають на величину ударного впливу бокової стіни і верхніх упорів, $P^{б.с.}_{удар(1(2))}$ і $P_{в.ун.}(1(2))$

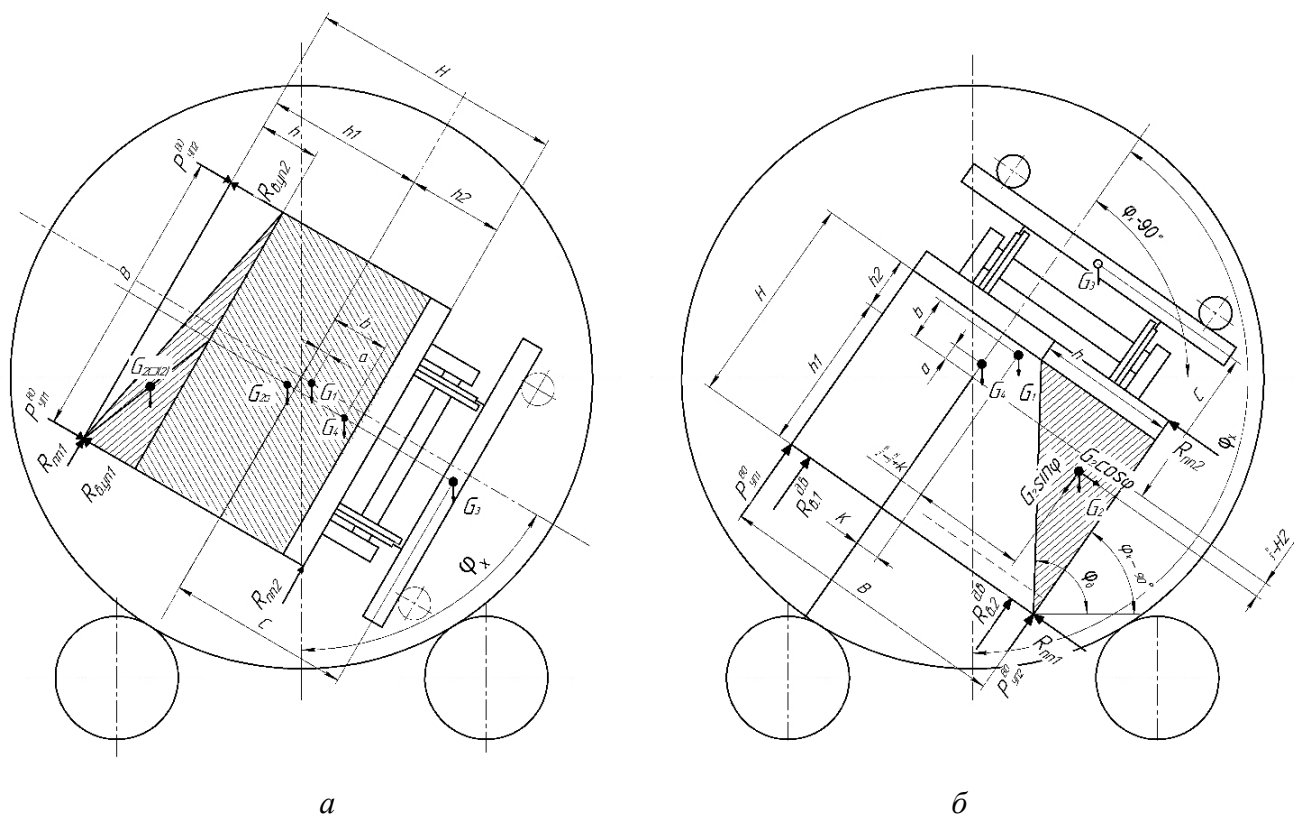


Рис. 2. Завершальний етап перекидання: *а* – початок висипання вантажу з ПВ і стикання ПВ з верхніми упорами СРВП; *б* – кінець розвантаження вантажу з ПВ; $R_{В.УП.}$ – реакція верхніх упорів ($R_{В.УП.1}$ і $R_{В.УП.2}$ змінюються залежно від положення центра ваги системи); φ_x – кут, що змінюється під час обертання системи; $P_{уп1(2)}^{BO}$ – ударні навантаження на верхню обв'язку від верхніх упорів; $G_{2\Delta(2)}$ – вага частини (призми) вантажу (вугілля), що зсипається; $P_{1(2)}^{BO}$ – вібраційне навантаження від дії вібраторів (170-175°)

При досягненні кута природного відкосу вантажу (вугілля), починається розвантаження ПВ, супроводжуване навантаженням привалочної плити боковою стінкою кузова. Кут φ_x буде змінюватися в межах від кута природного відкосу вантажу в русі від φ_d до φ_2 , що відповідає початку розвантаження (рис. 2, а), у цей момент площа поперечного перерізу матеріалу в ПВ може бути у вигляді прямокутника і трикутника.

При перевищенні положення ротора кута 56° відбувається ударний вплив верхньої обв'язки з передніми і задніми упорами СРВП, і ПВ залишається в цьому положенні до повного повороту ротора.

На заключній фазі розвантаження кут повороту φ_x змінюється від φ_2 до скінченного кута обертання φ , тобто вантаж розташовується по трикутнику (Δ призми) (рис. 2, б). Конструкція ПВ сприймає значні навантаження від ваги G_2, G_3, G_4 по верхній обв'язці в результаті дії реакції $R_{п.п.1}$ і $R_{п.п.2}$, які змінюють значення залежно від кута повороту.

В експлуатації на СРВП витікання вантажу починається після того, як кут повороту ротора φ_x за своєю величиною стає рівним φ_d (куту природного відкосу вантажу) або більше за нього. Витікання вантажу здійснюється нерівномірно, а прискорюється зі зростанням кута повороту.

Звичайно, у практиці кут перекидання для безперешкодного виходу вугілля з ПВ не перевищує 135-140°. Однак через зміну атмосферних умов часто трапляється злежуваність або змерзання частинок між гранулами вантажу і, як наслідок, його часткове налипання або примерзання до стінок у зимовий час. Максимальний кут повороту ротора СРВП широкої колії приймається 180°.

Аналізуючи розглянуті положення механічної системи ПВ-СРВП, можна зробити проміжний висновок, що в наведеній методиці розрахунку кузова не враховується: 1) нерівномірне прилягання бокової стіни верхньою обв'язкою кузова до привалочної плити через випрямлення ресорних комплектів у динаміці, а також

зусилля, що діє від власної ваги люльки на верхню обв'язку, що також значно впливає на міцність; 2) сумарні навантаження, які прикладаються до верхньої обв'язки за умови, що вантаж монолітний і здатний зависати в кузові.

Для визначення прискорень, що діють на елементи кузова ПВ при вивантаженні насипних (навалочних) вантажів (НВ), за допомогою СРВП була складена система диференціальних рівнянь руху динамічної системи СРВП-ПВ-НВ за принципом Лагранжа II роду для неконсервативних систем.

При цьому для моделювання процесу перекидання кузова ПВ уточнені диференціальні рівняння руху системи, за роботами [13-15], матимуть вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} I_x^{срвп}(\ddot{\theta}_{срвп} + \ddot{\theta}_{пв} + \ddot{\theta}_{нв}) + P_{срвп} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot R_{срвп} + N_{срвп} \cdot F \cdot \dot{\theta}(t) \cdot R_{срвп} = M_i(t); \\ m_{пв(нв)} \cdot \ddot{Z} + 4c_z \cdot Z + 8 \cdot \beta \cdot \dot{Z} + N \cdot F \cdot \dot{Z}(t) = F_i(t); \\ m_{пв(нв)} \cdot \ddot{y} + 4 \cdot c_y \cdot y + 8 \cdot \gamma \cdot \dot{y} = F_j(t); \\ I_x^{нв}(\ddot{\theta}_{пв} + \ddot{\theta}_{нв}) + P_{пв} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{пв} + N_{пв} \cdot f_{пв} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{пв} = M_j(t); \\ I_x^{нв} \cdot \ddot{\theta}_{нв} + P_{нв} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{нв} + N_{нв} \cdot f_{нв} \cdot \dot{\theta}(t) \cdot r_{нв} = M_k(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

де $I_x^{срвп}, I_x^{пв}, I_x^{нв}$ – відповідно моменти інерції СРВП, ПВ, НВ відносно осі обертання x ;

$P_{срвп}, P_{пв}, P_{нв}$ – робоча вага СРВП, ПВ, НВ;

$N_{срвп}, N_{пв}, N_{нв}$ – притискна сила відповідно СРВП, ПВ, НВ;

$F, f_{пв}, f_{нв}$ – коефіцієнти тертя відповідно між вузлами СРВП, ПВ, НВ і внутрішнє тертя між частинками вантажу;

$C_{z(y)}$ – жорсткість ресорних комплектів візків модельного ряду 18-;

$R_{срвп}, r_{пв}, r_{нв}$ – радіуси обертання відповідно СРВП, ПВ, НВ;

β, γ – еквівалентні коефіцієнти тертя клинових гасників коливань у вертикальному і горизонтальному напрямках;

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – відповідно кутові переміщення, швидкості і прискорення відносно осі x ;

$\dot{\theta}(t), \dot{Z}(t)$ – припущення корегування за t для дотримання одиниць вимірювання в рівняннях, тобто моментів і сил;

$u, \dot{u}, \ddot{u}, z, \dot{z}, \ddot{z}$ – відповідно поступальні переміщення, швидкості і прискорення ПВ і НВ при обертанні СРВП;

$m_{пв(нв)}$ – зміна маси висипання (витікання) при обертанні частини вантажу;

$M_i(t); M_j(t); M_k(t); F_i(t); F_j(t)$ – обертальні змушувальні силові фактори;

$F_{i(j)}$ – узагальнена сила при 170-175° (на кінцевій стадії розвантаження), поповнюється центробіжною при включенні в роботу вібраторів,

$$F_1 i(t) + F_2 j(t) = A_1 \cos(\omega_1 t) e + \left[\frac{mv^2}{r_{дб}} \cos \omega_2 t = m\omega_{дб}^2 Z_{дв} \cos \omega_2 t \right], \quad (2)$$

де $A_1 - Q_o$ – вага вала ротора СРВП, кг;
 $r_{дб}$ – радіус дисбалансу вібратора, м;
 e – ексцентриситет, м.

Зауважимо, що в системі (1) інерційні складові силового енергетичного балансу, тобто ті, що з урахуванням мас частин механічної системи враховані першим членом, потенціальні та дисипативні, тобто пружні і розсіювальні складові враховані відповідно другим і третім членами у п'яти рівняннях загальної математичної моделі для визначених трьох ступенів волі. Вхідними параметрами є геометричні значення як складових, так і самої механічної системи ПВ-СРВП. Початковими умовами задачі при цьому обрано відповідні кутові та лінійні переміщення та швидкості в початковий момент часу $t_0 = 0$; $\{\theta, \dot{\theta}; y, \dot{y}; z, \dot{z}\}(0) = 0$. Обмеження моделі встановлюються з міркувань технічного стану як ПВ, так і самого СРВП, а також показників технологічності процесу перекидання та

фізико-механічних властивостей насипного вантажу, що підлягає розвантаженню. Достовірність математичної моделі при отриманні результатів теоретичних досліджень перевіряється критеріями адекватності при плануванні та постановці експериментальної роботи і проведенні відповідних випробувань для сформульованих задач.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь вона зводилася до нормальної форми Коши з наступним інтегруванням за відомим методом Рунге-Кутта. На підставі цього було отримано величини прискорень ПВ насипного вантажу (НВ) і СРВП при розвантаженні a , m/c^2 , (рис. 3-5). Урахування дійсних величин прискорень остаточно дає можливість визначення динамічних навантажень, що діють на вузли та елементи конструкції ПВ.

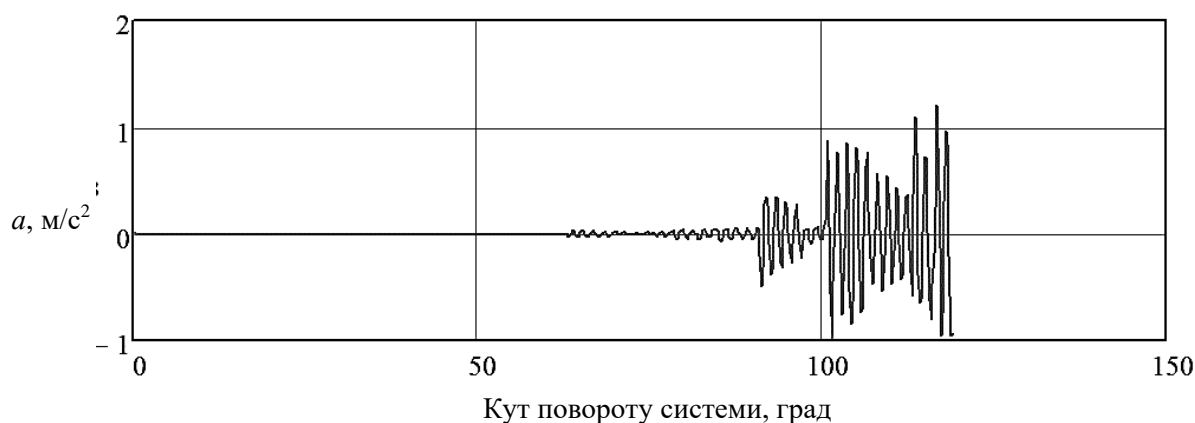


Рис. 3. Характер прискорень частин СРВП при перекиданні



Рис. 4. Характер прискорень кузова ПВ при перекиданні

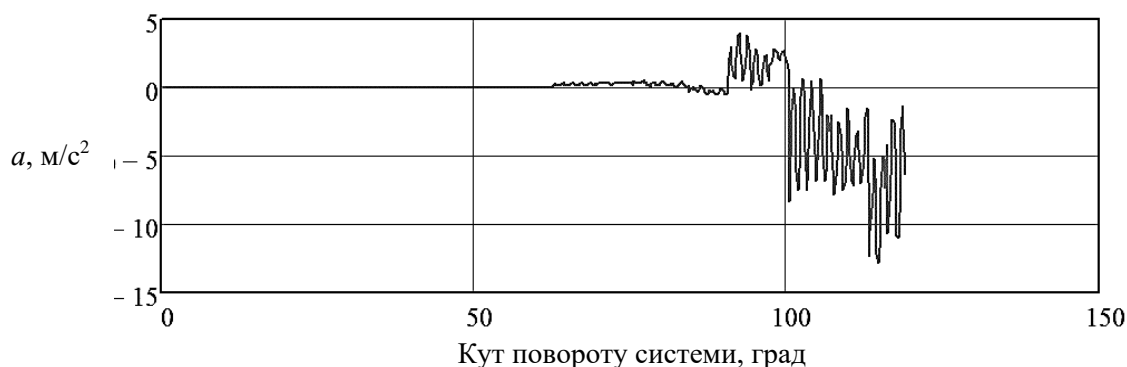


Рис. 5. Характер прискорень ПВ при перекиданні

Висновки. За отриманими результатами можна зробити такі висновки:

- ретельно з'ясовано характер дії експлуатаційних навантажень на ПВ і проведено відповідну класифікацію з міркування їхнього впливу на рівень пошкоджень і збереження конструкційних вузлів і елементів;

- доопрацьовано розрахункові схеми і переглянуто попередній аналіз особливостей фізичного процесу перекидання, отримано необхідні кінематичні параметри;

- побудовано уточнену математичну модель для визначення динамічних факторів, що діють на ПВ під час розвантаження.

Крім визначення, формулювання і реалізації основних задач дослідження, також додатково було:

- встановлено, що прискорення кузова ПВ виникають при куті обертання

близько 60° (тобто при усталеному витіканні вантажу з кузова);

- виявлено, що максимальні значення прискорень спостерігаються при куті обертання 125° і складають близько $12,5 \text{ м/с}^2$. Це здійснюється майже на кінцевій стадії витікання вантажу, оскільки остаточна складова повного кута обертання (близько 30°) майже не впливає на динаміку, оскільки вантаж у кузові складає вже незначну частину;

- дані результати теоретичних досліджень на стадії проектування ПВ [16] дають змогу урахувати можливі динамічні силові фактори, обумовлені перекиданням кузова ПВ, розташованого в СРВП під час розвантаження, і попередити імовірні пошкодження, оцінити запас міцності та показники властивостей експлуатаційної надійності конструкції кузова, що в підсумку дасть змогу знизити витрати на поточне технічне обслу-

говування і позапланові ремонтні роботи, а також призведе до підвищення життєвого

циклу ПВ, як вкрай затребуваного вантажного транспортного засобу.

Список використаних джерел

1. Розробка та дослідження технічних засобів для підвищення надійності вантажних вагонів і продуктивності вивантаження сипких вантажів: звіт з НДР (заключний) / Вагони і вагонне господарство; керівник В. Ф. Головка. № Держ. реєстр. 0104U003237. Харків: УкрДАЗТ, 2006. 173 с.
2. Савчук В. Б. Стан і перспективи парка вантажних вагонів /АНТ «Інститут проблем природних монополій (ППМ)». 2017. URL: http://ipem.ru/research/rail_transport/rail_presentations/158.html. (дата звернення: 21.05.2021).
3. Чепурченко І. В., Крошечкина І. Ю. Аналіз надійності конструкцій кузовов полуувагонов в експлуатації. *Наука и техника транспорта*. 2018. № 4. С. 34-40.
4. Phillips D. Dump the ore!: Fast unloading of iron ore transported by rail. *Bulk Solids Handling*, 35 (3), pp. 34-35, (2015). URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84982273217&partnerID=40&md5=ccca393fc4015572137fe87b876d1f76> (last access: 07.12.2021).
5. Kovalev R., Sakalo A., Yazykov V., Shamdani A., Bowey R., Wakeling C. Simulation of longitudinal dynamics of a freight train operating through a car dumper. *Vehicle System Dynamics*. 2016. 54 (6). P. 707-722. Cited 21 times. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84961200786&doi=10.1080%2f00423114.2016.1153115&partnerID=40&DOI:10.1080/00423114.2016.1153115> (last access: 07.12.2021).
6. Drozdник І. Д., Мірошніченко Д. В., Шмелтсер Е. О., Кормер М. В., Пышнев С. В. Investigation of possible losses of coal raw materials during its technological preparation for coking Message 2. The actual mass variation of coal in the process of its storage and crushing *Petroleum and Coal*. 2019. 61 (3). P. 631-637. Cited 3 times. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074480973&partnerID=40&md5=46772fd599b63588baedecb3a999441> (last access: 07.12.2021).
7. ДСТУ ГОСТ 22235: 76:2010:2015. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Вагони вантажні магістральних залізничних доріг колії 1520 мм. Загальні вимоги щодо забезпечення збереження під час завантажувально-розвантажувальних та маневрових робіт (ГОСТ 22235-2010, IDT). Чинний від 2010-11-12. Вид. офіц. Київ, 2015. 24 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082560> (дата звернення: 16.05.2021).
8. Herzog M., Severin F., Wirtz R. Developing the high performance car dumper: Wagon dumper technology and its associated infrastructure; Part 1 [Article@Der Weg zum Hochleistungskipper: Die Technik der Waggonkipper und die notwendige Infrastruktur; Teil 1]. *Cement International*. 2021. 19 (2). P. 26-35. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108105078&partnerID=40&md5=d2122b166bc0ec462ed18937643a5ab4> (last access: 07.12.2021).
9. Піввагон з глухим кузовом: Пат. 72360 Україна, № 72360 МПК⁷ В61F 1/00, В61D 3/00/ Чепурченко І. В., Візньак Р. І. (Україна); УкрДАЗТ. № u201203065; Заяв. 16.03.2012; Опубл. 10.08.2012; Бюл. № 6. 9 с.
10. Носырев Д. Я., Коркина С. В., Анахова В. В. Направление совершенствования глуходонного полувагона для перевозки сыпучих грузов. *Вестник транспорта Поволжья*. СамГУПС. 2019. № 1 С. 28–35. URL: <https://scholar.google.com/citations?user=Y1spEKgAAAAJ&hl=ru> (дата звернення: 21.05.2021).

11. Горфин О. С. Машины и оборудование по переработке торфа. Тверь: Тверской гос. технический ун-т, 2003. 247 с.
12. Сендеров Г. К., Лосев П. Р., Другаль С. А. Сохранность вагонов при погрузочно-разгрузочных и маневровых работах. Москва: Транспорт, 1984. 158 с.
13. Petrov G. I., Panachev I. Adaptation of mathematical model to the conditions of unloading of the gondola car body by means of tipping. *Transport business of Russia*. 2017. № 1 (128). P. 138–143.
14. Bruni S., Vinolas J., Berg M., Polach O., Stichel S. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle system dynamics. Electrical and Electronics Engineers*. 2011. № 49(7). P. 1021–1072. URL: <https://www.researchgate.net/publication/261525842> (last access: 17.05.2021).
15. Anyakwo A., Pislaru C., Ball A. Modelling rail vehicle dynamics using a novel 3d wheel-rail contact model. *Electrical and Electronics Engineers*. 2013. № 5. P. 463–468. URL: <http://www.ijac.net/cn/article/doi/10.1007/s11633-012-0640-6> (last access: 18.05.2021).
16. ДСТУ 7598: 2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамоходних). Чинний від 2014-12-02. Вид. офіц. Київ, 2014. 32 с. URL: <http://uas.org.ua> (дата звернення: 17.05.2021).

Візняк Руслан Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. Тел.: (057)7301035, +380502308245. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Viznyak Ruslan PhD (Tech). Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. Тел.: (057)7301035, +380502308245. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 11.03.2023 р.

УДК 629.454.2

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ОЦІНКИ РЕМОНТНОЇ СКЛАДОВОЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Доктори техн. наук Ю. Є. Калабухін, І. Е. Мартинов, аспірант С. І. Мартинов

FORMALIZATION OF ELECTRIC TRAIN REPAIR COMPONENT LIFE CYCLE ASSESSMENT

Dr. Sc. (Tech.) Yu. Ye. Kalabukhin, Dr. Sc. (Tech.) I. E. Martynov, postgraduate student S. I. Martynov

Анотація. У статті розглянуто питання математичного опису ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда ЕПЛІ9т. Техніко-економічна оцінка цієї частини життєвого циклу тягового рухомого складу в цьому випадку залежить від довговічності та ремонтпридатності техніки. В основу математичного опису покладено нормативи планово-попереджувальної системи ремонту тягового рухомого складу залізниць України, зокрема електропоїзда серії ЕПЛІ9т.

Техніко-економічний розрахунок з використанням запропонованого математичного підходу дає можливість досить точно оцінити ремонтну складову життєвого циклу. Це у свою чергу дасть змогу в подальшому використовувати його для розроблення повної математичної моделі життєвого циклу електропоїзда.

Ключові слова: життєвий цикл, електропоїзд, капітальний ремонт, ремонт, склад.

Abstract. *The article deals with the issue of the mathematical description of the repair component of the life cycle of the EPL9t electric train. At present, the development and use of the concept of the life cycle of traction rolling stock of railway transport is given considerable attention by both equipment manufacturers and its users. For Ukrainian railways, this scientific direction is especially relevant due to the fact that traction rolling stock is significantly worn out both physically and morally. This necessitates the rapid renewal of railway equipment through the acquisition of samples of domestic or foreign production. The feasibility study for choosing an alternative option for updating technology in world practice is based on the concept of the life cycle.*

The life cycle of an electric train covers a significant period of time. It includes both repair and operational components. The repair component is associated with carrying out technological measures to maintain it in a technically sound condition and periodically renew its original technical characteristics. This is facilitated by a system of scheduled preventive repairs. The determining factors in this case are the durability and maintainability of equipment. The results of forecasting long-term investment projects for the renewal of railway equipment depend on how accurately the technical and economic assessment of this component is given.

The mathematical description is based on the standards of the preventive maintenance system for the repair of traction rolling stock of Ukrainian railways and, in particular, the electric train of the EPL9t series. The analysis of the operational factors of the use of the electric train, influencing the formation of the repair component of the life cycle, was carried out.

A feasibility study using the proposed mathematical approach quite accurately estimates the repair component of the life cycle. The economic assessment of the repair component of the EPL9t series electric train was made according to the conditions of a specific route served by it during the life cycle.

The results obtained will be used in the future to develop a complete mathematical model of the life cycle of an electric train.

Keywords: life cycle, electric train, overhaul, maintenance, repair component.

Вступ. На сьогодні концепція життєвого циклу набуває все більш широкого розповсюдження на тяговий рухомий склад залізниць України. Це обумовлюється в першу чергу значним фізичним і моральним зносом залізничної техніки і відповідно проблемами її оновлення в період гострого недофінансування галузі. Концепцію життєвого циклу покладено в основу сучасного техніко-економічного аналізу вибору альтернативних варіантів оновлення тягового рухомого складу як за рахунок придбання нової техніки, так і модернізації існуючої. Життєвий цикл охоплює значний

період часу, протягом якого залізнична техніка експлуатується та підтримується в технічно справному стані. Тому від того, як точно буде дана техніко-економічна оцінка цих складових, залежать результати прогнозування довгострокових інвестиційних проєктів оновлення парку як тягового, так і нетягового рухомого складу залізниць України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні положення концепції життєвого циклу залізничної техніки, зокрема тягового рухомого складу, викладено в роботах [1-4]. Так, у статті [1] подано результати проведеного аналізу

складових, що формують життєвий цикл тягового рухомого складу, і запропоновано методологію їх визначення на етапі придбання.

У роботі [2] викладено теоретичні положення визначення техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу на основі систематизації та оцінювання складових життєвого циклу відповідно до умов експлуатації. Основні теоретичні положення визначення вартості життєвого циклу тягового рухомого складу як передумова техніко-економічного обґрунтування його оновлення в сучасних умовах розвитку економіки наведено в дослідженні [3]. Однак, незважаючи на теоретичну визначеність, практична сторона розрахунку вартості складових життєвого циклу тягового рухомого складу з урахуванням умов експлуатації висвітлена досить обмежено. У публікації [4] викладено загальний огляд закордонного досвіду формування нормативних документів стосовно життєвого циклу залізничного рухомого складу. Автори підкреслюють, що методологія оцінювання життєвого циклу технічних об'єктів є одним з основних інструментів менеджменту в Європейському Союзі.

Результати практичного застосування теоретичних засад концепції подано в статтях [5-7]. Так, у роботі [5] наведено результати оцінювання техніко-економічних показників використання електропоїзда ЕПЛ19т у приміському русі, в основу визначення якої покладено сучасну методологію оцінювання життєвого циклу. Однак у роботі не виділено окремо економічну оцінку ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда. Результати визначення питомих середньоексплуатаційних техніко-економічних та екологічних показників функціонування маневрових тепловозів на основі систематизації та оцінювання складових життєвого циклу відповідно до умов експлуатації викладено в статті [6]. Результати дослідження обмежуються окремим типом тягового

рухомого складу, а саме маневровими тепловозами.

У роботі [7] визначено ремонтну складову життєвого циклу маневрового тепловоза відповідно до положень діючої планово-попереджувальної системи ремонту і технічного обслуговування тягового та моторвагонного рухомого складу. Але техніко-економічна оцінка ремонтної складової життєвого циклу, як і в попередній статті, обмежується окремим типом тягового рухомого складу, а саме маневровими тепловозами серії ЧМЕЗ.

У роботі [8] наведено методика визначення економічної ефективності функціонування окремого приміського пасажирського поїзда та раціональних зон їх курсування на окремих напрямках руху. Результати роботи не враховують функціонування окремого приміського пасажирського поїзда протягом життєвого циклу.

У статті [9] сформульовано визначення оцінки життєвого циклу локомотивів. Але автором не враховано особливості експлуатаційної роботи електропоїздів.

Дослідження [10] присвячено аналізу виникнення та розвитку поняття вартості життєвого циклу протягом декількох десятиліть. Автором визначено основні сфери застосування вартості життєвого циклу, розкрито можливості використання вартості життєвого циклу в тендерних запитах, визначено складності в розрахунку вартості життєвого циклу.

У роботах [11, 12] викладено точку зору виробника на внесок і межу використання інструменту «вартість життєвого циклу» і розглянуто перспективи у сфері прогнозування витрат на утримання технічних об'єктів.

Очевидно, що, незважаючи на значну кількість досліджень у цьому напрямі, концепція життєвого циклу рухомого складу потребує подальшого розвитку в плані більш детального розгляду її окремих складових і їхнього математичного опису у

прив'язці до умов експлуатації та системи утримання тягового рухомого складу в технічно справному стані.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є математичний опис оцінки ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда з урахуванням діючої планово-попереджувальної системи ремонту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз експлуатаційних факторів використання електропоїзда, що впливають на формування ремонтної складової життєвого циклу;
- розробити математичний опис ремонтної складової життєвого циклу

електропоїзда з урахуванням вимог планово-попереджувальної системи ремонту тягового рухомого складу;

- надати економічну оцінку ремонтної складової електропоїзда серії ЕПЛ19т за умовами конкретного маршруту, що ним обслуговується протягом життєвого циклу.

Основна частина дослідження. Розрахунок експлуатаційних показників використання електропоїзда слід проводити стосовно типових умов експлуатації або за умовами конкретного маршруту, що ним обслуговується [8]. За цих умов оборот електропоїзда на k -му маршруті розраховується за формулою

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

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

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

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

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

Час руху електропоїзда, простою на зупинних пунктах на конкретному маршруті

визначається графіком руху приміських поїздів.

Річна кількість днів курсування електропоїзда на k -му маршруті залежно від графіка курсування протягом тижня розраховується за формулою

$$D_{к.рікк} = \frac{365 \times D_{к.тждк}}{7}, \quad (2)$$

де $D_{к.тждк}$ – кількість днів курсування електропоїзда на k -му маршруті протягом тижня, дні.

Річний час роботи електропоїзда на маршрутах розраховується за формулою

$$T_{рік} = \sum_{k=1}^{k=z} (T_{обк} \times D_{к.рікк}) = \sum_{k=1}^{k=z} \left(T_{обк} \times \frac{365 \times D_{к.тждк}}{7} \right). \quad (3)$$

Річний пробіг електропоїзда за маршрутами розраховується за формулою

$$S_{\text{рік}} = \sum_{k=1}^{k=z} \left(2 \times L_k \times \frac{365 \times D_{\text{к.тждк}}}{7} \right), \quad (4)$$

де L_k – відстань k -го маршруту електропоїзда, км.

Пробіг електропоїзда за маршрутами за період життєвого циклу $T_{\text{ж.ц}}$ розраховується за формулою

$$S_{\text{ж.ц}} = S_{\text{рік}} \times T_{\text{ж.ц}} = T_{\text{ж.ц}} \times \sum_{k=1}^{k=z} \left(2 \times L_k \times \frac{365 \times D_{\text{к.тждк}}}{7} \right). \quad (5)$$

На сьогодні в основу утримання в технічно справному стані тягового рухомого складу залізниць України покладено планово-попереджувальну систему ремонту, регламентовану відповідним положенням АТ «Укрзалізниця» зі встановленням міжремонтних періодів і пробігів [13]. Для електропоїздів цим документом передбачено для проведення технічного обслуговування ТО-3 та поточного ремонту ПР-1 міжремонтні періоди в добах, для поточних і капітальних ремонтів – міжремонтні пробіги в кілометрах.

Виходячи з норм міжремонтних пробігів кількість капітальних ремонтів електропоїзда в обсязі КР-2 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$n_{\text{КР-2}} = \frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{КР-2}}}, \quad (6)$$

Кількість ремонтних циклів електропоїзда в обсязі КР-1 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$j = \frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{КР-1}}}. \quad (9)$$

де $L_{\text{КР-2}}$ – періодичність проведення капітального ремонту електропоїзда в обсязі КР-2, км.

Кількість капітальних ремонтів електропоїзда в обсязі КР-1 протягом одного ремонтного циклу КР-2 розраховується за формулою

$$m_{\text{КР-1}} = \frac{L_{\text{КР-2}}}{L_{\text{КР-1}}} - 1, \quad (7)$$

де $L_{\text{КР-1}}$ – періодичність проведення капітального ремонту електропоїзда в обсязі КР-1, км.

Кількість капітальних ремонтів електропоїзда в обсязі КР-1 протягом життєвого циклу складає

$$n_{\text{КР-1}} = \frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{КР-2}}} \times m_{\text{КР-1}} = S_{\text{ж.ц}} \times \left(\frac{1}{L_{\text{КР-1}}} - \frac{1}{L_{\text{КР-2}}} \right). \quad (8)$$

Кількість поточних ремонтів електропоїзда в обсязі ПР-3 протягом одного ремонтного циклу КР-1 розраховується за формулою

$$m_{\text{ПР-3}} = \frac{L_{\text{КР-1}}}{L_{\text{ПР-3}}} - 1, \quad (10)$$

де $L_{\text{ПР-3}}$ – періодичність проведення поточного ремонту електропоїзда в обсязі ПР-3, км.

Кількість поточних ремонтів електропоїзда в обсязі ПР-3 протягом життєвого циклу складає

$$n_{\text{ПР-3}} = j \times m_{\text{ПР-3}} = S_{\text{ж.ц}} \times \left(\frac{1}{L_{\text{ПР-3}}} - \frac{1}{L_{\text{КР-1}}} \right). \quad (11)$$

Кількість ремонтних циклів електропоїзда в обсязі ПР-3 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$k = \frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{ПР-3}}}. \quad (12)$$

Кількість поточних ремонтів електропоїзда в обсязі ПР-2 протягом одного ремонтного циклу ПР-3 розраховується за формулою

$$m_{\text{ПР-2}} = \frac{L_{\text{ПР-3}}}{L_{\text{ПР-2}}} - 1, \quad (13)$$

де $L_{\text{ПР-2}}$ – періодичність проведення поточного ремонту електропоїзда в обсязі ПР-2, км.

Кількість поточних ремонтів електропоїзда в обсязі ПР-2 протягом життєвого циклу складає

$$n_{\text{ПР-2}} = k \times m_{\text{ПР-2}} = S_{\text{ж.ц}} \times \left(\frac{1}{L_{\text{ПР-2}}} - \frac{1}{L_{\text{ПР-3}}} \right). \quad (14)$$

Кількість ремонтних циклів електропоїзда в обсязі ПР-2 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$l = \frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{ПР-2}}}. \quad (15)$$

Виходячи з норм міжремонтних періодів кількість поточних ремонтів електропоїзда в обсязі ПР-1 протягом одного ремонтного циклу ПР-2 розраховується за формулою

$$m_{\text{ПР-1}} = \frac{L_{\text{ПР-2}}}{t_{\text{ПР-1}} \times S_{\text{доб}}} - 1, \quad (16)$$

де $t_{\text{ПР-1}}$ – періодичність проведення поточного ремонту електропоїзда в обсязі ПР-1, діб;

$S_{\text{доб}}$ – середньодобовий пробіг електропоїзда, км.

Середньодобовий пробіг електропоїзда розраховується за формулою

$$S_{\text{доб}} = \frac{24 \times S_{\text{рік}}}{T_{\text{рік}}}. \quad (17)$$

Кількість поточних ремонтів електропоїзда в обсязі ПР-1 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$n_{\text{ПР-1}} = S_{\text{ж.ц}} \times \left(\frac{1}{t_{\text{ПР-1}} \times S_{\text{доб}}} - \frac{1}{L_{\text{ПР-2}}} \right). \quad (18)$$

Середньорічна кількість технічних обслуговувань електропоїзда в обсязі ПР-1 розраховується за формулою

$$\bar{n}_{\text{ПР-1}} = \frac{n_{\text{ПР-1}}}{T_{\text{ж.ц}}}. \quad (19)$$

Кількість ремонтних циклів електропоїзда в обсязі ПР-1 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$z = \frac{365 \times T_{\text{ж.ц.}}}{t_{\text{ПР-1}}} \quad (20)$$

Кількість технічних обслуговувань електропоїзда в обсязі ТО-3 протягом одного ремонтного циклу ПР-1 розраховується за формулою

$$m_{\text{ТО-3}} = \frac{t_{\text{ПР-1}}}{t_{\text{ТО-3}}} - 1, \quad (21)$$

де $t_{\text{ТО-3}}$ – періодичність проведення технічного обслуговування електропоїзда в обсязі ТО-3, діб.

Кількість технічних обслуговувань електропоїзда в обсязі ТО-3 протягом життєвого циклу розраховується за формулою

$$n_{\text{ТО-3}} = z \times m_{\text{ТО-3}} = 365 \times T_{\text{ж.ц.}} \times \left(\frac{1}{t_{\text{ТО-3}}} - \frac{1}{t_{\text{ПР-1}}} \right). \quad (22)$$

Середньорічна кількість технічних обслуговувань електропоїзда в обсязі ТО-3 розраховується за формулою

$$\bar{n}_{\text{ТО-3}} = \frac{n_{\text{ТО-3}}}{T_{\text{ж.ц.}}} \quad (23)$$

Враховуючи значну складність прогнозування зміни вартісних показників ремонтної складової протягом життєвого циклу, припускаємо їхнє незмінне значення протягом цього періоду на рівні року

початку прогнозування. Для врахування фактора часу застосовуємо коефіцієнт дисконтування, передбачений концепцією життєвого циклу. За цих умов витрати на утримання електропоїзда в технічно справному стані шляхом проведення поточних ремонтів і технічних обслуговувань і відновлення його ресурсу шляхом проведення капітальних ремонтів за життєвий цикл без урахування дисконтування розраховується за формулою

$$B_{\text{рем}} = B_{\text{КР-2}} \times n_{\text{КР-2}} + B_{\text{КР-1}} \times n_{\text{КР-1}} + B_{\text{ПР-3}} \times n_{\text{ПР-3}} + B_{\text{ПР-2}} \times n_{\text{ПР-2}} + B_{\text{ПР-1}} \times n_{\text{ПР-1}} + B_{\text{ТО-3}} \times n_{\text{ТО-3}}, \quad (24)$$

де $B_{\text{КР-2}}$, $B_{\text{КР-1}}$, $B_{\text{ПР-3}}$, $B_{\text{ПР-2}}$, $B_{\text{ПР-1}}$, $B_{\text{ТО-3}}$ – витрати на проведення одиниці ремонту електропоїзда в обсязі відповідно КР-2, КР-1, ПР-3, ПР-2, ПР-1 і технічного обслуговування ТО-3, грн.

Витрати на утримання електропоїзда в технічно справному стані шляхом проведення поточних ремонтів і технічних обслуговувань і відновлення його ресурсу

шляхом проведення капітальних ремонтів за життєвий цикл з урахуванням дисконтування розраховується за формулою

$$B_{\text{рем}} = B_{\text{КР-2}} \times \sum \alpha_{\text{КР-2}} + B_{\text{КР-1}} \times \sum \alpha_{\text{КР-1}} + B_{\text{ПР-3}} \times \sum \alpha_{\text{ПР-3}} + B_{\text{ПР-2}} \times \sum \alpha_{\text{ПР-2}} + B_{\text{ПР-1}} \times \bar{n}_{\text{ПР-1}} \times \sum \alpha_{\text{ПР-1}} + B_{\text{ТО-3}} \times \bar{n}_{\text{ТО-3}} \times \sum \alpha_{\text{ТО-3}}, \quad (25)$$

де $\sum \alpha_{\text{КР-2}}$, $\sum \alpha_{\text{КР-1}}$, $\sum \alpha_{\text{ПР-3}}$, $\sum \alpha_{\text{ПР-2}}$, $\sum \alpha_{\text{ПР-1}}$, $\sum \alpha_{\text{ТО-3}}$ – сумарний коефіцієнт дисконтування за роками проведення відповідного виду капітального ремонту в обсязі КР-2 та КР-1, поточного ремонту в обсязі ПР-3, ПР-2, ПР-1 і технічного обслуговування ТО-3.

Сумарні коефіцієнти дисконтування за роками проведення відповідного виду капітального ремонту в обсязі КР-2 та КР-1, поточного ремонту в обсязі ПР-3, ПР-2, ПР-1 і технічного обслуговування ТО-3 розраховуються за формулами

$$\sum \alpha_{\text{КР-2}} = \sum_{i=1}^{\frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{КР-2}}}} \left[(1 + E_{\text{H}})^{1-i \times \frac{L_{\text{КР-2}}}{S_{\text{рік}}}} \right]; \quad (26)$$

$$\sum \alpha_{\text{КР-1}} = \sum_{j=1}^{\frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{КР-1}}}} \left[(1 + E_{\text{H}})^{1-j \times \frac{L_{\text{КР-1}}}{S_{\text{рік}}}} \right] - \sum \alpha_{\text{КР-2}}; \quad (27)$$

$$\sum \alpha_{\text{ПР-3}} = \sum_{k=1}^{\frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{ПР-3}}}} \left[(1 + E_{\text{H}})^{1-k \times \frac{L_{\text{ПР-3}}}{S_{\text{рік}}}} \right] - \sum \alpha_{\text{КР-2}} - \sum \alpha_{\text{КР-1}}; \quad (28)$$

$$\sum \alpha_{\text{ПР-2}} = \sum_{l=1}^{\frac{S_{\text{ж.ц}}}{L_{\text{ПР-2}}}} \left[(1 + E_{\text{H}})^{1-l \times \frac{L_{\text{ПР-2}}}{S_{\text{рік}}}} \right] - \sum \alpha_{\text{КР-2}} - \sum \alpha_{\text{КР-1}} - \sum \alpha_{\text{ПР-3}}; \quad (29)$$

$$\sum \alpha_{\text{ПР-1}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{ж.ц}}} (1 + E_{\text{H}})^{1-t}; \quad (30)$$

$$\sum \alpha_{\text{ТО-3}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{ж.ц}}} (1 + E_{\text{H}})^{1-t}, \quad (31)$$

де i, j, k, l – кількість ремонтних циклів за видами ремонту відповідно в обсязі КР-2 та КР-1, ПР-3 та ПР-2 протягом життєвого циклу.

За вихідними даними табл. 1 та 2 у табл. 3 наведено результати розрахунку кількості капітальних, поточних ремонтів і технічних обслуговувань ТО-3 електропоїзда ЕПЛ9т і витрат на їх проведення за життєвий цикл.

Графічне зображення результатів техніко-економічного оцінювання

ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда ЕПЛ9т з урахуванням дисконтування наведено на рис. 1.

Відхилення результатів розрахунку від значень, визначених за нормативним графіком проведення відповідних видів ремонту і технічного обслуговування ТО-3, не перевищують 6,9 %. Це підтверджує достовірність формалізації кількісної та вартісної оцінки ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда.

Таблиця 1

Вихідні дані до техніко-економічного оцінювання ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда ЕПЛ9т

Показник	Значення показника
Період життєвого циклу Т, роки	32
Періодичність:	
капітального ремонту КР-2, тис. км	2100
капітального ремонту КР-1, тис. км	700
поточного ремонту ПР-3, тис. км	350
поточного ремонту ПР-2, тис. км	175
поточного ремонту ПР-1, діб	60
технічного обслуговування ТО-3, діб	7
Витрати на одиницю ремонту (значення умовні), тис. грн:	
капітального ремонту КР-2, тис. км	10000
капітального ремонту КР-1, тис. км	5000
поточного ремонту ПР-3, тис. км	500
поточного ремонту ПР-2, тис. км	300
поточного ремонту ПР-1, діб	100
технічного обслуговування ТО-3, діб	30
Розрахунковий рік	1
Норма дисконту	0,1

Таблиця 2

Умови експлуатації електропоїзда ЕПЛ9т

Маршрут курсування	Час відправлення	Час прибуття	Час на маршруті, год	Відстань, км
станція Х - станція Л	5:54	9:28	3,57	148
Простій на станції Л, год			0,02	
станція Л - станція Д	9:29	10:08	0,65	38
Простій електропоїзда по обороту, год			0,25	
станція Д - станція Л	10:23	11:01	0,63	38
Простій на станції Л, год			0,03	
станція Л - станція Х	11:03	14:43	3,67	148
Простій електропоїзда по обороту, год			1,18	
станція Х - станція Л	15:54	17:53	1,98	148
Простій електропоїзда по обороту, год			0,68	
станція Л - станція Х	18:34	20:51	2,28	148
Простій електропоїзда в основному депо, год			9,05	
Оборот електропоїзда, год			24,00	
Добовий пробіг електропоїзда, км				668

Результати техніко-економічного оцінювання ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда ЕПЛ9т

Показник	Значення показника		Відхилення
	за розрахунком	за графіком	
1	2	3	4
Періодичність курсування, дні/тижд.	7	7	
Річний час роботи електропоїзда, год	8760	8760	
Час роботи електропоїзда за життєвий цикл, год	280320	280320	
Річний пробіг електропоїзда, км	243820	243820	
Пробіг електропоїзда за життєвий цикл, тис. км	7802,24	7802,24	
Середньодобовий пробіг електропоїзда, км	668	668	
Сумарний коефіцієнт дисконтування КР-2	0,791	0,791	
Витрати на одиницю КР-2 у розрахунковому році, тис. грн	10000	10000	
Кількість капітальних ремонтів КР-2 за життєвий цикл	3,7	3	-0,7
Витрати на проведення КР-2 за життєвий цикл, тис. грн	37153,5	30000	-7153,5
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	7907,6	7907,6	
Кількість ремонтних циклів КР-1 за життєвий цикл j	11,1	11,1	
Сумарний коефіцієнт дисконтування КР-1	2,478	2,5	
Витрати на одиницю КР-1 у розрахунковому році, тис. грн	5000	5000,0	
Кількість капітальних ремонтів КР-1 за життєвий цикл	7,4	7	-0,4
Витрати на проведення КР-1 за життєвий цикл, тис. грн	37153,5	35000,0	-2153,5
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	12388,9	12388,9	
Кількість ремонтних циклів ПР-3 за життєвий цикл k	22,3	22,3	
Сумарний коефіцієнт дисконтування ПР-3	3,810	3,810	
Витрати на одиницю ПР-3 у розрахунковому році, тис. грн	500	500	
Кількість поточних ремонтів ПР-3 за життєвий цикл	11,1	11	-0,1
Витрати на проведення ПР-3 за життєвий цикл, тис. грн	5573,0	5500,0	-73,0
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	1905,0	1905,0	
Кількість ремонтних циклів ПР-2 за життєвий цикл l	44,6	44,6	
Сумарний коефіцієнт дисконтування ПР-2	7,638	7,638	
Витрати на одиницю ПР-2 у розрахунковому році, тис. грн	300	300	
Кількість поточних ремонтів ПР-2 за життєвий цикл	22,3	22	-0,3
Витрати на проведення ПР-2 за життєвий цикл, тис. грн	6687,6	6600,0	-87,6
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	2291,3	2291,3	
Сумарний коефіцієнт дисконтування ПР-1	10,479	10,479	
Витрати на одиницю ПР-1 у розрахунковому році, тис. грн	100	100,0	
Кількість поточних ремонтів ПР-1 за життєвий цикл	150,1	150	
Середньорічна кількість поточних ремонтів ПР-1	4,69	4,7	
Витрати на проведення ПР-1 за життєвий цикл, тис. грн	15008,2	15000,0	-8,2

Продовження табл. 3

1	2	3	4
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	4914,7	4914,7	
Сумарний коефіцієнт дисконтування ТО-3	10,479	10,5	
Витрати на одиницю ТО-3 у розрахунковому році, тис. грн	30	30,0	
Кількість технічних обслуговувань ТО-3 за життєвий цикл	1473,9	1474,0	
Середньорічна кількість технічних обслуговувань ТО-3	46,1	46,1	
Витрати на проведення ТО-3 за життєвий цикл, тис. грн	44217,1	44220,0	2,9
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	14479,8	14479,8	
Витрати на ремонт і технічне обслуговування за життєвий цикл, тис. грн	145793,1	136320,0	-9473,1
Те саме з урахуванням дисконтування, тис. грн	43887,2	43887,2	

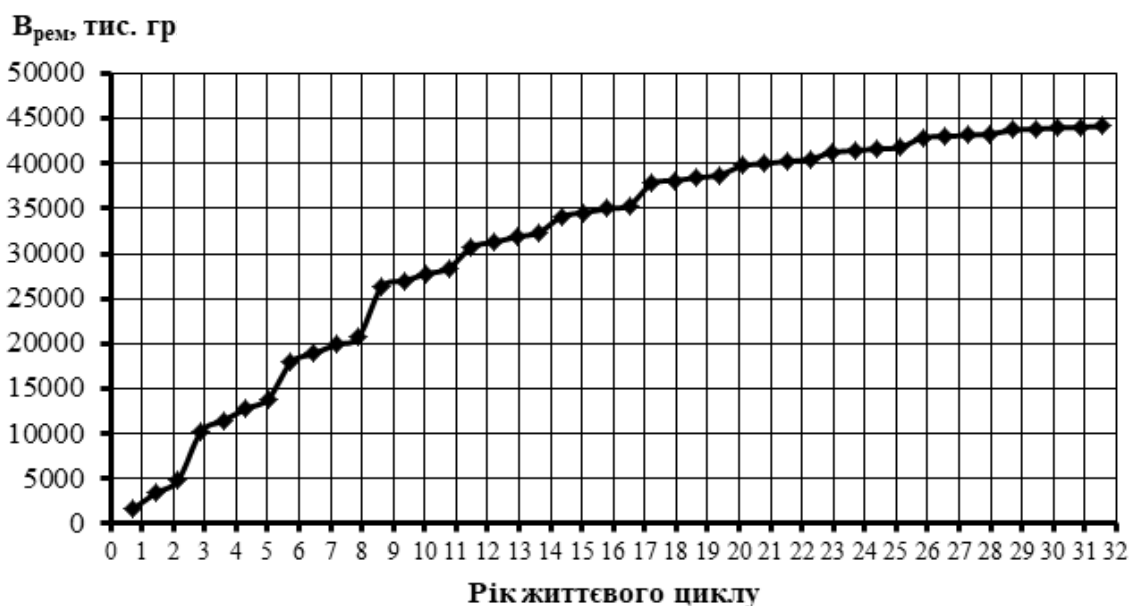


Рис. 1. Ремонтна складова життєвого циклу електропоїзда ЕПЛ9т з урахуванням дисконтування

Висновки:

- проведено аналіз експлуатаційних факторів використання електропоїзда, що впливають на формування ремонтної складової життєвого циклу;
- розроблено математичний опис ремонтної складової життєвого циклу електропоїзда з урахуванням вимог планово-попереджувальної системи ремонту тягового рухомого складу;
- надано економічну оцінку ремонтної складової електропоїзда серії

ЕПЛ9т за умовами конкретного маршруту, що ним обслуговується протягом життєвого циклу.

Отже, запропонований техніко-економічний підхід з достатньою точністю оцінює ремонтну складову життєвого циклу, що дасть змогу в подальшому використати його для розроблення загальної математичної моделі життєвого циклу електропоїзда.

Список використаних джерел

1. Методы оценки жизненного цикла подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. Луганск: Ноулидж, 2011. 174 с.
2. Калабухін Ю. Є. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. Вип. 111. С. 106-120.
3. Калабухін Ю. Є. Теоретичні положення визначення вартості життєвого циклу тягового рухомого складу. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*. 2008. Вип. 24. С. 221–225.
4. Оценка жизненного цикла / Э. Д. Тартаковский, А. П. Фалендыш, Ю. Е. Калабухин, С. Г. Грищенко. *Локомотив-информ*. 2013. № 2(80). С. 56-60.
5. Калабухін Ю. Є., Грищенко С. Г., Фалендиш А. П. Методологія та результати оцінки техніко-економічних показників використання сучасних електропоїздів з урахуванням життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганськ. 2009. № 4 (134). Ч. 1. С. 193-199.
6. Калабухін Ю. Є. Результати дослідження варіантів оновлення маневрових тепловозів у відповідності до умов експлуатаційної роботи протягом життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2010. Вип. 119. С. 22-127.
7. Калабухін Ю. Є., Рудковський О. В. Формалізація оцінки ремонтної складової життєвого циклу маневрового тепловоза. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4. С. 199-203.
8. Методичний підхід щодо визначення ефективності функціонування окремого приміського пасажирського поїзда / Ю. С. Бараш, М. П. Сначов, О. О. Матусевич, Х. В. Кравченко. *Збірник наукових праць ДНУЗТ імені В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту»*. 2014. Вип. 7. С. 88-100.
9. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Збірник наукових праць ХарДАЗТ*. 2001. Вип. 68. С. 55-58.
10. Понтисселли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава. От теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4 (8). С. 19-24.
11. Selecting Test and Maintenance Strategies to achieve Availability Target with lowest Life Cycle Cost, P. Dersin, F. Perrone, C. Arroum (ALSTOM Transport) RAMS 2008, Las Vegas, NE, USA.
12. Achieving Availability Cost-effectively in complex Systems, P. Dersin (ALSTOM Transport); Tutorial, RAMS 2009, Fort Worth, TX, USA.
13. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового та моторвагонного рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро- та дизель-поїздів): затв. наказом Укрзалізниці від 15.10.2015 р. № 429-Ц/ОД. Київ : Укрзалізниця, 2015. 45 с.

Калабухін Юрій Євгенович, доктор технічних наук, професор кафедри маркетингу, комерційної діяльності та економічної теорії, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. Тел.: (057) 057-730-10-47. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Мартинів Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Мартинів Станіслав Ігорович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>.

Тел.: +38 (050) 303-98-50. E-mail: st.mrtnv@gmail.com.

Kalabukhin Yuri, Dr. Sc. (Tech). Professor, Department of marketing, business activity and economic theory, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3693-7607>. Тел.: (057) 057-730-10-47. E-mail: kalabuxin-fet@ukr.net.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Tel. (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Martynov Stanislav. Postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. Тел.: +38 (050) 303-98-50. E-mail: st.mrtvn@gmail.com.

Статтю прийнято 12.03.2023 р.

УДК 629.423

ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Д-р техн. наук С. В. Панченко, канд. техн. наук В. В. Панченко, аспірант О. Г. Туренко

ANALYSIS OF EMERGENCY MODES OF TRACTION INDUCTION ELECTRIC DRIVE

Dr. Sc. (Tech.) S. Panchenko, PhD (Tech.) V. Panchenko, postgraduate student O. Turenko

***Анотація.** Проведено дослідження електромагнітних процесів, що відбуваються при аварійних режимах роботи тягового асинхронного електропривода. Наведено результати імітаційного моделювання короткого замикання одного з силових ключів автономного інвертора напруги, зникнення напруги живлення. При імітаційному моделюванні встановлено, що проаналізовані режими спричиняють значні струмові перевантаження, коливання моменту і можуть призвести до виходу з ладу електропривода.*

***Ключові слова:** тяговий асинхронний електропривод, автономний інвертор напруги, імітаційне моделювання, коротке замикання силового ключа, провали напруги.*

***Abstract.** The operation process of the traction asynchronous electric drive of the rolling stock may be accompanied by the occurrence of emergency modes, which are characterized by current overloads and may lead to damaging power electric circuits or mechanical part of the electric drive. Therefore, studying electromagnetic processes that occur in emergency modes of operation is relevant, in particular, for developing systems aimed at diagnosing and protecting traction equipment. Ukrainian and foreign studies of emergency modes in an asynchronous electric drive were analyzed. The most frequent causes of emergency modes are failures in static converters, therefore it is advisable to conduct an analysis of electromagnetic processes specifically in autonomous inverters. Using Matlab/Simulink software environment a simulation model of the vector control system of the traction asynchronous electric drive with spatial vector pulse width modulation was developed, and the short-circuit modes of the power switch of the autonomous voltage inverter and the disappearance of the supply voltage were simulated. The oscillograms of electromagnetic processes in these modes were shown and compared with the nominal mode of operation. The simulation results show that the analyzed emergency modes, even with a short duration of less than*

0.5s, can lead to significant damage to the electric drive. Both cases lead to significant current overloads: in the case of a short circuit of the power switch, a three-fold excess of the phase current is observed, during recovery after a supply voltage failure, the phase currents increase to the starting level, as well as an almost instantaneous increase in the supply voltage on the input filter capacitor occurs. The Fourier analysis of the phase A current in the above emergency modes shows an increase in the coefficient of nonlinear distortions by 65 %, a decrease in the amplitude of the main harmonic to 60 %, and the appearance of a significant number of subharmonics. In the case of a short circuit, the amplitudes of the subharmonics even exceed the fundamental harmonic. In addition, the process of returning from the emergency mode to normal at the first moment of time was characterized by a reduced moment of resistance (20 % of the nominal), and then by an exit to the nominal parameters.

Keywords: traction asynchronous electric drive, autonomous voltage inverter, simulation modeling, short circuit of the power switch, voltage dips.

Вступ. Процес експлуатації тягового асинхронного електропривода (ТАЕП) рухомого складу може супроводжуватися виникненням аварійних режимів, що характеризуються струмовими перевантаженнями та можуть призвести до пошкоджень у силових електричних колах і механічній частині електропривода. Тому дослідження процесів, що виникають при аварійних режимах, є актуальним, зокрема для створення систем діагностування та захисту тягового обладнання. Математичне (імітаційне) моделювання є оптимальним методом дослідження аварійних режимів, оскільки проведення натурних експериментів на реальних ТАЕП ускладнене.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню процесів, що відбуваються при нестационарних режимах роботи (аварійних, неповнофазних тощо) асинхронного електропривода, присвячено велику кількість вітчизняних [1, 2, 5] і зарубіжних робіт [8, 9]. Аналіз існуючих досліджень показує, що найчастішими причинами аварійних режимів в асинхронному електроприводі є відмови в тяговому статичному перетворювачі. У роботі [3] були структуровані найбільш імовірні та небезпечні відмови. До них належать зовнішні та внутрішні короткі замикання в АІН, провали та відновлення напруги живлення та неповнофазні режими роботи АІН. Дослідження [6, 7] присвячені виявленню несправностей в АІН за допомогою штучних нейронних мереж. У

роботах [4, 10, 11] досліджуються неповнофазні режими роботи АІН.

Визначення мети та завдання дослідження. Дослідження електромагнітних процесів при аварійних режимах у ТАЕП з векторною системою керування, а саме короткому замиканні силового ключа автономного інвертора напруги та зникненні напруги живлення.

Основна частина дослідження. Для дослідження обраних аварійних режимів було розроблено імітаційну модель векторного керування з просторово векторною ШІМ тяговим асинхронним електроприводом, силова частина якої складається з тягового асинхронного електродвигуна АД914, дворівневого інвертора, вхідного фільтра, блока регулювання напруги ланки постійного струму (рис. 1).

Для аналізу змін електромагнітних процесів, що протікають під час аварійних режимів, насамперед необхідно провести імітаційне моделювання системи ТАЕП у нормальному режимі роботи. Як порівнювані параметри було обрано частоту обертання, фазні струми, електромагнітний момент і напругу ланки постійного струму (рис. 2) і проведено Фур'є-аналіз струму фази А I_{sa} (рис. 3).

Процес імітаційного моделювання відбувався за таким алгоритмом:

1. Заряджання конденсатора вхідного фільтра до напруги 3000 В і підтримка його значення гальмівним чопером.

2. Пуск з моментом опору $0,5M_n$, а після виходу на номінальну частоту обертання – збільшення до номінального значення.

У результаті аналізу коефіцієнт спотворення фазного струму склав 26 %.

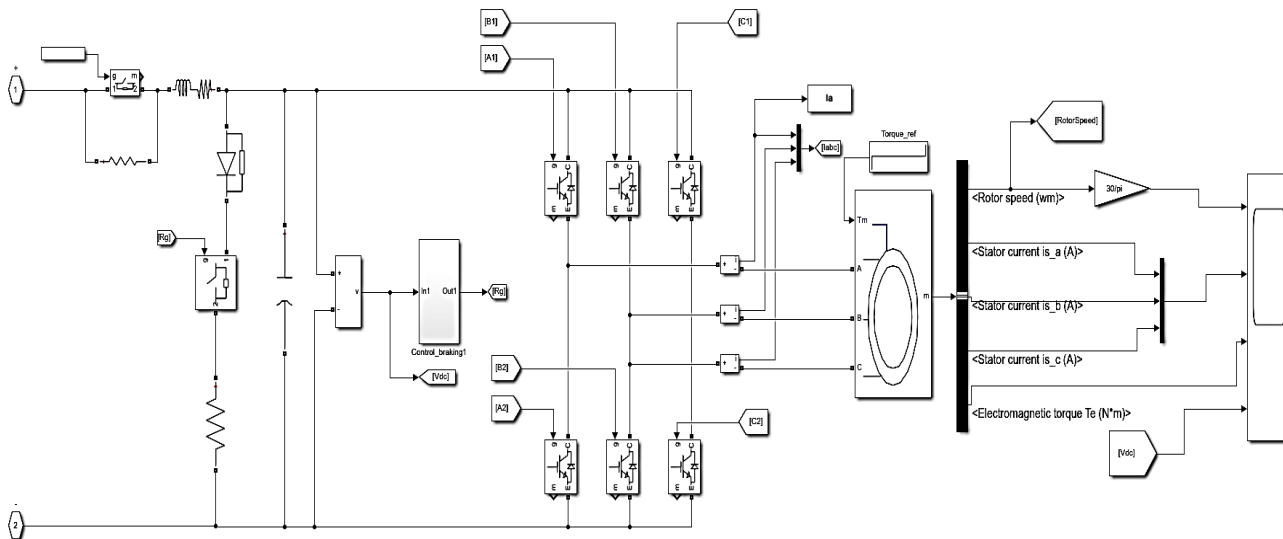


Рис. 1. Силова частина системи ТАЕП

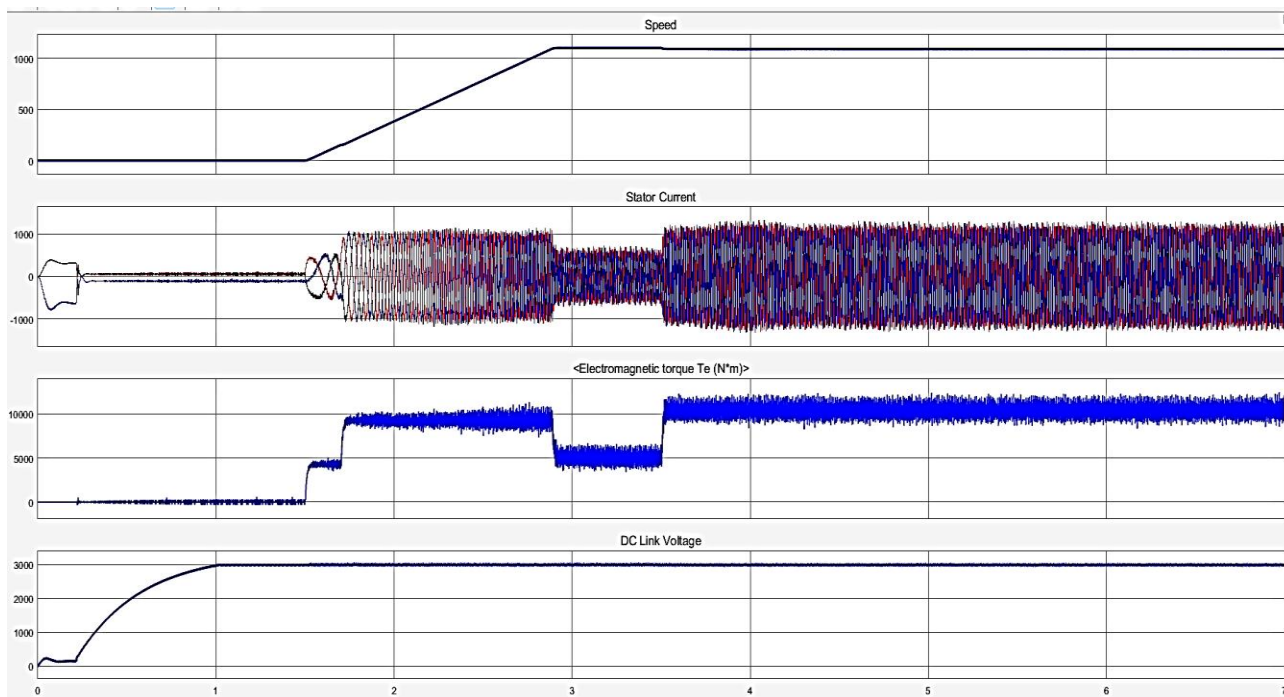
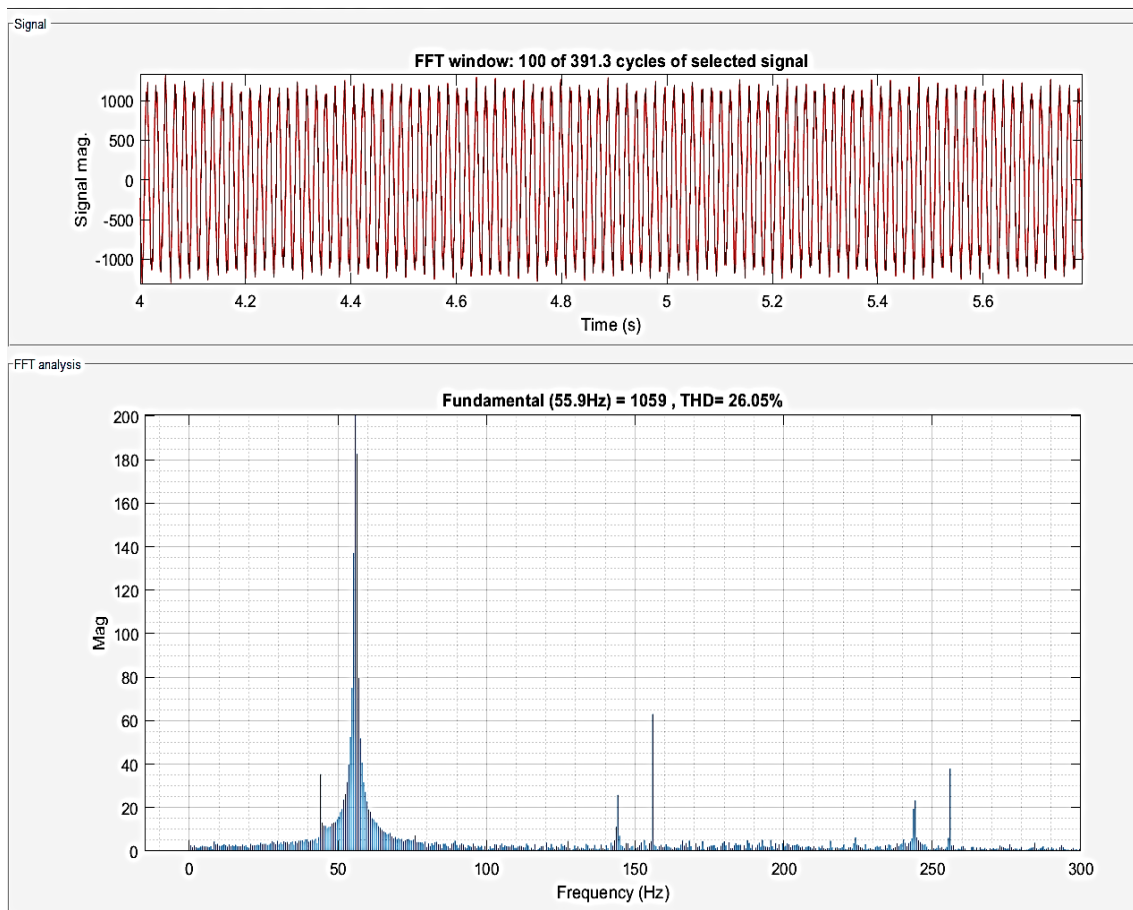


Рис. 2. Результати моделювання нормального режиму роботи ТАЕП

Рис. 3. Фур'є-аналіз струму I_{sa} нормального режиму роботи ТАЕП

Внутрішні та зовнішні короткі замикання в АІН є одними з найнебезпечніших аварійних режимів роботи асинхронного електропривода, оскільки можуть викликати не тільки пошкодження в електричних колах, але й механічне руйнування двигуна, редуктора та виконавчого органу. Під внутрішнім коротким замиканням розуміють вихід з ладу одного з силових ключів АІН, або внаслідок надходження хибного сигналу керування на силовий ключ. Під зовнішнім коротким замиканням розуміють двофазне або трифазне замикання між собою вихідних фаз АІН.

Внутрішнє коротке замикання в моделі було реалізовано шляхом подачі хибного сигналу керування на закриття силового транзистора протягом 0,2 с. Результати моделювання електромагнітних процесів для цього випадку показані на рис. 4 та 5.

Наведені осцилограми показують, що режим короткого замикання силового ключа характеризується малим часом протікання електромагнітних процесів і призводить до швидкого падіння частоти обертання, значних пульсацій моменту, пікового трикратного струмового перевантаження та появи субгармонік, амплітуди деяких навіть перевищують основну.

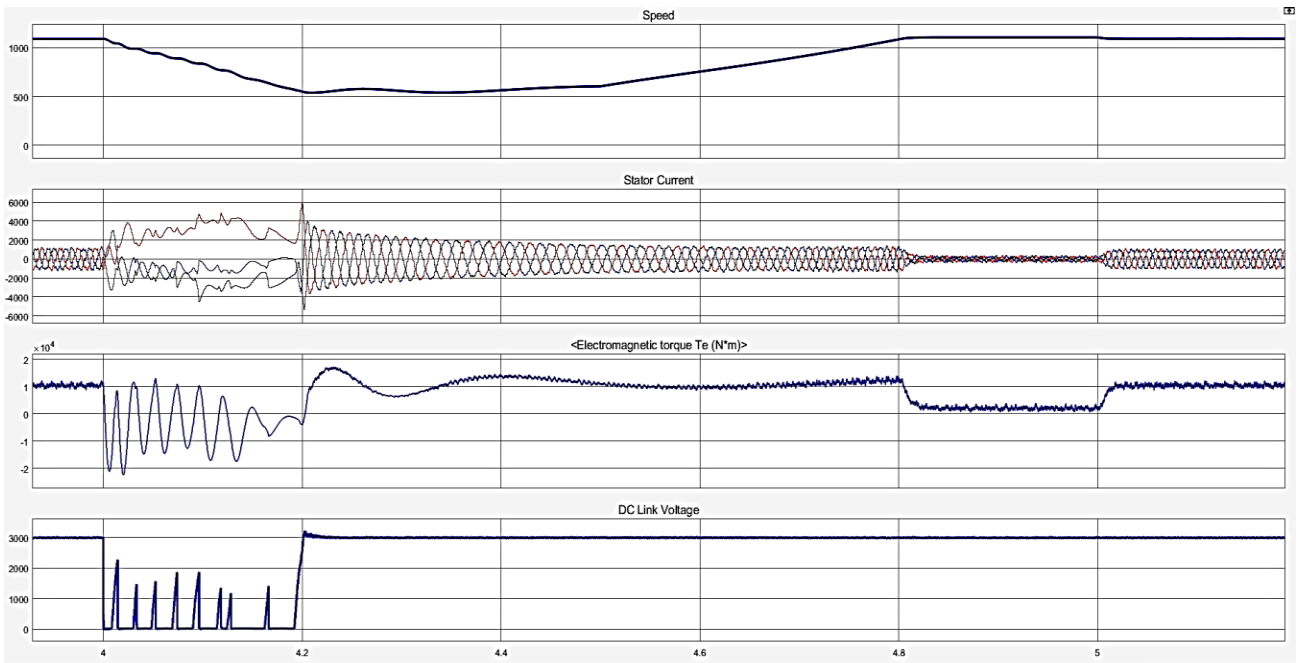


Рис. 4. Результати моделювання ТАЕП при короткому замиканні силового транзистора АІН

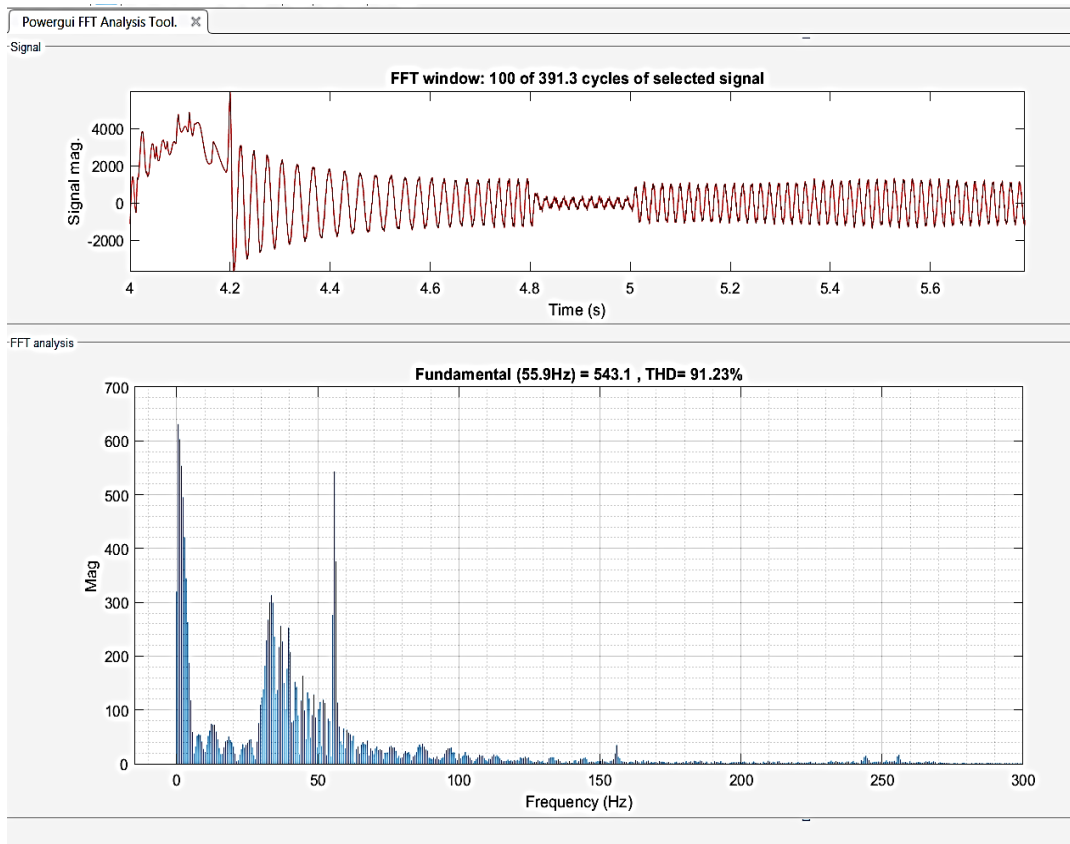


Рис. 5. Фур'є-аналіз струму I_{sa} при короткому замиканні силового транзистора АІН

Під провалами напруги розуміють короточасне часткове зниження, або повну втрату його діючого значення. При падінні напруги в асинхронному двигуні відбувається зниження його електромагнітного моменту залежно від тривалості падіння напруги. Найгіршим випадком провалу напруги є

стрибокподібне падіння напруги до нуля, що трапляється при відриві струмоприймача від контактної мережі. При цьому відбувається розряд конденсатора фільтра через силові ключі на двигун [1]. Результати моделювання електромагнітних процесів у ТАЕП при зникненні напруги живлення показані на рис. 6 та 7.

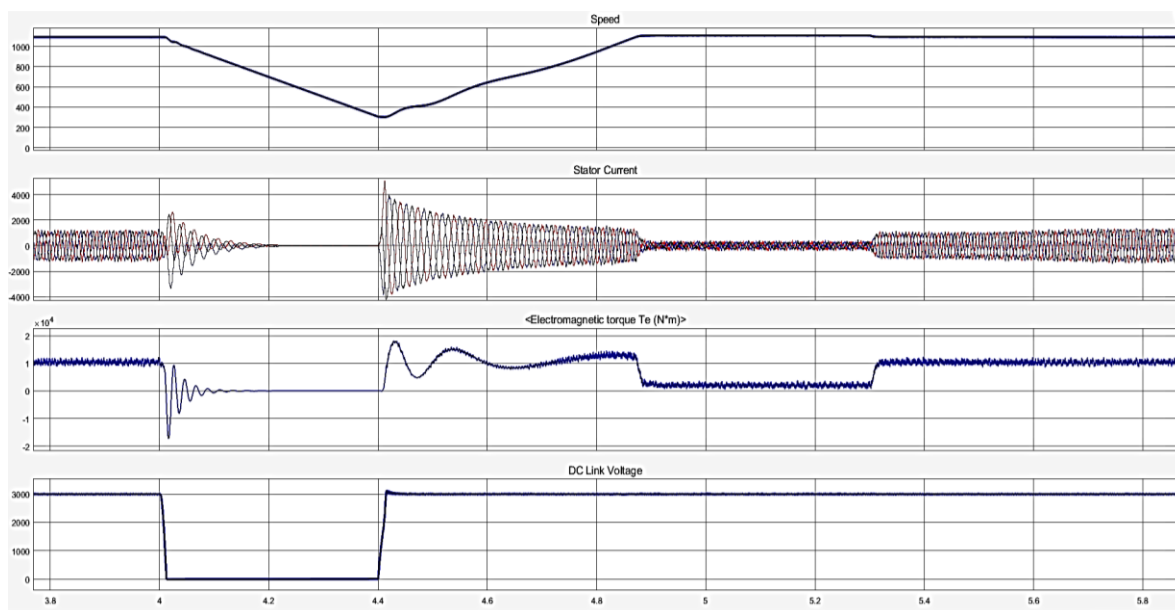


Рис. 6. Результати моделювання ТАЕП при зникненні напруги живлення

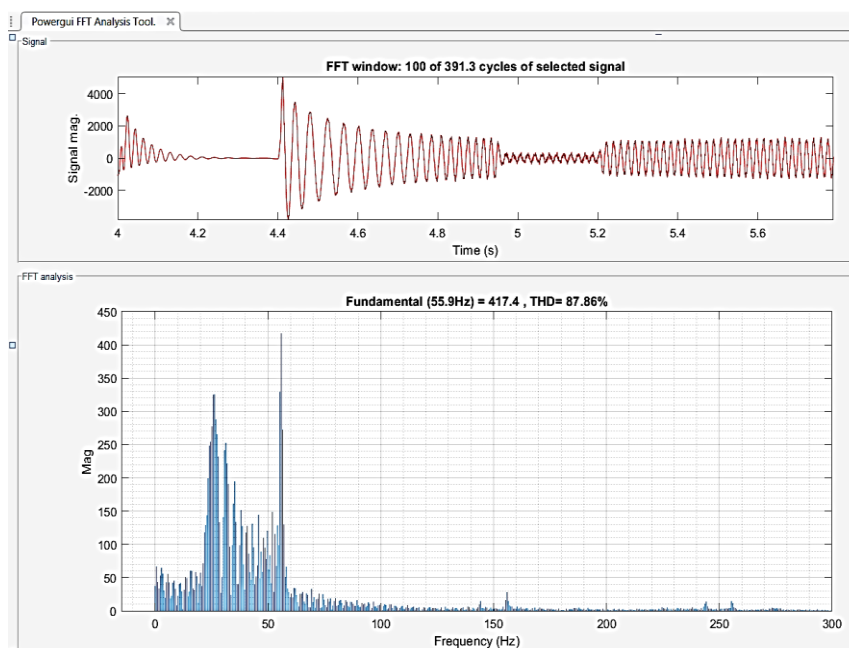


Рис. 7. Фур'є-аналіз струму I_{sa} при зникненні напруги живлення

Як видно з результатів, при зникненні напруги живлення відбувається різке зниження електромагнітного моменту, що призводить до «перекидання двигуна», а при відновленні напруги живлення – підвищення фазних струмів до рівня пускових, швидке підвищення напруги на конденсаторі фільтра. Фур'є-аналіз фазного струму з моменту зникнення напруги живлення і до повернення до номінального режиму показує зменшення амплітуди основної гармоніки на 60 %, появу значної кількості субгармонік з амплітудами, що не перевищують амплітуду основної.

Висновки. У роботі досліджено аварійні режими, які можуть виникати в ТАЕП з тяговим електродвигуном АД914, і виконано порівняння з номінальним режимом роботи. Результати імітаційного моделювання показують, що проаналізовані аварійні режими навіть при короткочасній

тривалості (0,2 с при короткому замиканні та 0,4 с при зникненні напруги живлення) здатні призвести до значних пошкоджень і спричинити зупинку електродвигуна. Обидва випадки призводять до кратних струмових перевантажень, збільшення спотворень фазного струму до 65 %, появи субгармонік з високими амплітудами (у випадку короткого замикання навіть вище основної гармоніки) і значних пульсацій електромагнітного моменту. Крім того, повернення з аварійного режиму до нормального на номінальні характеристики відбувалось при моменті, який складав 20 % номінального. Результати підтверджуються осцилограмами електромагнітних процесів в аварійних режимах роботи і в подальшому можуть бути використані при розробленні елементів захисту такої системи електропривода.

Список використаних джерел

1. Яцько С. І. Система моніторингу стану асинхронного тягового електропривода рухомого складу. *Автоматизовані системи електричного транспорту: збірник наукових праць Укр.ДУЗТ*. 2015. № 153. С. 79-84. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64135>.
2. Калінов А. П., Ухань Ж. І., Урдін І. В. Метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2009. № 4 (57). С. 98-101.
3. Метельский В. П. Эффективные алгоритмы управления в аварийных режимах частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами с автономными инверторами напряжения. *Электротехника та електроенергетика*. 2005. № 1. С. 54-58.
4. Метельский В. П., Лохматов А. Г. Исследование, анализ и идентификация неполнофазных режимов инвертора в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе. *Электротехника та електроенергетика*. 2006. № 2. С. 12-19.
5. Лохматов А. Г. Имитационная модель асинхронного электропривода с АИН-ШИМ для исследования коротких замыканий в автономном инверторе. *Электротехника і електроенергетика*. 2007. № 1. С. 37-43.
6. Abid M., Laribi S. S., Al-asgar Z. S. and Larbi M. Artificial Neural Network Approach Assessment of Short-Circuit Fault Detection in a Three Phase Inverter. *2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN)*. 2021. P. 1-5. doi:10.1109/ICOTEN52080.2021.9493498.
7. Jun L., Junnian W., Wenxin Y., Zhenheng W., Guang'an Z. Open-circuit fault diagnosis of traction inverter based on improved convolutional neural network. *Journal of Physics. Conference Series*. 2020. Vol. 1633. doi:10.1088/1742-6596/1633/1/012099.
8. Ahmad N. S., Abdullah A. R., Bahari N. Open and Short Circuit Switches Fault Detection of Voltage Source Inverter Using Spectrogram. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 190-199. DOI:10.11142/jicems.2014.3.2.190.

9. Ubale M. R., Dhumale R. B., Lokhande S. D. Open switch fault diagnosis in three phase inverter using diagnostic variable method. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. P. 636–640. URL: <https://doi.org/10.15623/IJRET.2013.0212108>.

10. Elsayed M. E., Hamad M. S. and Ashour H. A. Open-Phase Fault-Tolerant Control Approach for EV PMSM based on Four-Leg VSI. *2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. 2022. P. 1-7. doi: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021774.

11. Yang S.-C., Chen G.-R. and Jian D.-R. On-Line Stator Open-Phase Fault Detection and Tolerant Control for Permanent Magnet Machines Using the Neutral Point Voltage. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 1073–1082. doi:10.1109/ACCESS.2017.2651113.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, ректор, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Тел.: +380994886100.

E-mail: panchenko074@ukr.net.

Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Туренко Олександр Геннадійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7592-7455.

Тел.: +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Tel.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.

Panchenko Vladyslav, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Tel.: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Turenko Oleksandr, postgraduate student, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7592-7455.

Tel.: +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Статтю прийнято 17.03.2023 р.

УДК 629.4.027

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, кандидати техн. наук А. В. Труфанова, В. О. Шовкун, аспірант О. Л. Шарий, студент С. Р. Мартіросян

ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF AXLE BOXES OF FREIGHT CARS

Dr. Sc. (Tech.) I. E. Martynov, PhD (Tech.) A. V. Trufanova, PhD (Tech.) V. O. Shovkun, postgraduate student O. L. Sharyi, student S. R. Martirosyn

***Анотація.** Розглянуто стан безпеки руху у вагонному господарстві АТ «Укрзалізниця». Отримано динаміку змін кількості відчеплень вагонів на шляху прямування. Визначено основні причини відчеплень. Встановлено, що значна частина відчеплень викликана відмовами буксових вузлів вагонів. Проведено аналіз причин відмов. Показано, що існуюча конструкція*

букси не забезпечує необхідний рівень надійності. Перспективним напрямом підвищення надійності є використання підшипників касетного типу та модернізація корпусів букс.

Ключові слова: вантажний вагон, буксовий вузол, відмова, надійність, безпека, роликовий підшипник.

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the level of safety on Ukrainian railways.*

The reliability of wagons plays an important role in ensuring safety. Uncoupling of wagons along the route due to failures of wagon structural elements causes transport incidents and can lead to an emergency.

The most common reason for uncoupling a wagon from a train is axle box failures. The conducted studies show that the absolute number of uncouplings of wagons along the route has decreased compared to 1995. But the number of uncouplings caused by roller axle box failures remains at a high level with certain fluctuations. Functional dependences characterizing the change in the number of cuts over time are determined.

For a more complete description of the change in the level of traffic safety on the railways, the performance indicators were considered depending on the overall performance of the railway transport. In particular, the number of working park was taken into account.

It has been established that over the past decade, in relation to the working fleet, the number of wagon failures due to the fault of roller axle boxes remains practically at the same level.

An analysis of the causes of failures shows that the main one is damage to cylindrical roller bearings. This is followed by end mount failures.

Attention is drawn to the sharp increase in the number of failures caused by non-compliance with the technology of installation work. This indicates insufficient qualification of the service personnel.

Lubricants for bearings have insufficient reliability. Also, a number of failures are caused by damage to the axle boxes.

The lack of reliable methods for diagnosing axle boxes failures at an early stage in operation leads to the occurrence of fractures of the axle journals.

One of the possible ways to increase the reliability of axle box units is the use of cassette bearings, which have a number of significant advantages.

Keywords: freight car, axle box, failure, reliability, safety, roller bearing.

Вступ. Залізничний транспорт являє собою складну систему, що поєднує як технічні засоби (локомотиви, вагони, колійне господарство тощо), так і зусилля людини-оператора, який керує зазначеними технічними засобами. Ефективна робота залізниць залежить від гармонічного поєднання всіх цих факторів.

Одним з найважливіших питань на залізницях залишається забезпечення безпеки руху. Ця проблема завжди перебувала в центрі уваги під час створення перспективних конструкцій вагонів, розроблення технологічних процесів їхнього ремонту і технічного обслуговування. Водночас підвищення

швидкостей руху, ускладнення технічних засобів потребують посилення уваги всіх без винятку фахівців цієї галузі до забезпечення безперебійності та безпеки руху поїздів і маневрової роботи.

Важлива роль у забезпеченні безпеки руху належить вагонному господарству. Враховуючи масовість вагонного парку, будь-яка відмова елемента конструкції вагона в дорозі може стати причиною транспортної події. Особливо це стосується буксових вузлів, відмова яких може спричинити злам шийки осі з важкими наслідками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Починаючи з першої половини 1960-х рр. на залізницях України

розпочалася масова експлуатація вантажних і пасажирських вагонів з буксовими вузлами, обладнаними двома циліндричними роликowymi підшипниками на гарячій посадці [1]. Аналіз багаторічного досвіду експлуатації викладено в дослідженнях [2, 3]. На підставі проведеного аналізу причин відмов і пошкоджень елементів буксових вузлів автори визначили основні напрями для досліджень: збільшення втомної довговічності циліндричних підшипників, підвищення працездатності торцевого кріплення та міцності сепаратора.

Активну роль у дослідженнях щодо підвищення надійності роликowych букс відігравали фахівці Харківського інституту інженерів залізничного транспорту (нині УкрДУЗТ), які працювали над підвищенням довговічності сепараторів роликowych підшипників шляхом заміни латуні на поліамід. Вони запропонували конструкцію масивного поліамідного сепаратора для циліндричних підшипників [4, 6], використовувану і нині.

Торцеве кріплення буксових підшипників здійснюється гайкою М110 або шайбою з болтами М20. Для збільшення міцності та пружності, зниження рівня динамічних сил осьового напрямку доцентом кафедри вагонів ХІТ (УкрДУЗТ) І. Д. Борзиловим було запропоновано модернізувати гайку за допомогою виточок у її тілі. Дослідження напружено-деформованого стану модернізованих гайок були виконані з використанням поляризаційно-оптичного методу та підтвердили, що ці гайки мають більшу міцність, пружність і довговічність [7].

Значна кількість інцидентів на залізницях України, віднесених за вагонним господарством, обумовило інтерес керівництва АТ «Укрзалізниця» до технічного стану елементів вагонів. У дослідженні [8] наведено результати натурних обстежень технічного стану буксових вузлів вантажних вагонів на залізницях України. Встановлено, що 8 %

оглянутих підшипників непридатні до подальшого використання. Основною причиною відмов підшипників було пошкодження зовнішніх кілець від втоми.

Аналіз рівня безпеки руху на залізницях України за період 1995-2002 рр. наведений у статті [9]. Автори проаналізували динаміку змін кількості відчеплень вагонів через відмови роликowych букс з урахуванням щорічної зміни величини вантажообігу та кількості робочого парку вагонів. Доведено, що не можна спиратися лише на абсолютні показники відчеплень, бо вони дають спотворену картину рівня безпеки руху.

У статті [10] виконано аналіз надійності підшипників критих універсальних вагонів, власником яких було Державне підприємство «Український державний центр залізничних рефрижераторних перевезень «Укррефтранс». У результаті обробки одержаної інформації встановлено, що понад 82 % оглянутих підшипників мають пошкодження різного ступеня важкості.

Результати подібних досліджень викладені в дослідженнях [11, 12]. Автори аналізують стан буксових підшипників, описують пошкодження, виявлені при оглядах, особливу увагу приділяючи поліамідним сепараторам.

Авторами статті [13] розглянуто вплив діагностики на ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації після виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту. Вони доходять висновку, що при застосуванні діагностики буксових вузлів вантажних вагонів під час технічного обслуговування й ремонту можна знизити величину ризиків відмов у 2...4,5 раза за умови успішного виконання поставленого завдання.

У країнах Європейського Союзу та Північної Америки велика увага приділяється дослідженням, присвяченим удосконаленню методів контролю та засобів контролю технічного стану буксових вузлів

під час руху поїзда [14-16]. Це обумовлено тим, що як власники залізниць, так і постачальники підшипникових вузлів для рухомого складу не бажають розкривати фактичний рівень надійності власної продукції, щоб уникнути іміджевих втрат.

Очевидно, що, незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених аналізу впливу надійності буксових вузлів з циліндричними роликівими підшипниками на безпеку руху на залізницях, це питання потребує подальшого розвитку в плані більш детального розгляду у прив'язці до сучасних умов експлуатації вантажних вагонів.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є аналіз технічного стану елементів буксових вузлів вантажних вагонів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз випадків порушення безпеки руху на залізницях з вини вагонного господарства;

- визначити залежності, що характеризують динаміку зміни кількості відчеплень;

- встановити основні фактори, що викликають відмови буксових вузлів на шляху прямування і відчеплення вагонів із затримкою руху;

- визначити причини відмов буксових підшипників.

Основна частина дослідження.

Найчастіше причиною відчеплення вагона від поїзда стають відмови буксових вузлів. Якщо абсолютна кількість відчеплень вагонів на шляху прямування порівняно з 1995 р. зменшилася, то кількість відчеплень, викликаних відмовами саме роликівих букс, з певними коливаннями залишається на високому рівні – близько 30 % (рис. 1). Хоча треба зазначити, що починаючи з 2008 р. зростає кількість відчеплень, викликаних відмовами автоматичних гальм.

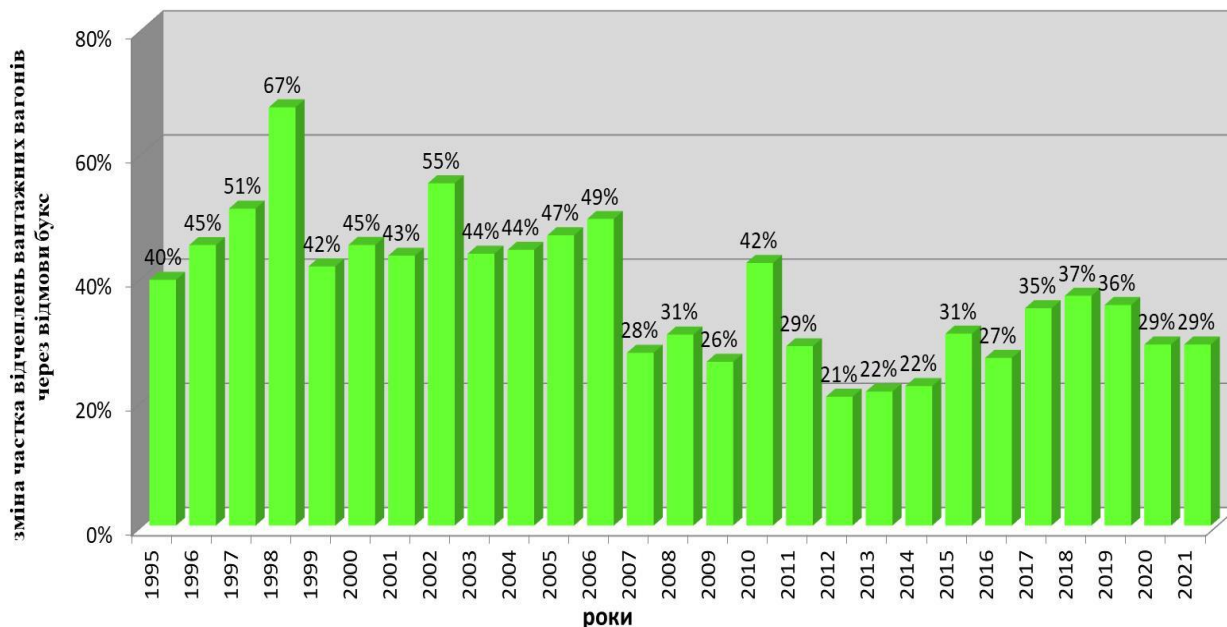


Рис. 1. Зміна кількості відчеплень вагонів на шляху прямування, за роками, через відмови роликівих букс

На рис. 2 наведено динаміку змін відчеплень через відмови роликівих букс, виявлені оглядачами вагонів під час

технічного обслуговування на ПТО, починаючи з 2002 р.

Отримані дані свідчать, що близько 50 % відмов вагонів, виявлених під час огляду вагонів на ПТО, викликані саме відмовами роликів букс.

Проте наведені на рис. 1, 2 графіки не в повному обсязі характеризують зміну рівня безпеки руху на залізницях. Адже за

попередні роки змінювалися вантажообіг, а також чисельність робочого парку. Тому більш доцільним є розгляд показників ефективності роботи вагонного господарства залежно від загальних показників функціонування залізничного транспорту.

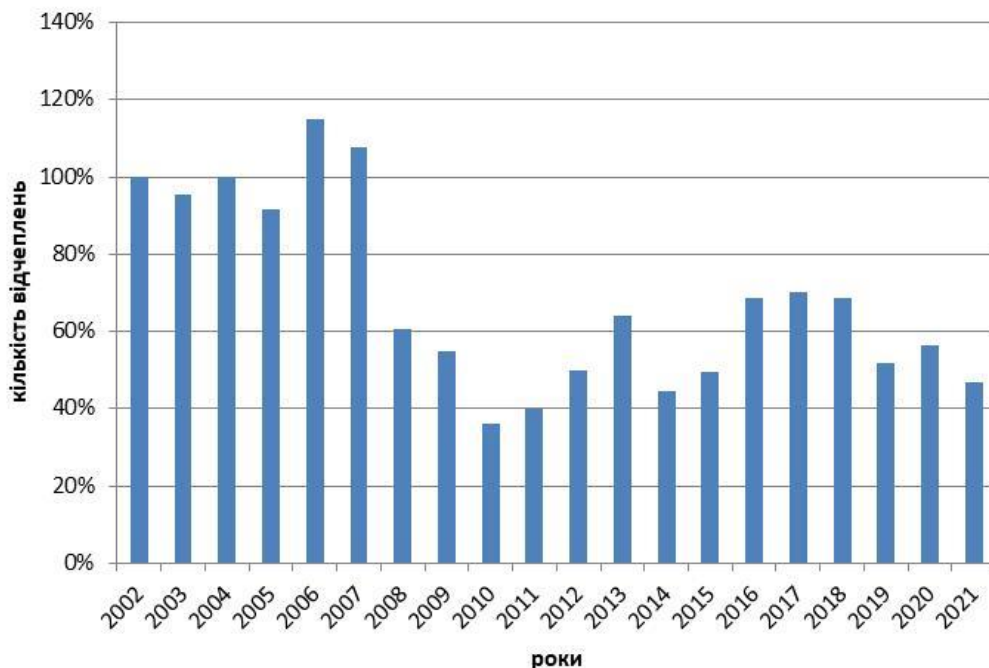


Рис. 2. Зміна кількості відмов роликів букс, виявлених оглядачами вагонів

На рис. 3 наведено графік залежності зміни кількості відчеплень вагонів через відмови роликів букс, що припадають на 1000 вагонів робочого парку, з якого впливає, що, незважаючи на зміни кількості вагонів у робочому парку, рівень безпеки руху порівняно з 2000-х рр. підвищився. Проте останніми роками він практично є постійним.

Аналогічна картина спостерігається при аналізі параметра потоку відмов букс з циліндричними роликівими підшипниками, що припадає на 1 млн ваг. км (рис. 4). Має місце очевидна тенденція до зростання цього показника.

Проведений аналіз свідчить також про принципові недоліки в системі контролю технічного стану роликів букс. Прийнята у вагонному господарстві система

технічного обслуговування рухомого складу передбачає контроль технічного стану буксових вузлів вагонів у процесі руху за допомогою технічних засобів (приладами ПОНАБ і ДИСК-БКВЦ, що реєструють температуру нагрівання букс). Дія зазначених приладів ґрунтується на тому, що при руйнуванні підшипника в буксі спостерігається різке зростання температури, яке фіксується приладами. Найсерйознішим недоліком цієї системи є її непридатність до виявлення пошкоджень буксових вузлів на стадії зародження та розвитку, оскільки на початковому етапі ці пошкодження, як правило, не супроводжуються підвищенням температури. Однак руйнування підшипника з наступним зломом шийки осі може статися будь-якої миті.

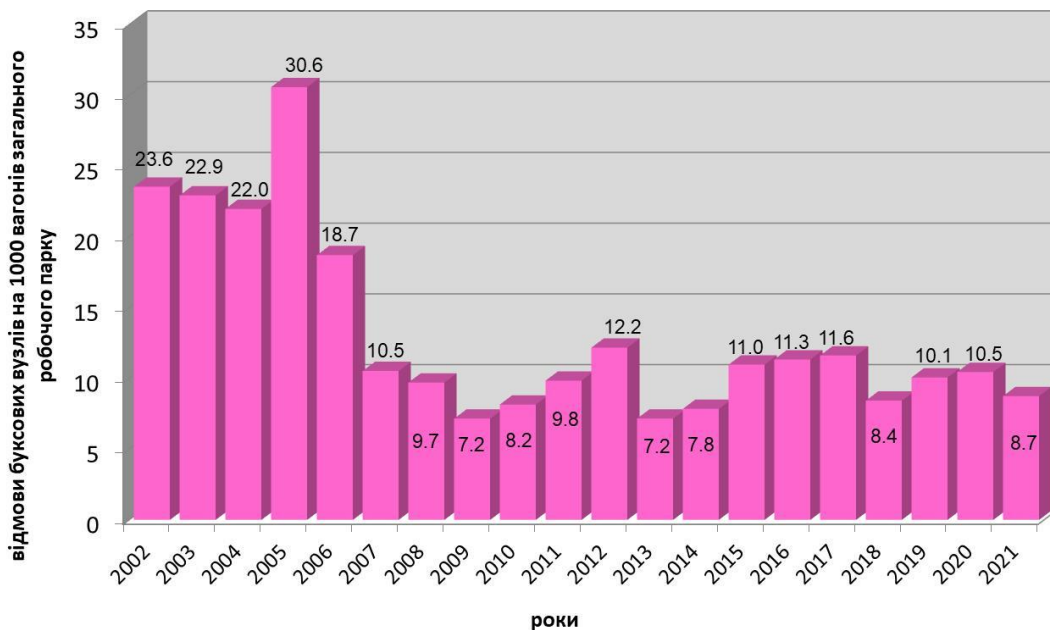


Рис. 3. Зміна кількості відмов роликів букс, що припадає на 1000 вагонів робочого парку

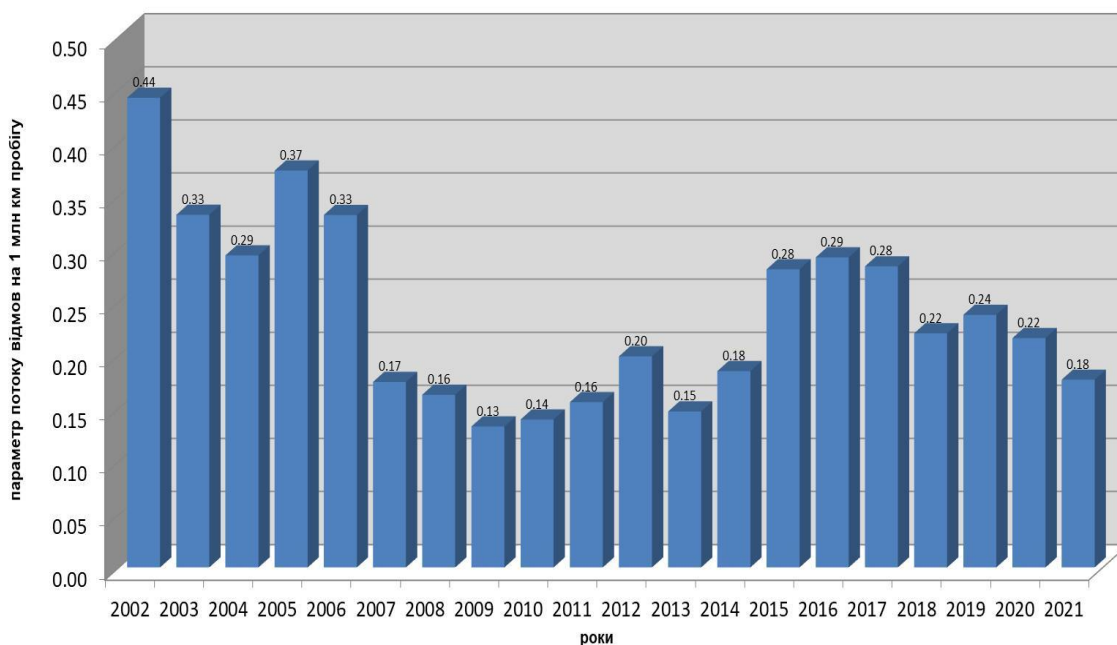


Рис. 4. Залежність параметра потоку відмов роликів букс, що припадає на 1 млн ваг. км

На пунктах технічного обслуговування також проводиться візуальний огляд буксових вузлів оглядачами вагонів. При цьому перевіряється ступінь нагрівання мануальним способом (шляхом торкання

верхньої частини корпусу букси) або за допомогою контактної термометра. Інформацію про наявність відмови можна отримати за непрямыми ознаками: викидання мастила на диск колеса,

зміщення букси вздовж осі колісної пари тощо. При виявленні будь-якої несправності вагон відчіпляється від поїзда і прямує в ремонт.

Проте надто багато залежить від уваги, сумлінності та кваліфікації оглядачів (так званого «людського фактора»).

Відсутність надійних методів діагностування відмов буксових вузлів на етапі виникнення та розвитку може

призвести в експлуатації до зламів шийок осей.

Для забезпечення надійної роботи вагонів важливе значення мають дослідження, проведені з метою визначення причин виникнення пошкоджень буксових вузлів. У табл. 1 наведено співвідношення у відсотках основних причин, що викликали нагрівання буксового вузла та відчеплення вагона від поїзда в 1998-2021 рр.

Таблиця 1

Основні причини надмірного нагрівання буксових вузлів з циліндричними роликowymi підшипниками

	1998-2002	2003-2012	2013-2021
Відмови підшипників	46.41	32.41	18.09
Відмови торцевого кріплення	12.34	23.99	8.53
Втрата мастилом властивостей	4.97	10.80	9.22
Пошкодження сепаратора	14.64	8.79	2.73
Пошкодження ущільнення	4.33	5.15	6.83
Пошкодження корпусу букси	0.18	1.38	4.10
Помилки персоналу	10.22	11.18	26.62
Інше	6.91	6.28	23.89
Разом	100 %	100 %	100 %

Аналіз основних причин нагрівання буксових вузлів свідчить, що за двадцять п'ять років практично втричі скоротилася кількість відчеплень вагонів через несправності підшипників (тріщини, сколи, пошкодження від втоми). Те саме можна сказати і про відмови сепараторів, тобто заміна латунного сепаратора на поліамідний повністю себе виправдала. Скоротилися також і пошкодження торцевого кріплення. Це наслідок прийнятого в 1993 р. рішення про відмову від використання осі РУ1 і відповідно гайки М110 і поступовий перехід на кріплення шайбою та болтами М20.

Привертає увагу значне (більш ніж удвічі) зростання відчеплень, викликаних впливом «людського фактора» – помилки операторів. Вони становлять понад чверть усіх відчеплень. Сюди включені

пошкодження, викликані недотриманням технології монтажних робіт: неправильно підібрані радіальний та осьовий зазори в підшипниках, недостатня або збільшена кількість мастила, перевернута букса, перевантаження вагона.

Практично вдвічі збільшилась кількість відчеплень вагонів через забруднення (обводнення) мастила в буксах. Це свідчить не лише про низьку якість самого мастила. Втрата гумовими прокладками своїх фізико-механічних властивостей під дією агресивного середовища та низьких температур також може призвести до забруднення мастила або потрапляння вологи. У результаті шар мастила втрачає свої властивості розділяти і змащувати поверхні кочення кілець і

роликів і можуть викликати руйнування підшипників.

Також зросла кількість відмов буксових вузлів через пошкодження лабіринтових ущільнень. Особливо небезпечним є суттєве збільшення відмов корпусів букс – майже втричі. Це найбільше зростання серед усіх указаних у табл. 1 факторів. Питання удосконалення конструкції корпусу букси та технології його виготовлення майже ніколи не розглядалися. Сталевий корпус букси завжди був найнадійнішим елементом і практично не відмовляв. Але обладнання

бокових рам візків вантажних вагонів зміцнювальними прокладками сприяло підвищенню інтенсивності спрацювання опорних поверхонь корпусів букс. До активного зносу місць контакту між корпусами букс і буксовими спрямовуючими бокових рам призводив також звивистий рух колісних пар у трьохелементних візках моделі 18-100.

У табл. 2 наведено співвідношення основних причин, що викликали нагрівання буксового вузла та відчеплення вагона від поїзда в 1998-2021 рр.

Таблиця 2

Основні причини відмов циліндричних роликів підшипників

	1998-2002	2003-2012	2013-2021
Злам (тріщина) упорного кільця	13.89	22.90	11.32
Точкова корозія кілець	0.00	0.76	7.55
Тріщина кільця	8.53	7.63	0.00
Раковини та лушення на доріжці кочення	8.53	6.87	0.00
Електроопік	4.17	3.44	9.43
Провертання внутрішнього кільця	7.74	10.31	22.64
Надири типу «ялинка» і вм'ятини на торцях роликів	52.98	36.26	33.96
Відкол борта внутрішнього кільця	0.00	1.91	0.00
Руйнування підшипника	4.17	9.54	11.32
Інші	0.00	0.38	3.77
Разом	100 %	100 %	100 %

Привертає увагу факт появи випадків нагрівання букс через характерний знос типу «ялинка» – майже третина всіх пошкоджень по підшипниках. Причини появи цього дефекту в підшипниках неодноразово розглядалися в дослідженнях науковців і фахівців вагонного господарства [2, 3, 8]. Встановлено, що знос у вигляді «ялинок» на торцях роликів і бортах кілець викликаний дією осьових сил, що

передаються в режимі тертя ковзання роликів по бортах напрямних кілець. Однак сам факт появи нагрівання букси через цей дефект потребує додаткових обстежень.

Також зросли випадки послаблення натягу посадки внутрішніх кілець (з наступним руйнуванням підшипника та можливим зломом шийки осі). Практично не змінюється кількість раптових пошкоджень:

тріщин упорних кілець і бортів підшипників.

Висновки. Результати проведеної статистичної обробки багаторічних спостережень за випадками порушень безпеки руху на залізницях з вини вагонного господарства дали можливість зробити такі висновки:

- встановлено, що частка відчеплень вантажних вагонів на шляху прямування через надмірне нагрівання буксових вузлів залишається на високому рівні і складає близько 30 % загальної кількості відчеплень;

- отримано залежності, що характеризують динаміку зміни кількості відчеплень з урахуванням зміни чисельності вагонного парку та вантажообігу. Доведено, що в останнє десятиріччя параметр потоку відмов роликів набирає тенденцію до зростання;

- встановлено основні фактори, що викликають відмови буксових вузлів на

шляху прямування та відчеплення вагонів із затримкою руху. Основною причиною є помилки персоналу, наступні – відмови буксових циліндричних роликподшипників;

- визначено причини відмов буксових циліндричних підшипників. Основною причиною залишається поява задирок типу «ялинка»;

- виявлені тенденції в динаміці відмов свідчать, що вплив людського фактора на рівень безпеки збільшується. Відповідно фахівцям вагоноремонтних підприємств необхідно посилити вимоги до дотримання працівниками роликівих відділень вимог нормативних документів з ремонту роликівих букс;

- втричі зросла кількість відмов, викликаних пошкодженнями корпусів букс. Тобто науковцям необхідно терміново розробити комплекс заходів з удосконалення їхньої конструкції та технології ремонту.

Список використаних джерел

1. Мартынов И. Э. Буксовые узлы отечественных вагонов: история и перспективы. Залізничний транспорт України. Київ, 2002. № 6. С. 34-37.
2. Цюренко В. Н. Опыт эксплуатации вагонов с буксовыми узлами на подшипниках качения. Труды ВНИИЖТ. Москва, 1982. Вып. 654. С. 4-26.
3. Цюренко В. Н., Петров В. А. Надежность роликковых подшипников в буксах вагонов. Москва: Транспорт, 1982. 96 с.
4. Андриевский В. Г. Буксовый роликподшипник повышенной надежности. Залізничний транспорт України. Київ, 1998. № 1. С. 62-65.
5. Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення: навч. посіб. Харків: «Форт», 2009. 248 с.
6. Гайдамака А. В. Метод расчёта сепаратора роликподшипников рельсового транспорта на прочность при циклическом нагружении. Вестник машиностроения. 2015. № 10. С. 64-72.
7. Борзилов И. Д., Гайдамака А. В., Федорец Е. В. О возможности повышения эксплуатационной надежности торцового крепления букс с роликковыми подшипниками. Межвузовский тематический сборник. Ростов-на-Дону, 1982. Вып. 167. С. 66-69.
8. Мартынов И. Э. Анализ опыта эксплуатации цилиндрических роликподшипников букс грузовых вагонов. Вісник Східноукраїнського державного університету. 2000. № 5 (27). С. 157-159.
9. Пути повышения безопасности движения в вагонном хозяйстве / В. Н. Самсонкин, И. Э. Мартынов, Н. Е. Вещева, А. В. Труфанова. Восточно-украинский журнал передовых технологий. 2003. № 5. С. 30-32.

10. Мартинов І. Е., Ільчишин В. М., Семененко А. П. Аналіз технічного стану буксових вузлів критих вантажних вагонів. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. 2013. Вип. 136. С. 123-127.
11. Аширбаев Г. К., Утепова А. У., Аширбаева И. А. Повышение надежности буксовых узлов колесных пар железнодорожных вагонов. Вестник КазАТК. 2021. № 2 (117). С. 7-12.
12. Butorin D. V., Filippenko N. G., Livshits A. V., Popov S. I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019). 2019. Vol. 760. P. 1-10.
13. Вплив технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів на ризики їх відмов / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, О. А. Шикунів, І. В. Піценко. Наука та прогрес транспорту. 2022. № 1 (97). С. 59-70. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265424>.
14. Manafov E. The use of a fuzzy expert system to increase the reliability of diagnostics of axle boxes of rolling stocks. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2020. Vol. 107. P. 95-106.
15. Arash Amini, Mani Entezam, Zheng Huang, Hamed Rowshandel and Mayorkinos Papaelias Wayside detection of faults in railway axle bearings using time spectral kurtosis analysis on high-frequency acoustic emission signals. Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol. 8 (11). P. 1-9.
16. Satoshi Chiba, Keisuke Ishii Development of an Axle Box Heating Detection System and Improvement of its Reliability. JR EAST Technical Review. 2017. No. 15. P. 23-35.

Мартинов Ігор Ернстович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Труфанова Альона Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Шовкун Вадим Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Шарий Олексій Леонідович, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: Sharyi@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0003-4234-9286>.

Мартirosян Сергій Робертович, студент групи 214-ВВГ-Д22, Український державний університет залізничного транспорту. Спеціальність: 273 Залізничний транспорт. Тел.: +380(95)-468-10-55. E-mail: kobravostok@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-9145-1045>.

Martynov Igor, Dr. Sc. (Tech). Professor, head department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0481-3514>. Tel.: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Trufanova Alyona, Ph.D., Associate Professor, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1702-1054>. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: alena.hiit.vagons@gmail.com.

Shovkun Vadim, Ph.D., Associate Professor, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-35. <https://orcid.org/0000-0003-1826-6053>. E-mail: vadimshovkun62@gmail.com.

Sharyi Oleksii, Postgraduate, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0003-4234-9286>. E-mail: Sharyi@ukr.net.

Martirosyan Sergey, student, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: kobravostok@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-9145-1045>.

Статтю прийнято 27.03.2023 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В СИЛОВИХ ДІОДАХ І ТРАНЗИСТОРАХ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
аспіранти Д. А. Гордієнко, Г. А. Хоружевський, М. В. Філіп'єва

RESEARCH THE ACCURACY OF MODELING POWER LOSSES IN POWER DIODES AND TRANSISTORS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko,
postgraduate H. A. Khoruzhevskyi, postgraduate M. V. Philipjeva

Анотація. Наведено методологію моделювання статичних і динамічних втрат потужності в силових IGBT- та MOSFET-транзисторах у програмних середовищах Matlab і Multisim. Показано, що при моделюванні процесів комутації в силових транзисторах програмне середовище Matlab / Simulink не дає змогу визначати динамічні складові втрат потужності, а саме енергії ввімкнення транзистора, вимкнення транзистора, а також відновлення силових діодів. При цьому моделювання статичних втрат потужності силових діодів і транзисторів у Matlab / Simulink проводиться з суттєвою похибкою через некоректне подання вольт-амперних характеристик. Показано, що для більш коректного і точного моделювання роботи силових транзисторів, у тому числі втрат потужності в силових ключах, доцільніше проводити моделювання в програмному середовищі Multisim, що враховує більше 47 параметрів, включаючи температурні характеристики, паразитні вхідні та вихідні ємності і індуктивності, нелінійності вольт-амперних характеристик та інші. У програмному середовищі Multisim розроблено схему напівмостового інвертора з силовими MOSFET-транзисторами, керування якими виконує драйвер IR2104PBF. Показано, що на комутацію силових транзисторів суттєво впливають параметри мікросхеми драйвера, а саме величина накопичувального конденсатора драйвера, а також величина активного опору затворного резистора. Показано, що моделювання в Multisim коректно відображує перехідні процеси ввімкнення та вимкнення силових транзисторів і зворотного відновлення діодів, що дає змогу визначати динамічні втрати силових діодів і силових транзисторів.

Ключові слова: Matlab, Multisim, IGBT, MOSFET, моделювання, транзистор, втрати потужності, вольт-амперна характеристика.

Abstract. The methodology for modeling static and dynamic power losses in power IGBT and MOSFET transistors in the Matlab and Multisim software environments is given. It is shown that when modeling switching processes in power transistors, Matlab / Simulink does not allow determining the dynamic components of power losses, namely, the energy of turning on the transistor, the energy of turning off the transistor, as well as the recovery energy of power diodes. At the same time, the simulation of static power losses of power diodes and transistors in Matlab / Simulink is carried out with a significant error due to incorrect representation of the current-voltage characteristics. It is shown that for a more correct and accurate simulation of the operation of power

transistors, including power losses in power switches, it is more appropriate to conduct simulations in the Multisim software environment, which takes into account more than 47 parameters during simulation, including temperature characteristics, parasitic input and output capacitances and inductances, nonlinearities of current-voltage characteristics and others. In Multisim, a circuit of a half-bridge inverter with power MOSFETs controlled by the IR2104PBF driver has been developed. It is shown that the switching of power transistors is significantly influenced by the parameters of the driver microcircuit, namely the size of the storage capacitor of the driver, as well as the value of the active resistance of the gate resistor. It is shown that the simulation in Multisim correctly displays the transient processes of turning on and off power transistors and reverse recovery of diodes, which allows determining the dynamic losses of power transistors and power diodes.

Keywords: Matlab, Multisim, IGBT, MOSFET, simulation, transistor, power losses, volt-ampere characteristic.

Вступ. Одним з важливих напрямів дослідження напівпровідникових перетворювачів є визначення їхнього коефіцієнта корисної дії та складових втрат потужності, а також дослідження шляхів покращення енергетичної ефективності перетворювачів [1, 2].

При цьому одним із найпопулярніших інструментів при моделюванні силових напівпровідникових перетворювачів є програмне середовище Matlab. До його переваг можна віднести [3, 4]:

– універсальність, тобто можливість моделювання будь-яких силових схем, схем з малими струмами та будь-яких систем керування;

– зручний інтерфейс, що за рахунок створення блочних схем дає змогу досить просто, без знання мов програмування, створювати досить складні системи керування;

– потужний вбудований математичний апарат, що дає змогу проводити дуже багато різних видів аналізу, таких як Фур'є-аналіз, алгоритми синтезу цифрових та аналогових фільтрів, алгоритми синтезу регуляторів і т. п.

Тим не менше, при розв'язанні задачі дослідження втрат потужності в силових напівпровідникових перетворювачах базовий функціонал програмного середовища Matlab / Simulink має досить суттєві недоліки, а саме силові ключі IGBT, MOSFET, GTO у Matlab / Simulink не відображують процеси зростання та спадання напруги в часі, через це

визначення динамічних втрат потужності в силових транзисторах практично неможливе. Також слід розуміти, що динамічні втрати потужності складають більшу частину відносно статичних втрат потужності [5, 6]. При цьому вольт-амперна характеристика *n-p*-переходу силових діодів і транзисторів в Matlab / Simulink моделюється коректно.

У програмах схемотехнічного моделювання типу SPICE, таких як Multisim, LT-spice, TINA, MicroCap, моделювання вольт-амперних процесів є більш точним [7, 8]. Моделі транзисторів у SPICE-моделюванні враховують час ввімкнення та вимкнення транзисторів і динамічні втрати.

Процес моделювання статичних і динамічних втрат у силових напівпровідникових транзисторах і діодах дає змогу визначити втрати потужності для будь-яких типів напівпровідникових перетворювачів з будь-якими типами модуляції [9, 10].

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих і роботах [11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досить поширеними є програми для автоматичного розрахунку втрат потужності в силових IGBT, такі як MelcoSim, Semisel, Iposim і т. п. [13, 14]. Ці програми є досить зручним інструментом, проте вони дають змогу виконати автоматичний розрахунок втрат потужності

тільки для «стандартних» топологій (підвищувальний і знижувальний перетворювач постійної напруги, трифазний автономний інвертор напруги) зі «стандартними» алгоритмами керування (широко-імпульсна модуляція (ШІМ) з постійним коефіцієнтом заповнення, синусоїдальна ШІМ, просторово-векторна ШІМ). Недоліками існуючих програм є відсутність можливості моделювання «нестандартних» топологій, таких як силових активних фільтрів, активних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності, багаторівневих перетворювачів і багатьох інших топологій, або стандартних топологій з нестандартними алгоритмами керування [15].

У роботі [16] наведено розрахунок втрат потужності в IGBT-транзисторі та розрахунок температури ключа. Однак у цій публікації не вказано, характеристики якого конкретного транзистора враховувалися при розрахунку. Крім того, у дослідженні не вказано, як саме були враховані динамічні втрати потужності.

У роботах [17, 18] наведено методики моделювання динамічних втрат у IGBT-транзисторах. Однак наведена методика має недоліки:

- залежності енергії ввімкнення E_{on} та енергії вимкнення E_{off} від струму емітера в IGBT-транзисторі подано лінійними залежностями, хоча реально ці характеристики мають вигляд, наближений до параболи;

- відсутність урахування втрат потужності у зворотному діоді транзистора.

Отже, питання подальшого пошуку оптимального програмного середовища для підвищення точності моделювання втрат потужності у силових діодах і транзисторах є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження точності моделювання втрат потужності в силових діодах і транзисторах, використовуючи програмні середовища Matlab та Multisim, що дасть змогу більш коректно і точно визначати динамічні

складові втрат потужності, а саме енергії ввімкнення транзистора, вимкнення транзистора та відновлення силових діодів. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- порівняти можливості та інструменти моделювання у програмних середовищах Matlab та Multisim;

- визначити методологію моделювання статичних і динамічних втрат потужності в силових транзисторах і діодах;

- навести результати моделювання роботи силового транзистора.

Основна частина дослідження.
Моделювання втрат потужності силових діодів у програмному середовищі Matlab / Simulink. Силові діоди мають статичні та динамічні складові втрат потужності. Статичні втрати потужності визначаються як добуток напруги на діоді на струм, що протікає через діод [19, 20]:

$$P_{DC} = U_{VD} \cdot I_{VD}. \quad (1)$$

При цьому напруга на діоді залежить від величини струму та визначається за вольт-амперною характеристикою. Значення падіння напруги, крім струму, також залежить від величини температури діодного модуля. На рис. 1 зображено реальні вольт-амперні характеристики силового діода RM1000DC-66F і вольт-амперна характеристика, за якою відбувається моделювання роботи діода програмним середовищем Matlab / Simulink.

З рис. 1 видно, що реальні вольт-амперні характеристики є кривими лініями, які мають параболічну форму, і заміна їх прямою так чи інакше призводить до похибок у розрахунках.

Вольт-амперна характеристика силового діода в Matlab / Simulink відображується як протиелектрорушійна сила (пряме падіння напруги, стандартне значення 0,8 В). При цьому через неспівпадіння базових форм характеристик виникає зона помилки моделювання, характерна для зони малих струмів діода.

Крім статичних втрат потужності, діод має динамічні втрати потужності [21, 22],

викликані наявністю енергії зворотного відновлення діода (рис. 2).

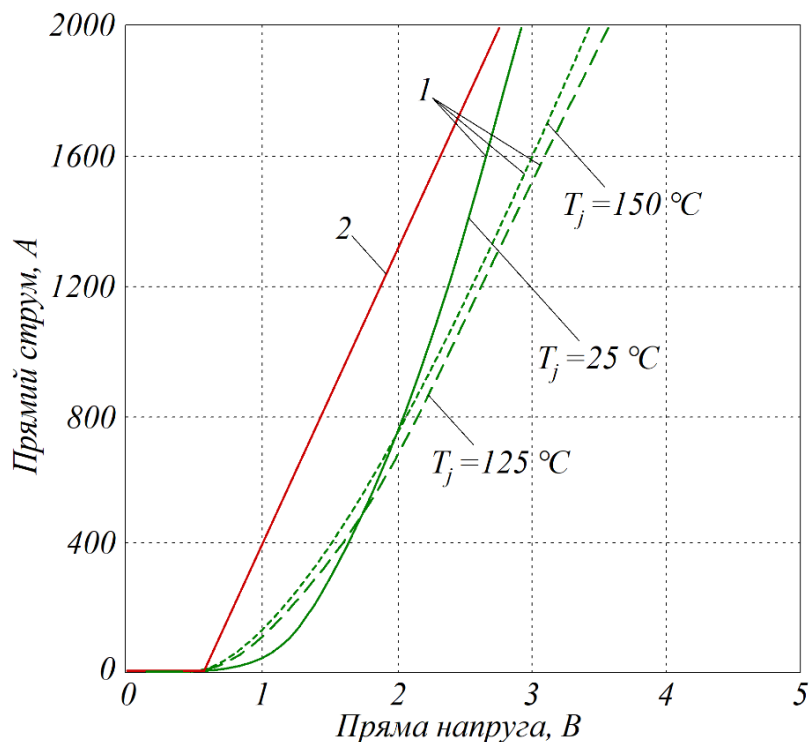


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики силового діода RM1000DC-66F з напругою 3,3 кВ та номінальним струмом 1000 А: 1 – реальні; 2 – змодельована в Matlab / Simulink

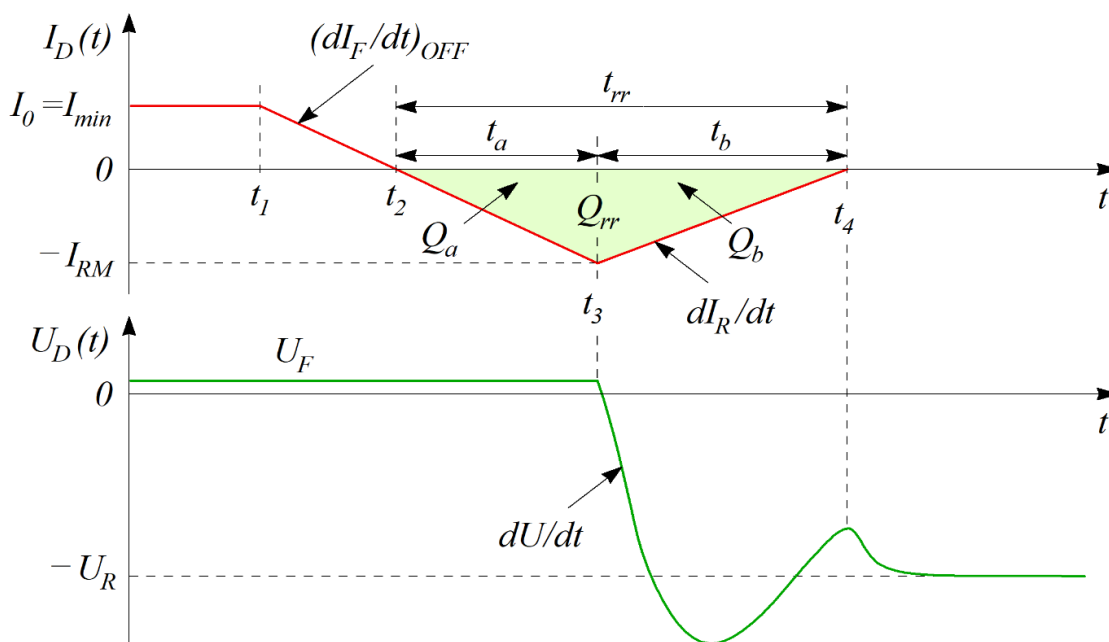


Рис. 2. Процес зворотного відновлення діода

При $t = t_1$ діод починає вимикатися, і струм зменшується з нахилом dI_F/dt , що визначається зовнішнім електричним колом. При цьому напруга на діоді залишається рівною U_F . Коли струм досягає нуля $t = t_2$, заряди, накопичені під час фази провідності, починають рекомбінувати, і напруга на діоді все ще дорівнює U_F протягом часу t_a , поки струм не досягне від'ємного значення, що позначається як I_{RM} (максимальний зворотний струм). У цей час напруга на діоді починає знижуватися, а неосновні носії – переміщуватися. Заряди продовжують переміщуватися протягом часу t_b з нахилом dI_R/dt залежно від технології діода та схеми. Протягом цього інтервалу часу (t_b) напруга коливається навколо значення зворотної напруги U_R перед стабілізацією. Після закінчення часу t_b діод можна вважати повністю вимкненим.

При цьому енергія, що розсіюється в діоді при зворотному відновленні, може бути визначена як інтеграл миттєвої потужності [23, 24]:

$$P_{rec} = \frac{1}{T_{sw}} \cdot \int_{t_1}^{t_4} U_{VD}(t) \cdot I_{VD} \cdot dt, \quad (2)$$

де T_{sw} – період в ШІМ;

t_1, t_4 – час, що відповідає інтервалам, зображеним на рис. 2.

При цьому виробники силових транзисторів наводять у документації на силові транзистори вже визначені залежності енергії відновлення від величини комутованого струму [25, 26]. Залежність енергії зворотного відновлення від комутованого струму силового діода RM1000DC-66F наведено на рис. 3.

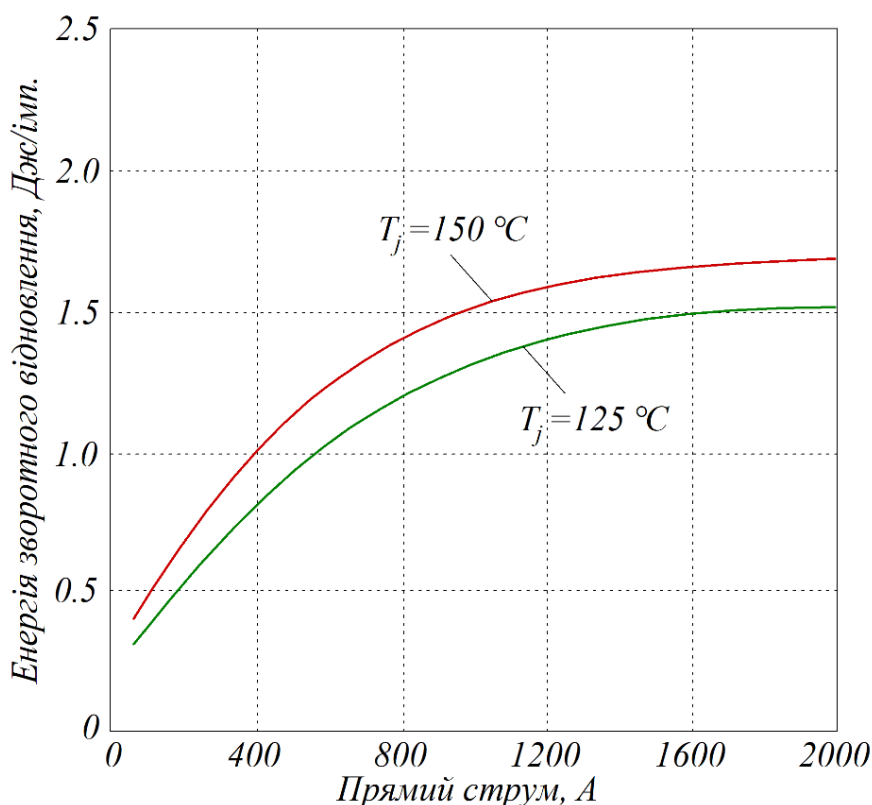


Рис. 3. Залежність енергії зворотного відновлення від комутованого струму силового діода RM1000DC-66F

Знаючи фактичне значення залежності енергії відновлення значення при ШІМ, режим роботи зі сталою частотою енергію зворотного відновлення діода може бути визначено як [27, 28]

$$P_{rec} = f_{PWM} \cdot E_{rec}, \quad (3)$$

де E_{rec} – енергія зворотного відновлення відповідно до технічних даних;

f_{PWM} – частота комутації (частота відновлення діода).

При цьому в програмному середовищі Matlab / Simulink фізичні процеси втрат потужності зворотного відновлення силових діодів не враховуються.

Вольт-амперна характеристика IGBT і зворотного діода транзистора моделюється як звичайний активний опір, що складає 0,001 Ом (рис. 4).

З рис. 4 видно, що моделювання вольт-амперних характеристик IGBT-модуля призводить до суттєвих відхилень. Крім того, моделювання силових транзисторів у Matlab / Simulink не враховує динамічні втрати потужності в транзисторах, зумовлені часом увімкнення і вимкнення транзисторів. Це пов'язано з тим, що час перемикання силових транзисторів у Matlab / Simulink складає одну мінімальну дискрету часу, налаштовану при моделюванні (рис. 5).

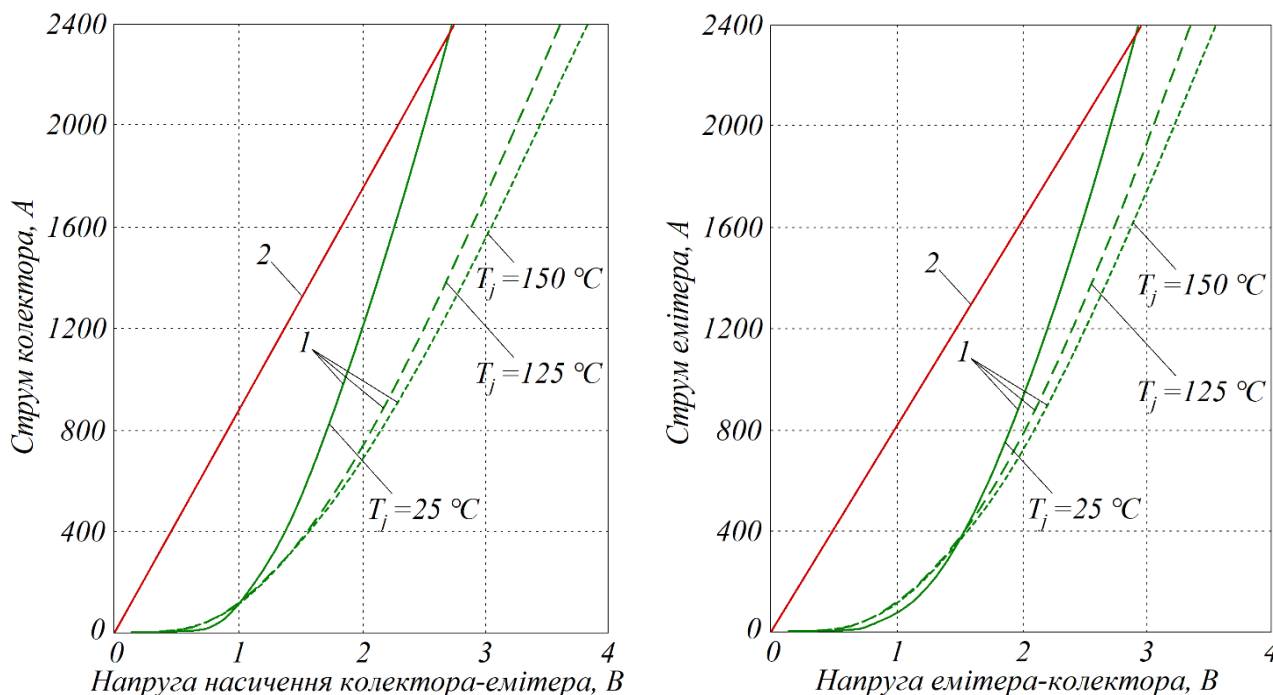


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики IGBT-транзистора та зворотного діода:
1 – реальні; 2 – змодельовані в Matlab / Simulink

За результатами моделювання (рис. 5) видно, що програмне середовище Matlab / Simulink дає змогу визначати статичні втрати потужності, проте динамічні втрати потужності цим способом не визначаються.

Моделювання статичних і динамічних втрат потужності силових транзисторів у програмному середовищі NI Multisim. Програмне середовище NI Multisim використовує схожий з програмним середовищем Matlab принцип

моделювання електричних схем, а саме створення систем диференціальних рівнянь, що описують електричну схему, і розв'язання цієї системи чисельними

методами з заданим часом дискретизації [29, 30]. Проте розрахункові моделі суттєво відрізняються, оскільки NI Multisim використовує принцип SPICE-симуляції (рис. 6).

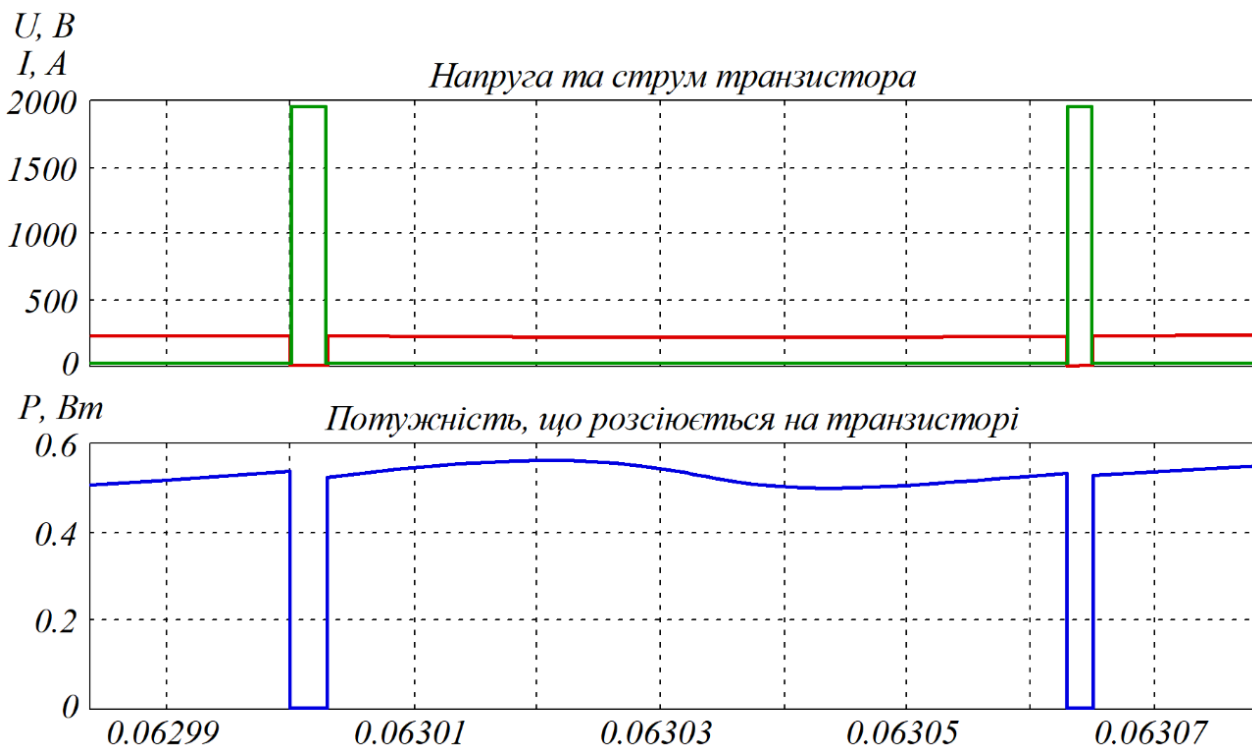


Рис. 5. Процес комутації силового IGBT-транзистора

Модель силових MOSFET- та IGBT-транзистора в NI Multisim є значно складнішою та враховує 47 параметрів транзистора (рис. 7).

Головними перевагами SPICE-симуляції силових транзисторів є врахування температурних залежностей, а також паразитних ємностей, індуктивностей, внутрішніх опорів і нелінійностей транзисторів.

При моделюванні враховувалися параметри транзистора типу IRFZ44NPbF відповідно до таблиці.

Імітаційну модель роботи силового MOSFET-транзистора, розроблену в програмному середовищі NI Multisim, наведено на рис. 8.

Результати моделювання струму та напруги силового транзистора IRFZ44N при комутації струму величиною 6 А наведено на рис. 9.

Процес зворотного відновлення діода в програмному середовищі NI Multisim наведено на рис. 10.

Згідно з моделюванням час увімкнення силового транзистора IRFZ44N склав 400 нс, а вимикання – 300 нс.

```
.SUBCKT IRFZ44N_MOS_ENH_N_1123

* Contains Proprietary Information *
* Which is The Property of *
* SYMMETRY OR ITS LICENSORS *
*Commercial Use or Resale Restricted *
* by Symmetry License Agreement *
* Model generated on Mar 7, 96
* Model format: SPICE3
* Symmetry POWER MOS Model (Version 1.0)
* External Node Designations
* Node 1 -> Drain
* Node 2 -> Gate
* Node 3 -> Source
M1 9 7 8 MM L=100u W=100u
* Default values used in MM:
* The voltage-dependent capacitances are
* not included. Other default values are:
* RS=0 RD=0 LD=0 CBD=0 CBS=0 CGBO=0
.MODEL MM NMOS LEVEL=1 IS=1e-32
+VTO=3.56214 LAMBDA=0 KP=39.3974
+CGSO=1.25255e-05 CGDO=2.2826e-07
RS 8 3 0.0133305
D1 3 1 MD
.MODEL MD D IS=9.64635e-13 RS=0.00967689 N=1.0|1377 BV=55
+IBV=10 EG=1.08658 XTI=2.9994 TT=0.0001
+CJO=1.39353e-09 VJ=0.5 M=0.42532 FC=0.5
RDS 3 1 1e+06
RD 9 1 0.0001
RG 2 7 2.20235
D2 4 5 MD1
* Default values used in MD1:
* RS=0 EG=1.11 XTI=3.0 TT=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD1 D IS=1e-32 N=50
+CJO=1.52875e-09 VJ=0.5 M=0.584414 FC=1e-08
D3 0 5 MD2
* Default values used in MD2:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD2 D IS=1e-10 N=0.408752 RS=3e-06
RL 5 10 1
FI2 7 9 VFI2 -1
VFI2 4 0 0
EV16 10 0 9 7 1
CAP 11 10 2.06741e-09
FI1 7 9 VFI1 -1
VFI1 11 6 0
RCAP 6 10 1
D4 0 6 MD3
* Default values used in MD3:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* RS=0 BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD3 D IS=1e-10 N=0.408752

< >
```

Рис. 6. SPICE-модель MOSFET типу IRFZ44NPbF

Edit Model

Model

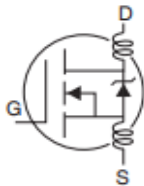
.model NMOS__TRANSISTORS_VIRTUAL__1 nmos

Tools Views

Name	Description	Value	Units	Use default
VTO	Threshold voltage	0	V	<input checked="" type="checkbox"/>
KP	Transconductance parameter	2e-5	A/V ²	<input checked="" type="checkbox"/>
GAMMA	Bulk threshold parameter	0	V ^{0.5}	<input checked="" type="checkbox"/>
PHI	Surface potential	0.6	V	<input checked="" type="checkbox"/>
LAMBDA	Channel length modulation	0	1/V	<input checked="" type="checkbox"/>
RD	Drain ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RS	Source ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RG	Gate ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RB	Bulk ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RDS	Drain source shunt resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
CBD	Bulk-drain junction capacitance	0	F	<input checked="" type="checkbox"/>
CBS	Bulk-source junction capacitance	0	F	<input checked="" type="checkbox"/>
IS	Bulk junction saturation current	1e-14	A	<input checked="" type="checkbox"/>
PB	Bulk junction potential	0.8	V	<input checked="" type="checkbox"/>
CGSO	Gate-source overlap capacitance	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
CGDO	Gate-drain overlap capacitance	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
CGBO	Gate-bulk overlap capacitance	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
RSH	Sheet resistance	0	Ω/sq.	<input checked="" type="checkbox"/>
CJ	Bottom junction capacitance per area	0	F/m ²	<input checked="" type="checkbox"/>
MJ	Bottom grading coefficient	0.5		<input checked="" type="checkbox"/>
CJSW	Side junction capacitance per area	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
MJSW	Side grading coefficient	0.33		<input checked="" type="checkbox"/>
JS	Bulk junction saturation current density	0	F/m ²	<input checked="" type="checkbox"/>
TOX	Oxide thickness	4e-9	m	<input checked="" type="checkbox"/>
LD	Lateral diffusion	0	m	<input checked="" type="checkbox"/>
U0	Surface mobility	600	cm ² /...	<input checked="" type="checkbox"/>
FC	Forward bias junction fit parameter	0.5		<input checked="" type="checkbox"/>
NSUB	Substrate doping	0	1/cm ²	<input checked="" type="checkbox"/>
TPG	Gate type	1		<input checked="" type="checkbox"/>
NSS	Surface state density	0	1/cm ²	<input checked="" type="checkbox"/>
TNOM	Parameter measurement temperature	27	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
KF	Flicker noise coefficient	0		<input checked="" type="checkbox"/>
AF	Flicker noise exponent	1		<input checked="" type="checkbox"/>
L	Length	100e-6	m	<input checked="" type="checkbox"/>
W	Width	100e-6	m	<input checked="" type="checkbox"/>
WD	Lateral diffusion (Width)	0	m	<input checked="" type="checkbox"/>
N	Bulk P-N emission coefficient	1		<input checked="" type="checkbox"/>
JSSW	Bulk P-N saturation sidewall current/le...	0	A/m	<input checked="" type="checkbox"/>
PBSW	Bulk P-N sidewall potential	0	V	<input checked="" type="checkbox"/>
TT	Bulk p-n transit time	0	sec	<input checked="" type="checkbox"/>
NLEV	Noise equation selector	2		<input checked="" type="checkbox"/>
GDSNOI	Channel shot noise coefficient (used w...	1		<input checked="" type="checkbox"/>
T_MEASURED	Parameter measurement temperature	27	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
T_ABS	Absolute temperature	27	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
T_REL_GLOBAL	Relative to current global temperature	0	°C	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 7. Перелік параметрів SPICE-моделі MOSFET-транзистора та їхні значення

Електричні характеристики транзистора типу IRFZ44N при $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Параметр	Значення			Умова
	мін.	ном.	макс.	
Напруга пробою від стоку до джерела $V_{(BR)DSS}$, В	55	–	–	$U_{GS} = 0\text{ В}, I_D = 250\text{ мкА}$
Температурний коефіцієнт напруги пробою $\Delta V_{(BR)DSS} / \Delta T_j$, В / $^\circ\text{C}$	–	0,058	–	$25\text{ }^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ мА}$
Статичний опір при ввімкненні $R_{DS(on)}$, мОм	–	–	17,5	$U_{GS} = 10\text{ В}, I_D = 25\text{ А}$
Порогова напруга затвора $V_{GS(th)}$, В	2	–	4	$U_{DS} = U_{GS}, I_D = 250\text{ мкА}$
Пряма провідність g_{fs}	19	–	–	$U_{DS} = 25\text{ В}, I_D = 25\text{ А}$
Струм витoku від стоку до джерела $I_{DSS_{25}}$, мкА	–	–	25	$U_{DS} = 55\text{ В}, U_{GS} = 0\text{ В}$
Струм витoku від стоку до джерела $I_{DSS_{250}}$, мкА	–	–	250	$U_{DS} = 44\text{ В}, U_{GS} = 0\text{ В}$
Прямий витік від затвора до джерела I_{GSS_f} , нА	–	–	100	$U_{GS} = 20\text{ В}$
Зворотний витік від затвора до джерела I_{GSS_r} , нА	–	–	–100	$U_{GS} = -20\text{ В}$
Загальний заряд затвора Q_g , нКл	–	–	63	$I_D = 25\text{ А},$ $U_{DS} = 44\text{ В},$ $U_{GS} = 10\text{ В}$
Заряд від затвора до джерела Q_{gs} , нКл	–	–	14	
Заряд від затвора до стоку Q_{gd} , нКл	–	–	23	
Час затримки ввімкнення $t_{d(on)}$, нс	–	12	–	$V_{DD} = 28\text{ В},$ $I_D = 25\text{ А},$ $R_G = 12\text{ Ом},$ $U_{GS} = 10\text{ В}$
Час підйому t_r , нс	–	60	–	
Час затримки вимкнення $t_{d(off)}$, нс	–	44	–	
Час падіння t_f , нс	–	45	–	
Внутрішня індуктивність стоку L_D , нГн	–	4,5	–	
Внутрішня індуктивність джерела L_S , нГн	–	7,5	–	
Вхідна ємність C_{iss} , пФ	–	1470	–	$U_{GS} = 0\text{ В},$ $U_{DS} = 44\text{ В},$ $f = 1\text{ МГц}$
Вихідна ємність C_{oss} , пФ	–	360	–	
Ємність зворотного перенесення C_{rss} , пФ	–	88	–	
Енергія одного імпульсу E_{AS} , мДж	–	530	150	$I_{AS} = 25\text{ А}, L = 0,47\text{ мГн}$

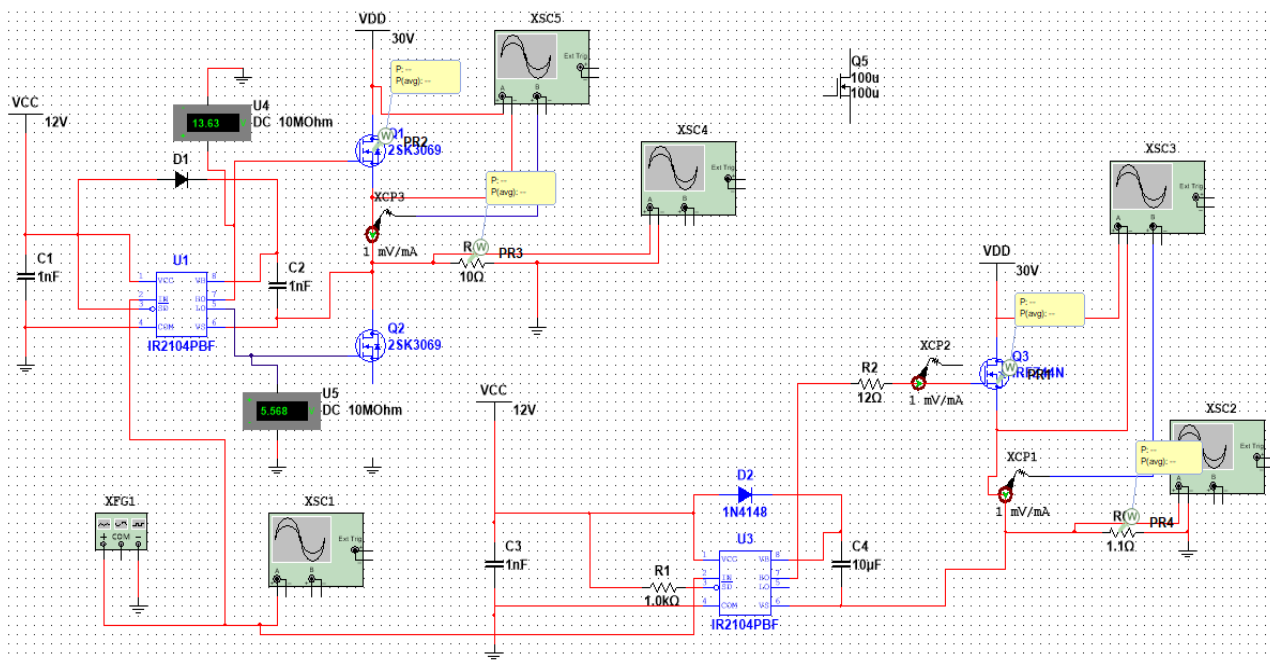


Рис. 8. Імітаційна модель силового MOSFET-транзистора при роботі з драйвером IR2104PBF

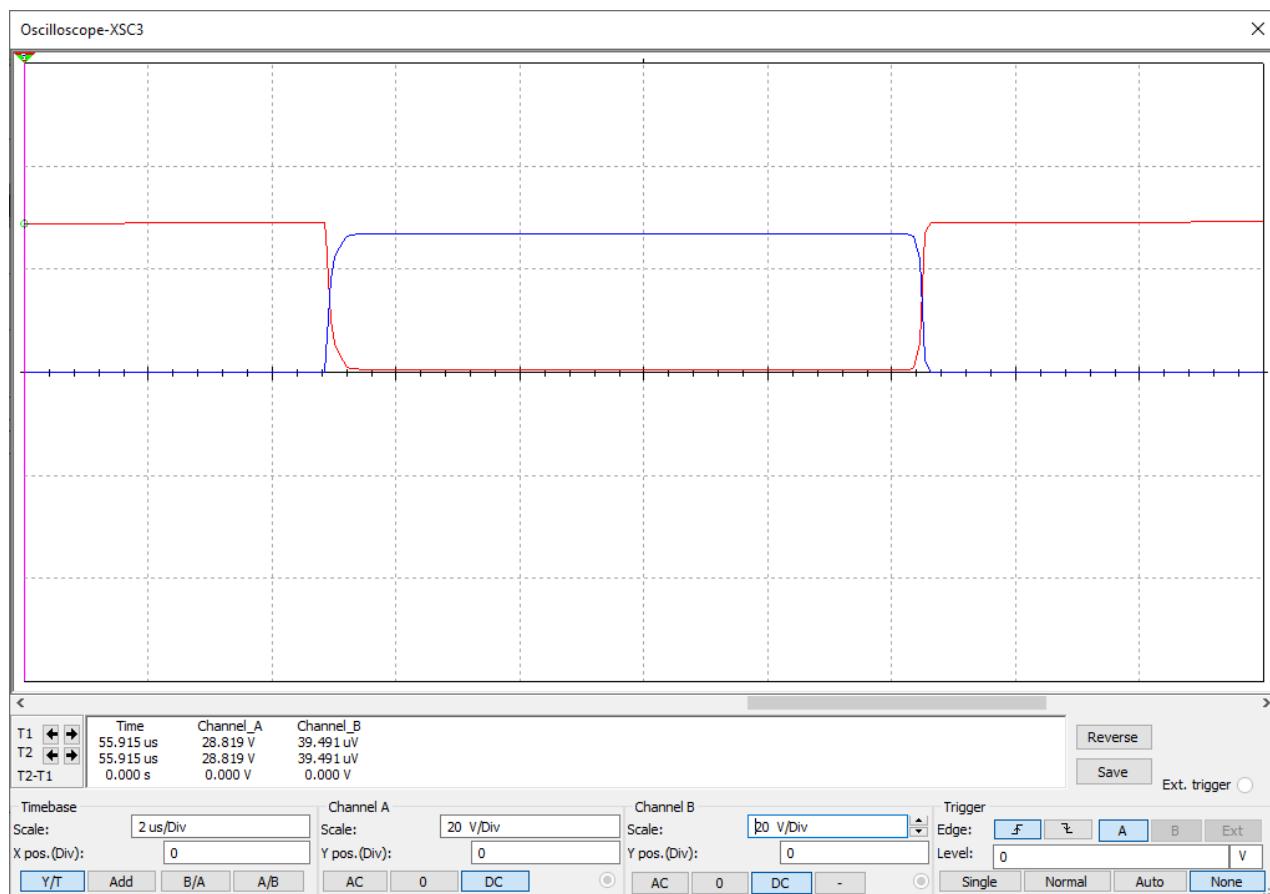


Рис. 9. Осцилограми струму та напруги силового транзистора IRFZ44N

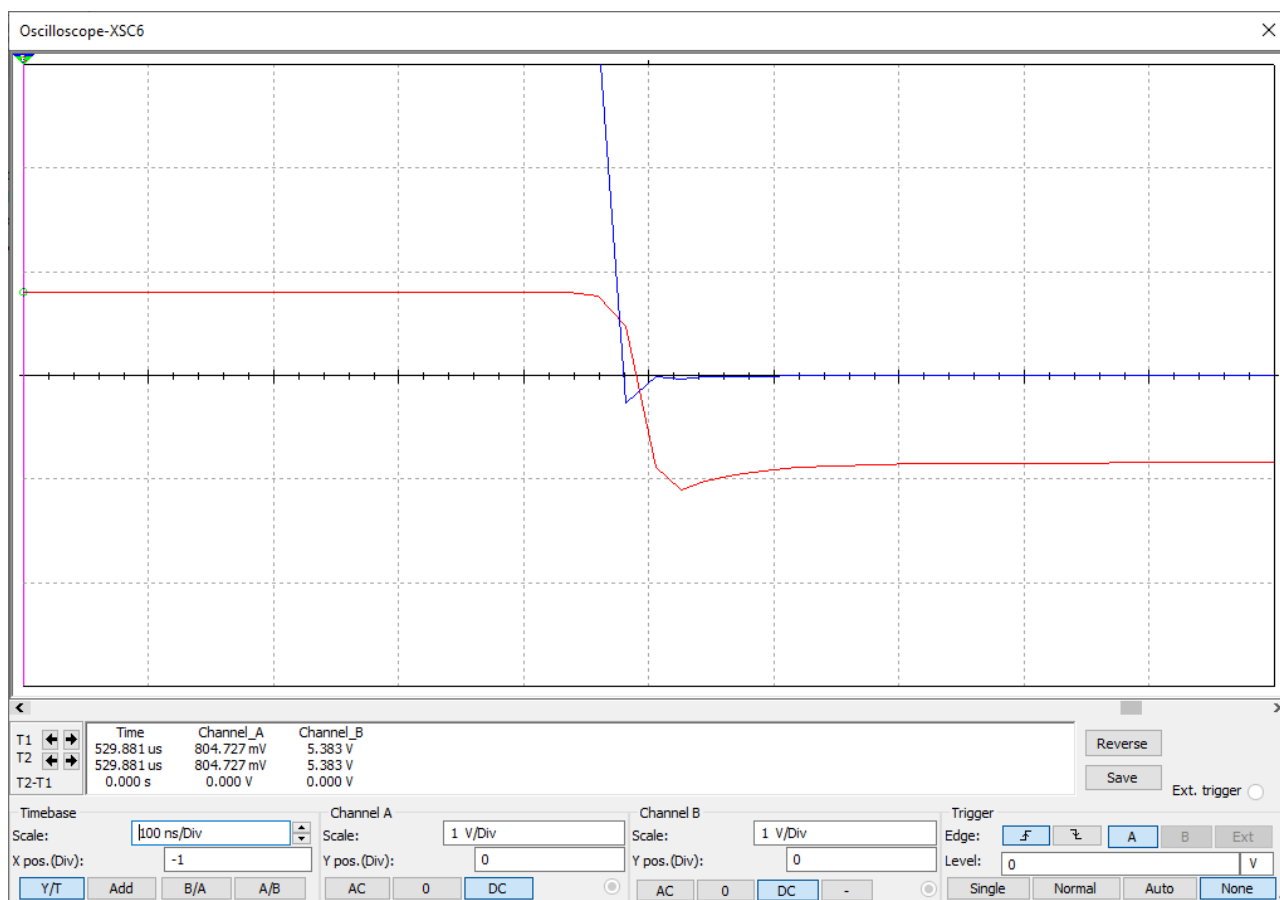


Рис. 10. Процес зворотного відновлення діода

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– проведено порівняння процесів моделювання силових транзисторів і діодів у програмних середовищах Matlab і Multisim і визначено, що Matlab / Simulink не дає змогу з високою точністю визначати динамічні втрати потужності;

– встановлено, що SPICE-моделювання дає змогу проводити симуляцію роботи силових транзисторів з

урахуванням значно більшої кількості параметрів і визначати як статичні, так і динамічні втрати потужності в силових транзисторах і діодах;

– наведені результати моделювання роботи силового транзистора підтвердили, що SPICE-моделювання дає змогу визначати вплив роботи драйвера, величини опору затвора, роботу снаберів, що впливає на час вмикання та вимикання транзистора, а також визначає динамічні втрати, що забезпечує оптимізацію величини втрат потужності.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
2. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
3. Hardan S. S., Hairik H. A., THEjeel R. Matlab/Simulink-Based Modeling of Typical Inductive Power Transfer (IPT) System. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*. 2020. P. 86–92. DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236534.
4. Srikanta K., Ray O. Development of MATLAB-based User-Interactive Tool for Inductor Design in Power Converters. *2021 National Power Electronics Conference (NPEC)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/NPEC52100.2021.9672488.
5. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.
6. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.
7. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. 2016. P. 768–773. DOI: 10.1109/icmic.2016.7804216.
8. Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2015. P. 1123–1128. DOI: 10.1109/icit.2015.7125248.
9. Tran D., Lefebvre S., Avenas Y. Discrete Power Semiconductor Losses Versus Junction Temperature Estimation Based on Thermal Impedance Curves. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 79–87. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2939617.
10. Duan Y., Iannuzzo F., Blaabjerg F. A New Lumped-Charge Modeling Method for Power Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 4. P. 3989–3996. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2938104.
11. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.
12. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of Operating Modes and Features of Integration of Renewable Energy Sources into the Electric Power System. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
13. Yang H.-C., Simanjorang R., See K. Y. A Method of Junction Temperature Estimation for SiC Power MOSFETs via Turn-on Saturation Current Measurement. *IEEJ Journal of Industry Applications*. 2019. Vol. 8. P. 306–313. DOI: 10.1541/ieejia.8.306.

14. Tuluhong A., Wang W., Li Y., Wang H., Xu L. Research on Modelling and Stability Characteristics of Electric Traffic Energy System Based on ZVS-DAB Converter. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. P. 1–10. DOI: 10.1155/2020/5450628.
15. Donuk H., Gumus B. A New Soft-Switching Control Technique and Loss Analysis for Parallel Resonant DC-Link Inverter Connected to the Grid. *Tehnicky Vjesnik-technical Gazette*. 2022. DOI: 10.17559/tv-20220105203656.
16. Pillay T., Saha A. Analysis and simulation of flying capacitor multilevel inverter using PDPWM strategy. *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*. 2017. P. 1061–1070.
17. Ahmadzadeh T., Sabahi M., Babaei M. Modified PWM control method for neutral point clamped multilevel inverters. *14th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. 2017. P. 765–768.
18. Saito W., Nishizawa S. Alternated Trench-Gate IGBT for Low Loss and Suppressing Negative Gate Capacitance. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020. Vol. 67, No. 8. P. 3285–3290. DOI: 10.1109/TED.2020.3002510.
19. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Power Loss Analysis in a SiC/IGBT Propulsion Inverter Including Blanking Time, MOSFET's Reverse Conduction and the Effect of Thermal Feedback Using a PMSM Model. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*. 2020. P. 1424–1430. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254297.
20. Josias W., Tavares G., Soares G., Almeida P., Braga H. Switching losses prediction methods oriented to power MOSFETs – a review. *IET Power Electron*. 2020. Vol. 13, Is. 14. P. 2960–2970. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.1003.
21. Kumar A., Vechalapu K., Bhattacharya S., Veliadis V., Brunt E., Grider D., Sabri S., Hull B. Effect of capacitive current on reverse recovery of body diode of 10kV SiC MOSFETs and external 10kV SiC JBS diodes. *2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. 2017. P. 208–212. DOI: 10.1109/WiPDA.2017.8170548.
22. Za'im R., Jamaludin J., Yusof Y., Abd Rahim N. High Step-Up Flyback with Low-Overshoot Voltage Stress on Secondary GaN Rectifier. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 5092. DOI: 10.3390/en15145092.
23. Xu Y., Ho C., Ghosh A., Muthumuni D. An Electrical Transient Model of IGBT-Diode Switching Cell for Power Semiconductor Loss Estimation in Electromagnetic Transient Simulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 3. P. 2979–2989. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2929113.
24. Turzynski M., Bachman S., Jasinski M., Piasecki S., Rylko M., Chiu H.-J., Kuo S.-H., Chang Y.-C. Analytical Estimation of Power Losses in a Dual Active Bridge Converter Controlled with a Single-Phase Shift Switching Scheme. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 8262. DOI: 10.3390/en15218262.
25. Luo C., Li Z., Lu T.-T., Xu J., Guo G.-P. MOSFET characterization and modeling at cryogenic temperatures. *Cryogenics*. 2019. Vol. 98. P. 12–17.
26. Pourghaderi M. A. Universality of short-channel effects on ultrascaled MOSFET performance. *IEEE Electron Device Lett*. 2018. Vol. 39, No. 2. P. 168–171.
27. Mohammadi M. R. A Lossless Turn-on Snubber for Reducing Diode Reverse Recovery Losses in Bidirectional Buck/Boost Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, No. 2. P. 1396–1399. DOI: 10.1109/TIE.2019.2901642.
28. Pulvirenti M., Sciacca A. G., Salvo L., Nania M., Scelba G., Scarcella G. Body Diode Reverse Recovery Effects on SiC MOSFET Half-Bridge Converters. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. P. 2871–2877. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9236330.

29. Yongmao C., Jiayu W., Tianyu L. Control operation circuit system design and simulation based on Multisim 13.0. *2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. 2020. P. 2331–2335. DOI: 10.1109/ICISCE50968.2020.00457.

30. Fan Y., Zhang M., Li J. Improvement of Power Factor and its Multisim Simulation. *2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. 2020. P. 766–769. DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202231.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Хоружевський Григорій Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Філіп'єва Марина Віталіївна, аспірантка кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 578-41-96.

E-mail: marifil2603@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6499-7493.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Khoruzhevskiy Hryhorii Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Philipjeva Maryna Vitaliyivna, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 578-41-96.

E-mail: marifil2603@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6499-7493.

Статтю прийнято 03.03.2023 р.

УДК 656.078.15

IMPROVEMENT OF THE INTERACTION ALGORITHM OF PARTICIPANTS DURING CUSTOMS AND LOGISTICS SERVICE OF CARGO

PhD (Econ.) O. Korobkova, PhD (Econ.) L. Pavlovska, PhD (Econ.) N. Shpak

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВЗАЄМОДІЇ УЧАСНИКІВ ПІД ЧАС МИТНО-ЛОГІСТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖІВ

Кандидати екон. наук О. М. Коробкова, Л. А. Павловська, Н. Г. Шпак

Abstract. *The scientific novelty of the obtained results lies in the substantiation of the basis participants interaction of the customs and logistics service using improvement of the regulation of customs brokerage activity, which, unlike the existing ones, reflect the economic interest of both the state and the enterprises of customs brokers. The article substantiates the model of regulation of customs brokerage activity based on the distribution of regulatory functions between State bodies and associations of customs brokers, on the basis of self-regulation, by transferring to associations of customs brokers the functions of regulation of customs brokerage activity with provision of compensation for losses through the formation of compensation funds.*

Keywords: *custom border, custom service, customs clearance, customs broker, customs brokerage activity.*

Анотація. *У сучасних умовах переміщення вантажів через митний кордон України особлива увага приділяється вдосконаленню організації діяльності підприємств, що сприяють такому переміщенню шляхом надання митних послуг. Митно-брокерська діяльність потребує спрощення ініціювання та управління, скорочення дозвільних і погоджувальних процедур, зменшення адміністративного тиску з боку Державної митної служби України.*

Це питання набуває особливої актуальності у зв'язку з вимогами міжнародних організацій щодо імплементації норм міжнародних договорів у національне законодавство, адаптації зарубіжного досвіду регулювання митно-брокерської діяльності в Україні. Митно-брокерська діяльність є дуже важливою у здійсненні митних формальностей при переміщенні товарів і транспортних засобів через митний кордон України.

Формування пропозиції здійснення митно-брокерської діяльності може стати передумовою підвищення якості та швидкості виконання митних формальностей на кордоні, сприятиме залученню нових вантажопотоків, ефективності посередницької сфери зовнішньоекономічної діяльності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні основ взаємодії учасників митної та логістичної служби з використанням вдосконалення регулювання митно-брокерської діяльності, які, на відміну від існуючих, відображують економічні інтереси як держави, так і підприємств, митних брокерів. У статті обґрунтовується модель регулювання митно-брокерської діяльності на основі розподілу функцій регулювання між державними органами та об'єднаннями митних брокерів, на засадах саморегулювання, шляхом передачі об'єднанням митних брокерів функцій регулювання митно-брокерської діяльності з забезпеченням відшкодування збитків шляхом формування компенсаційних фондів.

Ключові слова: митний кордон, митне обслуговування, митне оформлення, митний брокер, митно-брокерська діяльність.

Introduction. The selection of the most efficient customs service provider can considerably improve the return on investment on Customs Management Services as it will lead to higher administrative efficiency and reduce the shipping, handling, haulage, warehousing, and staff costs.

In the conditions of the introduced martial law in Ukraine, special attention is being paid to the modernization of the system business structures, among which an important place is occupied by customs brokers who ensure the unhindered movement of goods and vehicles across the customs border of Ukraine. Today, the intermediary activities of customs brokers need to simplify their activities, reduce the permitting and approval procedures, and reduce the administrative influence of state authorities.

The topic of the study acquires special relevance in connection with the requirements of international organizations regarding the implementation of the norms of international agreements into national legislation, adaptation of foreign experience in the regulation of customs brokerage activities in Ukraine. Customs broker activity is very important in carrying out customs procedures regarding goods and vehicles moving across the customs border of Ukraine.

Formation of methods of regulation of customs brokerage activity can become a prerequisite for improving the quality and speed of customs formalities when moving goods across the customs border of Ukraine, which will contribute to the attraction of new cargo flows and the realization of Ukraine's transit potential.

Literature review and problem statement. In some parts of the world, customs brokers have been offering advice and providing services to importers and exporters for hundreds of years. In some other regions, the customs broker is a nascent profession. And in yet other countries, the customs broker does not exist as a unique service provider leaving

others to fill the knowledge gap as part of a broader service option. Where there are customs brokers, there has been a tendency to organise and work together to better understand the customs function, enhance the services offered to importers and exporters and ultimately, improve the environment in which international trade is conducted within that country. In the late 1980s, several of those countries with longstanding customs broker communities began exploring how they could collaborate to their mutual benefit and that of their clients [1].

Self-administration in the sphere of servicing is a significant instrument for service quality improvement, development of economic activity, increase of level of service consumers' protection and rights, provision of effective interaction between subjects of economic activity and public authorities, creation of institutional environment for further authorization of organizations of professional self-administration for functions of public and legal management, decrease of State Budget expenses for regulation of economic activity, more effective protection of rights of subjects of economic activity violated by state authorities [2].

Researchers generally have viewed nonmarket regulation of firm behavior as synonymous with direct regulation by the government [2].

However, it should be noticed that these organizations can also exist in other branches of entrepreneurship, although the mentioned term is not used by the legislation of the said countries in relation to them.

Foreign economic literature uses the term «self-regulation» for cases when a subject of economic activity imposes certain restrictions on itself without any external pressure thereto. It must be said that there is special authority – Ombudsman, which may be either unipersonal or collegial and aims at realization of this

function in the countries where self-regulatory organizations have existed for a long time [3].

The issues of self-regulation were investigated by: O. Bakalinska, O. Belyanevych, O. Vinnik, V. Makhinchuk, S. Solodchenko and others. However, this issue remains relevant, despite the new search accents. The issue of forming the structure of logistics chains was studied in scientific works by T. Vorkut, O. Bakaeva, M. Belousova, V. Sergeeva but the process of interaction with customs authorities during execution they did not consider foreign trade transactions.

The aim and objectives of the study – modeling of the process of interaction of the participants of the customs and logistics service during the movement of cargo through the customs border of Ukraine.

In accordance with the objectives of the study, the following tasks were solved: prove the expediency of introducing the distribution of functions of regulating customs brokerage activity between state customs authorities and professional associations of customs brokers, by transferring indirect functions of regulating customs brokerage activity to them, prove the need to create a compensation fund for the implementation of compensation payments to consumers of customs brokerage services.

Results. In many countries, the use of customs brokers is mandatory to facilitate the process of import, export and transit, and to assist traders in ensuring compliance. However, practice shows that – apart from the high cost of their service – customs brokers are often part of vested interest groups, presenting obstacles rather than facilitating trade. The approach to state regulation of entrepreneurship as a certain system will allow to outline those aspects of interaction between the state and business sectors that ensure its highest efficiency.

Lack of an appropriate national regulatory and administrative framework that can facilitate the clearance of goods without the use of customs brokers is a major challenge. In the absence of an electronic system, the trader may find the process of clearing goods particularly cumbersome without the assistance of customs brokers.

The mindset of customs authorities can also be a key challenge. Over time, customs brokers have become part of the port ‘ecosystem’ and customs staff may be more comfortable working with professional customs brokers.

Another challenge may be the inability of governments to identify transparent and objective criteria for the approving permit of customs brokers activity in Ukraine.

An enabling regulatory and administrative framework which encourages a mindset change among government authorities, especially customs officials, is a key factor which will determine successful implementation.

The adoption of automated risk management, post-clearance audits will also contribute to success, fostering a transparent disclosure of information while, at the same time, allowing traders to manage procedural formalities.

Self-regulation is regarded as regulation of specific markets and spheres of business by economic agents themselves, without interference from the state. That is why western economic literature often refers to self-regulation as to independent administrative power [4]. Other foreign scientists consider that self-regulatory organizations (hereinafter – SRO) are an institute, which regulates interrelations of entrepreneurs, state and customers. Establishment of SRO will allow state authorities considerably to decrease expenses for regulation of activity in a number of branches on account of cancellation of licensing and certification, which in the end should lead to downsizing of government machine and decrease of corruption. Business-community will get the opportunity by themselves to determine effective ways to use funds accumulated in SRO and assigned for self-regulation aims [5].

Self-regulation’s relative efficiency increases with uncertainty over institutional implementation, populism, and political polarization. Inefficient regulation occurs more frequently than inefficient self-regulation. Case

studies examine legal origin's effect on regime choice and compare Progressive regulation to New Deal self-regulation [6].

To realize the concept of «self» in self-regulation, SROs should encourage market participants and their professional associations to contribute to the development of industry best practices and standards. It is common for SROs to work with the industry to develop appropriate codes of conduct, and where appropriate, ensure compliance with these codes. From a government oversight perspective, government should consider applying general performance standards to SROs to ensure that they have the flexibility they need to develop appropriate rules of conduct and compliance and enforcement programs through their direct interaction with industry participants. This approach is more cost effective both for the SRO and the government regulator. It also has the benefit of contributing to a strong compliance culture within the firms that participate in the development of industry best practices and standards.

Industry financing should be a major source of an SRO's overall funding thereby reducing the amount of government funding needed to support the regulatory framework for customs-broker markets.

They can also modify them quickly to respond to market changes. Given the procedural requirements imposed on agencies, a government regulator's response may lag behind market changes. Self-regulation generally imposes fewer costs than government regulation.

Thus, the more enterprises enter self-regulatory organization, the harder it is or them to agree. The scheme of acquiring competitive advantages may also turn out ineffective [7].

Self-regulation can result in substantial cost savings to the government because those regulatory costs are largely shifted to the regulated industry. Properly implemented and monitored, a program of self-regulation will effectively advance the statutory objectives consistent with the public interest and the

interests of the regulated entities at a lower cost than statutory regulation. Incorporating self-regulation into the regulatory regime should diminish the need for tax dollar financing, provided that SROs and government regulators cooperate and coordinate with one another to avoid duplicating activities [9].

Model of regulation of customs broker activity is adoption of the Law of Ukraine «On self-regulatory organizations» and Decree «On self-regulatory organizations of professional participants of the market of customs broker services».

We offer to identify subjects' model of customs broker activity regulation: State Fiscal Service of Ukraine and self-regulatory organizations, and at the same time to exclude the State Border Service of Ukraine from subjects of regulation of customs broker activity.

Organizational method of regulation of customs broker activity (instructions, provisions that permit, forbid, restrict, normalize customs broker activity), unlike the currently operating regulation, needs to be delegated to professional associations of customs brokers, which are self-regulatory in their activity [2]. Although SROs are private organizations, they are still subject to government-imposed regulation to a degree.

However, the government does delegate some aspects of the industry oversight to self-regulatory organizations. The ability of an SRO to exercise regulatory authority does not stem from a grant of power from the government. Instead, SROs often accomplish control through internal mechanisms that regulate the flow of business operations. The authority may also come from an external agreement between like businesses. The purpose of these organizations is to govern from within while avoiding ties to a country's governance.

Effective activity of customs brokers on the ground of self-regulation is impossible without resource allocation, that is why there appears the need to create compensation fund that will cover payments for refunding of losses

inflicted by members of self-regulatory professional association.

Compensation fund covers payments for refunding of losses inflicted by members of professional association of customs brokers, which are self-regulatory in their activity, to consumers and other subjects of customs broker activity. Model of customs broker regulation (fig. 1) is represented as a system of interaction of organizational, economic and legal methods, principles and instruments in the sphere of state regulation and self-regulation of customs broker activity [2].

The losses inflicted by members of professional association of customs brokers, activity of which is self-regulatory, to consumers and other subjects of customs broker activity first include reduction of income to the State Budget of Ukraine as a result of failure to pay fines in case if an enterprise-customs

broker is brought to administrative liability for violation of customs rules (only upon effective court decision). Coverage of expenses, associated with functioning of professional association of customs brokers and regulation of customs broker activity, is to be carried out from the established compensation fund. Compensation fund of customs broker association, which is self-regulatory in its activity, is formed in cash on account of contributions of members of such an organization. A bank that has license for carrying out professional activity on securities market – depository activity of custodian – may manage the compensation fund of a self-regulatory organization. Custodian expenses are paid on account of income from utilization of property of compensation fund passed to the management [2].

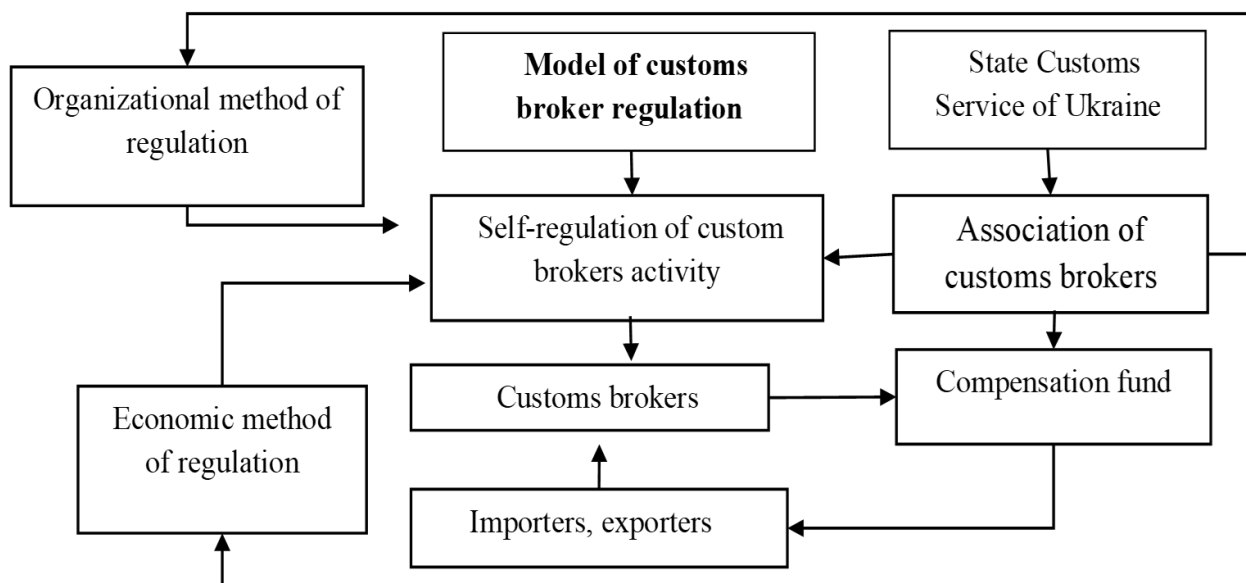


Fig. 1. Model of regulation for the Customs Broker activity

Risks of using the mechanism of self-regulation in customs broker activity should also be mentioned. The first reason is associated with limitation of number of members of self-regulatory organization and expressing of monopoly on the market of customs broker services.

Thus, removal of negative consequences of functioning of monopolies on the market of customs broker services should be attributed to obligatory functions of state regulation, which consists in: stimulation of competition development, use of regulation methods that are

capable to restrict monopoly state of enterprises-customs brokers.

So, model of customs broker activity regulation will promote supports the establishment of transparent, accountable, and consistent regulation. It is our conviction that failure to do so will negatively affect the customs process and the customs brokerage community, as well as the many thousands of importers and exporters who depend on a high standard of services from their customs brokers.

As enhanced trade facilitation and refined Customs risk management strategies make possible the opportunity for common Customs frameworks and modernization efforts, such as regional Single Window initiatives, it is critical to educate both the public and private sector on the benefits available through active support and participation. Only through such awareness can we hope to succeed in bringing together the myriad political, operational and legal innovations necessary to capitalize on this opportunity.

Trade compliance and trade facilitation success are more likely to be enhanced when Customs brokers, multinational traders, Customs administrations, and participating government agencies have a strategic framework for these initiatives to take hold. Professional Customs brokers have a unique perspective given their broad exposure to all parties engaged in the supply chain, their operational experience, and their exposure to various systems and tools to manage Customs declaration complexity in multiple countries.

Similarly time-consuming manual processing systems, over-regulation, or outright corruption will discourage trade and investment and further undermine a country's development. «In the worst cases», up to 20 signatures are required to obtain customs clearance of goods.

When modeling the supply chains of foreign trade goods, one of the tasks is to determine the need to attract a sufficient number of intermediaries to provide services. This issue concerns both the services of forwarders and customs brokers providing a range of services for customs clearance of goods.

An error made when declaring goods and vehicles moving across the customs border may be perceived by the customs authority as an unreliable declaration, which will entail additional costs associated with the demurrage of goods in the customs control zone, payment of fines for violations of customs rules.

The need to use the services of customs intermediaries in the supply chain of foreign trade goods, in our opinion, is dictated by the complexity of declaring goods, the number of operations performed with the goods and, at the same time, the desire to optimize the overall logistics costs in the final price of the goods.

In our opinion, the most complete algorithm for choosing a customs intermediary is shown in the second fig. 2.

So, establishing (recognizing) a brokers' association at the national/regional level, which can provide support to their members while assisting Customs administrations with the fulfilment of their regulatory responsibilities can also provide valuable training, capacity building, and an oversight framework which, given the limited resources some administrations may have, might add to the overall capacity of brokers. However, Customs administrations should support Customs brokers, including through brokers' associations, by informing/educating them about the regulations and requirements, including, where appropriate, those of other government agencies.

The proposed algorithm allows subjects of foreign trade to choose a reliable customs broker by means of forming the appropriate request and sending it to the Association of Customs Brokers, which provides a certificate of the quality of the provision of customs brokerage services. The algorithm for choosing a customs broker is built taking into account the previously introduced proposals for improving the regulation of customs broker activity.

Conclusions. The study presents a theoretical generalization and a new solution to an important scientific task, which is manifested in the development and justification of theoretical provisions and methodological

approaches to the organizational conditions of the regulation of customs brokerage activity. The work developed a model regulation of customs brokerage activity, which consists in balance of interests of all its participants and reflects the aggregate interest of both the state and business entities in accordance with international requirements, the principle of deregulation of the state's influence on the customs services market.

Propose complete algorithm for choosing a customs intermediary for need to use the services of customs intermediaries in the supply chain of foreign trade goods, in our opinion, is dictated by the complexity of declaring goods, the number of operations performed with the goods and, at the same time, the desire to optimize the overall logistics costs in the final price of the goods.

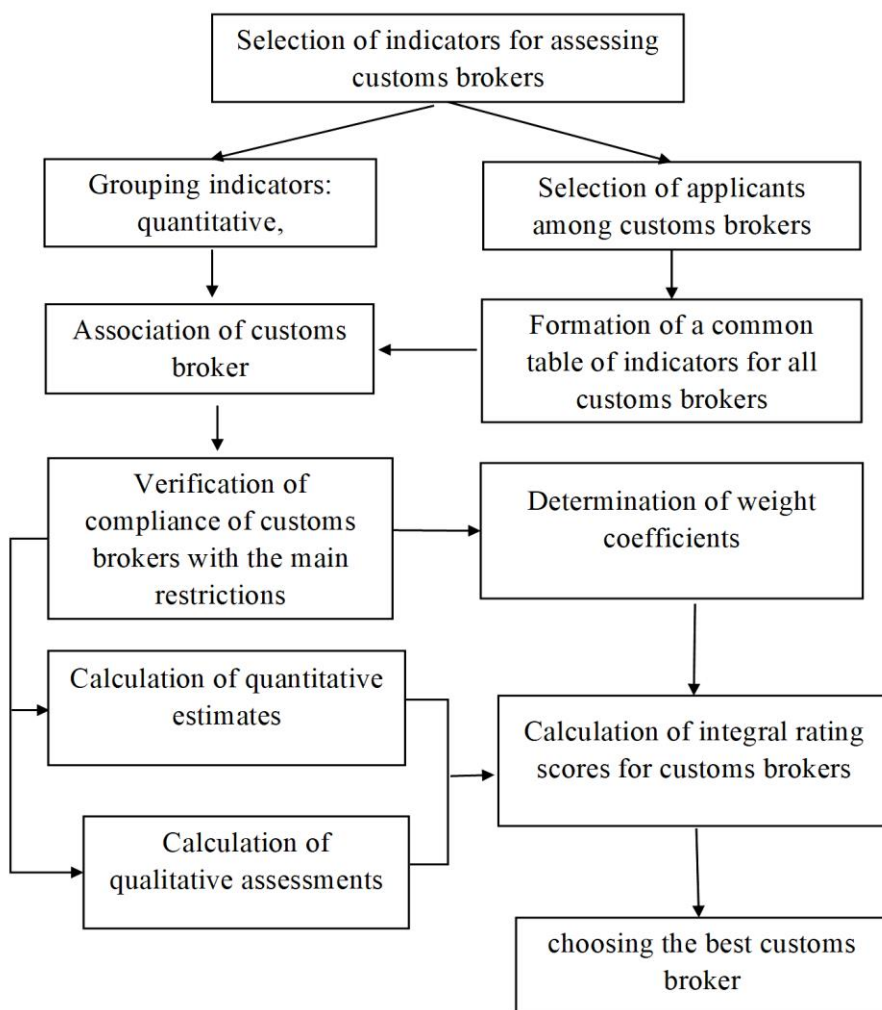


Fig 2. Algorithm for choosing a custom broker

Reference

1. Best practices model for licensing customs brokers (2020). Carol West. World Customs Journal. Vol. 4. No. 1 / International Network of Customs Universities. URL: [https://worldcustomsjournal.org/Archives/Volume%204%2C%20Number%201%20\(Mar%202010\)/09%20West.pdf.225-1?inline=1](https://worldcustomsjournal.org/Archives/Volume%204%2C%20Number%201%20(Mar%202010)/09%20West.pdf.225-1?inline=1).

2. Development of Scientific Schools of Odessa National Maritime University: collectivemonograph / I. L. Andronov, V. V. Breus, L. S. Kudashkina, V. P. Samoilovska, O. M. Korobkova, O. M. Borshevskaya, O. M. Ivanova, R. P. Shevchenko, S. M., other. Bondarevich Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing». 2020. P. 437-442. URL: <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/download/67/1446/3225-1?inline=1>.

3. Industry Self-Regulation: An Economic, Organizational, and Political Analysis Anil K. Gupta and Lawrence J. Lad/ The Academy of Management Review Vol. 8, No. 3 (Jul., 1983). P. 416-425. URL: <https://www.jstor.org/stable/257830/>.

4. Myhasyyk I., Melnyk A., Krupka M., Zaloga Z. (2000). State regulation of economy [Derzhavne rehulyuvannya ekonomiky: Pidruchnyk]. Kyiv: Atika, [in Ukrainian].

5. Polishchuk Ye. A., Shevchenko V. P. (2014). Self-regulatory organizations as component of development concept of nonbank financial institutions [Samorehulivni orhanizatsiyi yak skladova kontseptsiyi rozvytku nebankiv'skykh finansovykh ustanov]. No. 35. P. 187–195 [in Ukrainian].

6. Allocating lawmaking powers: Self-regulation vs government regulation (2007). Peter Murrell. Journal of Comparative Economics. Vol. 35, Is. 3. P. 520-545.

7. Interparliamentary Assembly of CIS Member Nations (2007) Model act on self-regulatory organization: Decree of Interparliamentary Assembly of CIS Member Nations no. 29-7 as of 31.10.2007.

8. Report of the SRO Consultative Committee of the International Organization of Securities Commissions (2020): Model for effective regulation. URL: <https://www.iosco.org/library/pubdocs/pdf/IOSCOPD110.pdf>.

Korobkova Olena Mykolaivna, Ph.D, Associate Professor of Department «Exploitation of Ports and Cargo Operation Technologies», Odessa National Maritime University, ORCID ID: orcid.org/0000-0003-2279-5820.

Tel.: +38677561070, (+13855074221). E-mail: korobkova0123456789@gmail.com.

Pavlovska Liudmyla Anatolievna/ Ph.D, Professor ONMU, Professor of Department «Exploitation of Ports and Cargo Operation Technologies», Odessa National Maritime University. ORCID ID: orcid.org/0000-0002-6856-7316. Tel.: +380679073095. E-mail: licy74@gmail.com.

Shpak Natalia Grigorievna Ph.D, Associate Professor of Department «Exploitation of Ports and Cargo Operation Technologies», Odessa National Maritime University, ORCID ID: orcid.org/0000-0002-3765-1099.

Tel.: +380672804856. E-mail: umitan2302@gmail.com.

Коробкова Олена Миколаївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID ID: orcid.org/0000-0003-2279-5820.

Тел.: +38(67)756-10-70, (+1(385)507-42-21). E-mail: korobkova0123456789@gmail.com.

Павловська Людмила Анатоліївна, кандидат економічних наук, доцент, професор кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID ID: orcid.org/0000-0002-6856-7316. Тел.: +38(067) 907-30-95. E-mail: licy74@gmail.com.

Шпак Наталія Григорівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID ID: [0000-0002-3765-1099](https://orcid.org/0000-0002-3765-1099).

Тел.: +38(067) -30-95. E-mail: umitan2302@gmail.com.

Статтю прийнято 22.03.2023 р.

УДК 656.6:629.067

КОНЦЕПЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Кандидати техн. наук О. М. Мельник, О. М. Шумило, д-р техн. наук О. А. Онищенко, кандидати екон. наук Ю. В. Михайлова, Т. С. Обнявко, доц. Т. О. Коробко

CONCEPT AND PROSPECTS FOR THE USE OF HYDROGEN FUEL IN MARITIME TRANSPORT

PhD (Tech.) O. Melnyk, O. Shumylo, Sc. D. (Tech) O. Onishchenko, PhD (Econ) Iu. Mikhailova, T. Obniavko, Assoc. Prof. T. Korobko

***Анотація.** Судноплавна галузь є значним джерелом глобальних викидів парникових газів, тому пошук стійких і низьковуглецевих альтернативних видів палива має вирішальне значення для зменшення її впливу на навколишнє середовище. Водень стає перспективним видом палива для судноплавної галузі завдяки своїй високій енергетичній щільності, нульовим викидам і можливості виробництва з відновлюваних джерел. Однак використання водню як палива в суднопластві потребує значного розвитку інфраструктури і технологічного прогресу у виробництві, зберіганні та транспортуванні водню. Крім того, вартість і доступність водневого палива залишаються основними бар'єрами на шляху його широкого впровадження в суднопластві. Незважаючи на ці виклики, потенційні переваги використання водню як сталого палива для суднопластва роблять його сферою зростаючого інтересу та інвестицій. Водневе паливо дедалі стає багатообіцяльною альтернативою традиційному викопному паливу для суден. Це чисте і поновлюване джерело енергії, яке виробляє лише водяну пару як побічний продукт, що робить його бажаним рішенням для скорочення викидів парникових газів і пом'якшення наслідків зміни клімату. Шість відсотків світового природного газу і два відсотки вугілля наразі йде на виробництво водню. Водень можна використовувати як паливо з нульовими викидами, але при цьому виробництво самого газу не є низьковуглецевим процесом, якщо для його виробництва використовується викопне паливо. Тим не менш, на думку експертів, водень – це паливне рішення для суднопластва. Вже сьогодні провідні науковці та досвідчені фахівці у сфері експлуатації та проектування суден закликають до більш широкого використання водню як палива, що в кінцевому підсумку допоможе морській індустрії досягти своєї мети щодо скорочення викидів за рахунок використання невикопних видів палива. У цій статті досліджується потенціал водневого палива для суден включаючи його переваги, виклики та поточний стан.*

***Ключові слова:** альтернативні палива, екологічна безпека, міжнародне суднопластво, виробництво водню, оптимізація судових двигунів, електрохімічний процес, суднова електроенергетика.*

***Abstract.** The shipping industry is a significant source of global greenhouse gas emissions, so finding sustainable and low-carbon alternative fuels is crucial to reduce its environmental impact. Hydrogen is emerging as a promising fuel for shipping due to its high energy density, zero emissions, and the possibility of production from renewable sources. However, the use of hydrogen as a fuel in shipping requires significant infrastructure development and technological advances in hydrogen production, storage and transportation. In addition, the cost and availability of hydrogen fuel remain*

the main barriers to its widespread adoption in shipping. Despite these challenges, the potential benefits of using hydrogen as an environmentally friendly fuel for shipping make it an area of growing interest and investment. Hydrogen fuel is increasingly becoming a promising alternative to traditional fossil fuels for ships. It is a clean and renewable energy source that produces only water vapor as a byproduct, making it a desirable solution for reducing greenhouse gas emissions and mitigating climate change. Six percent of the world's natural gas and two percent of coal are currently used to produce hydrogen. Hydrogen can be used as a zero-emission fuel, but the production of the gas itself is not a low-carbon process if fossil fuels are used to produce it. Nevertheless, experts believe that hydrogen is a fuel solution for shipping. Even today, leading scientists and experienced ship operation and design professionals are calling for the wider use of hydrogen as a fuel, which will ultimately help the maritime industry achieve its goal of reducing emissions through the use of non-fossil fuels. This article explores the potential of hydrogen fuel for ships, including its benefits, challenges and current status.

Keywords: *alternative fuels, environmental safety, international shipping, hydrogen production, marine engine optimization, electrochemical process, marine energy.*

Вступ. Судноплавство є одним з найбільших джерел глобальних викидів парникових газів, на його частку припадає приблизно 2,9 % загального обсягу викидів. Міжнародна морська організація (ІМО) поставила перед собою амбітні цілі щодо скорочення цих викидів, включаючи ціль скоротити викиди парникових газів від судноплавства щонайменше на 50 % до 2050 року. На морський транспорт припадає близько 11 % світового споживання палива, або близько 10 мільйонів барелів на добу. Важливим фактом є те, що в нинішній ситуації конкуренції між альтернативними видами палива морські судна значною мірою задають тренд на користь того чи іншого виду палива. Значні обсяги споживання палива морським транспортом виправдовують масове виробництво продуктів нафтопереробки, будівництво паливних баз та інфраструктури в цілому, задаючи курс на певний вид палива і роблячи ставку на нього в інших сегментах ринку. Так, після заборони використання флотського мазуту з 2024 року залишиться тільки дизельне паливо. Це дає можливість для морської транспортної галузі переглянути свою позицію у скорочений термін до цієї дати і зробити більш активні кроки для адаптації до нових стандартів, у тому числі в контексті розгляду альтернативних варіантів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Водень є одним з альтернативних видів палива, що досліджуються для використання в судноплавстві. Як паливо, водень має ряд переваг перед традиційними викопними видами палива, такими як дизельне паливо і мазут. Однією з головних переваг є те, що при спалюванні водню утворюється лише вода як побічний продукт, що робить його чистим паливом без викидів. Однак використання водню як палива в судноплавстві пов'язане з певними труднощами. Однією з найбільших проблем є зберігання і транспортування водню, який необхідно стискати або зріджувати для зберігання на борту судна. Для цього потрібне спеціалізоване обладнання та інфраструктура, які наразі є обмеженими. Ще одна проблема – вартість виробництва водню, яка все ще залишається відносно високою порівняно з традиційними видами палива. Однак очікується, що з удосконаленням технології виробництва і зберігання водню та зростанням попиту на екологічно чисту енергію вартість водню знижуватиметься.

Так, у роботі [1] досліджено конкурентоспроможність альтернативних видів морського палива в новій нормативній базі. Морське паливо майбутнього і вплив альтернативних видів палива на оптимальну

економічну швидкість великих контейнеровозів вивчено в роботі [2]. Наукова праця [3] пропонує оцінювання викидів парникових газів протягом життєвого циклу при використанні альтернативного морського палива на прикладі нафтового танкера (VLCC). У статті [4] з'ясовано причини одностороннього скасування непрямих субсидій на морське паливо. Досягнення в галузі досліджень альтернативного морського палива і майбутні тенденції та застосування альтернативної морської електроенергії (АМЕС) у круїзних портах пропонується в роботах [5, 6]. Прогалини в знаннях про морські гібридні електростанції на паливних елементах та альтернативні види палива і роль холодного прасування у викидах морського транспорту висвітлено в роботах [7, 8]; використання альтернативних видів палива для морської декарбонізації з урахуванням особливостей морських екологічних ризиків і рішень, з точки зору міжнародного права, – роботі [9]; забезпечення безпеки судноплавства в аспекті зменшення впливу на довкілля, технічні та експлуатаційні заходи щодо зменшення викидів парникових газів і підвищення екологічної та енергетичної ефективності суден – роботах [10, 11]. Принципи застосування двигунів на водні на суднах змішаного плавання та інші проблеми портової інфраструктури та безпеки судноплавства розглянуто в роботах [12, 13]. У роботі [14] проаналізовано застосування двигунів на водні на суднах змішаного плавання. Переваги та існуючий досвід розвитку «розумних портів» розглянуто в роботі [15]; оптимізацію розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності – роботі [16].

Отже, незважаючи на всі перераховані виклики, уже існують приклади суден, що використовують водень як паливо. Загалом, хоча водень і є перспективним альтернативним паливом для судноплавства, все ще існує низка

технологічних, логістичних та економічних проблем, які необхідно вирішити, перш ніж його можна буде широко впроваджувати як основне паливо.

Мета та завдання дослідження.

Метою статті є дослідження потенціалу використання водневого палива як альтернативи традиційним викопним видам палива в морській галузі. У статті розглянуто поточний стан галузі, виклики та можливості, пов'язані з використанням водневого палива, а також потенційні вигоди від впровадження цього альтернативного джерела енергії.

Основна частина дослідження.

Безумовно, для прийняття рішення щодо вибору пріоритетного виду палива для міжнародного судноплавства необхідні більш точні та ґрунтовні дослідження з оцінювання екологічного сліду від використання альтернативних видів палива, починаючи від видобутку сировини і закінчуючи викидами в навколишнє середовище. Окремим питанням є оцінювання наслідків розливів альтернативних видів палива, що потребує проведення лабораторних та експериментальних досліджень розливів, особливо при низьких температурах, високих швидкостях вітру тощо. Додатковий інтерес становить ступінь довгострокового впливу сумішей альтернативних видів палива на водне середовище. Екологічні проблеми і зростаючі ціни на паливо ведуть до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства. Альтернатив не так багато. При цьому законодавство вже визначилося з умовами використання ЗПГ (зрідженого природного газу), за ним ідуть метанол і біопаливо.

На думку експертів, небагато часу займе розроблення IGF Code для ЗПГ і водню. Для того щоб відповідати вимогам до 2050 року, необхідно буде не тільки перевести флот на інший, екологічний, вид палива, а й розробити нові технології для зниження викидів парникових газів в

атмосферу з суден. Водневе паливо також стало потенційним рішенням для досягнення цих цілей, втім його

впровадження не позбавлене проблем. Повний цикл виробництва відновлюваного водню подано на рис. 1.



Рис. 1. Виробництво відновлюваного водню (джерело Renewable Hydrogen)

Однією з головних переваг водневого палива є його нульовий профіль викидів. При спалюванні водню єдиним побічним продуктом є водяна пара, що робить його чистим і відновлюваним джерелом енергії. Крім того, водневе паливо має високу щільність енергії, що означає, що воно може забезпечити більше енергії на одиницю ваги, ніж традиційні викопні види палива. Це може призвести до створення менших і більш ефективних систем суднових двигунів. H_2 – більш ніж ще один цікавий варіант альтернативного суднового палива, який активно розглядається для використання на судах. Водень або скраплюють (криогенна рідина має температуру $-240\text{ }^\circ\text{C}$) і поміщають у компресійні резервуари, або зберігають у вигляді хімічної сполуки. Нині H_2 отримують із природного газу, а також шляхом електролізу. Останній можна проводити на сонячних і вітряних електростанціях одночасно з виробленням

електроенергії. Вироблений з поновлюваних джерел енергії, водень стає одним з найчистіших видів палива, як зазначено, з нульовими викидами парникових газів. Найбільш ефективним генератором енергії для водню є паливні елементи. Як виробництво водню, так і паливних елементів добре розвинене, але вони, як і раніше, залишаються неконкурентоспроможними за ціною порівняно зі звичайними судновими двигунами.

Існує кілька поточних проєктів та ініціатив, що досліджують використання водневого палива на судах. У 2020 році у Франції було спущено на воду перше у світі судно на водневих паливних елементах, а кілька інших країн, включаючи Японію, Норвегію та Південну Корею, вже досить активно інвестують у технологію використання водневого палива для судноплавства. Однак широке впровадження водневого палива на судах

все ще перебуває на ранніх стадіях і потребує подальшого технологічного прогресу та розвитку інфраструктури.

Потенційно водень може масово використовуватися як паливо для суден. Стверджується, що значне зниження витрат на виробництво водню з нульовим вмістом вуглецю очікується в найближчі 10-15 років завдяки розвитку глобальної водневої економіки. Однак пряме використання водню на крупнотоннажних суднах – у

двигунах внутрішнього згоряння або паливних елементах у поєднанні з електричними двигунами – створює проблеми, пов'язані з його низькою об'ємною щільністю. Для тривалого рейсу зберігання водню потребуватиме занадто великого фізичного об'єму. Використання водневого палива на суднах можна досягти за допомогою циклу з виробництва, зберігання, паливних елементів та власне руху (рис. 2).

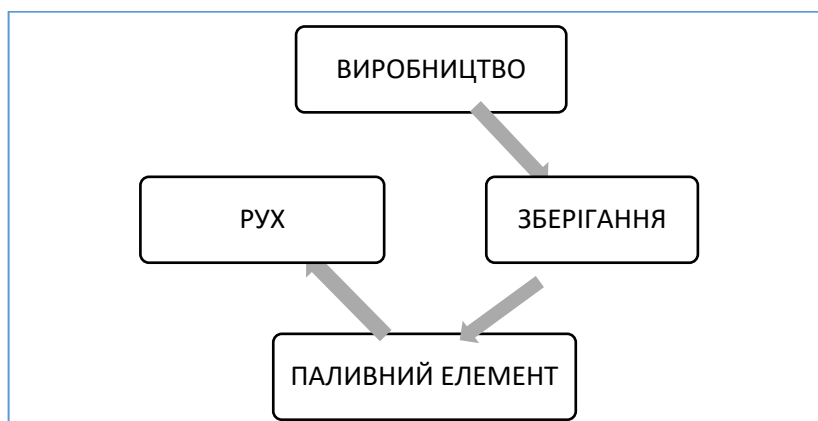


Рис. 2. Цикл використання водню на суднах

Водень можна виробляти різними методами, окрім електролізу: шляхом парового риформінгу природного газу або газифікацією біомаси. Водень зберігається на судні в резервуарах високого тиску, криогенних резервуарах або у вигляді металогідридів. Накопичений водень подається в паливний елемент, який перетворює хімічну енергію водню в електричну за допомогою електрохімічного процесу. Електрична енергія, вироблена паливним елементом, використовується для живлення суднового електродвигуна, що рухає судно вперед. Система зберігання водню здійснюється в балонах високого тиску (40-футовий контейнер із балонами 25 МПа містить 794 кг водню, 40-футовий контейнер із балонами 50 МПа містить 1050 кг водню). У скрапленому вигляді при температурі -252 °С в об'ємі 40-футового

контейнера міститься близько 2478 кг водню за допомогою LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier, рідкі органічні носії водню) – це органічні сполуки, що можуть поглинати й виділяти водень у результаті хімічних реакцій. З 1 м³ LOHC можна отримати 57 кг водню. В об'ємі 40-футового контейнера можна розмістити близько 3200 кг водню, а з огляду на необхідність зберігати «розряджену» рідину – близько 1600 кг водню.

Формула оптимізації суднового двигуна, що використовує водень, буде залежати від різних факторів, таких як тип і розмір судна, конкретна конструкція водневого двигуна, умови експлуатації та цілі продуктивності. Загальна формула, яку можна використовувати як відправну точку,

$$P = (r Q_e) / \gamma, \quad (1)$$

де P – масові витрати водню, кількість водневого палива, що споживається двигуном за одиницю часу, кг/с;

r – вища теплота згоряння водню або кількість теплової енергії, що виділяється при повному згорянні однієї одиниці водню, МДж/кг;

Q_B – коефіцієнт корисної дії двигуна: відсоток енергії палива, який перетворюється двигуном на корисну роботу;

γ – питома вага водню, тобто густина газоподібного водню відносно повітря.

Одним з найважливіших факторів оптимізації роботи судна, що використовує водень як паливо, є максимізація ефективності головного двигуна. Цього можна досягти різними методами, включаючи оптимізацію системи впорскування палива, регулювання моменту запалювання і модифікацію конструкції камери згоряння. Прикладом може служити формула оптимізації роботи двигуна судна, що використовує водень,

$$\eta = [(P_{in} - P_{out})/P_{in}] \times Q_{in}/H_{H_2}, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії двигуна;

P_{in} – споживана потужність, кВт;

P_{out} – вихідна потужність, кВт;

Q_{in} – витрати водневого палива, кг/год;

H_{H_2} – теплота згоряння водню, МДж/кг.

Формула враховує споживану і вихідну потужності двигуна, а також витрати водневого палива і теплоту згоряння водню. Різниця між споживаною та вихідною потужністю ділиться на споживану потужність, щоб визначити ККД двигуна. Витрати водневого палива помножуються на теплоту згоряння водню, щоб визначити енергію, споживану двигуном.

Для подальшої оптимізації роботи двигуна можна враховувати додаткові фактори, такі як співвідношення повітря і палива, ступінь стиснення та швидкість

рециркуляції вихлопних газів. Ретельно налаштувавши ці фактори, можна досягти максимально можливої ефективності від двигуна і мінімізувати споживання палива, викиди та інші впливи на навколишнє середовище. За допомогою поданої формули можна розрахувати вихідну потужність водневого двигуна, яка потім може бути використана для оптимізації конструкції і роботи суднового двигуна і судна в цілому. Для досягнення найкращої продуктивності та ефективності необхідно також урахувати інші фактори, такі як тип і розмір гребного гвинта, конструкцію корпусу та умови експлуатації.

Водень є найбільш екологічним видом палива, яке виробляється з відновлюваної енергії. Рідкий водень може бути використаний у майбутньому, однак у нього досить низький показник об'ємної енергетичної щільності, що призводить до необхідності створення великих місць зберігання.

Стандарт Tier III стосується обмеження викидів оксидів азоту (NOx) для суден, які працюють на ЗПГ або водні, з метою зниження впливу судноплавства на довкілля. Для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, встановлені обмеження викидів NOx на рівні 3,4 г/кВт·год. Для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, необхідно використовувати різні технології для зниження викидів NOx, такі як використання каталітичного конвертора, системи рециркуляції вихлопних газів, високотемпературних систем згоряння та інші.

Тому для досягнення стандарту Tier III для двигунів внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, необхідно використовувати багато різних технологій для зниження викидів NOx, що можуть зробити ці двигуни менш шкідливими для довкілля. Що стосується викидів азоту, то для відповідності

стандарту Tier III двигуни внутрішнього згоряння з циклом Отто, що працюють на ЗПГ або водні, не потребують обладнання для очищення вихлопних газів. У більшості випадків для відповідності стандарту не прийнятні двопаливні двигуни, що працюють за дизельним циклом. Аналітичні дані щодо рівню викидів азоту при використанні різних видів палива подано на рис. 3.

Насправді вартість впровадження альтернативних палив на судна не є головним критерієм при виборі тієї чи іншої

технології, саме вартість палива зумовлює такий вибір. Вона залежить від кількох факторів, які іноді важко передбачувати. За даними джерел, найнижча ціна спостерігається на HFO (флотський мазут), і з нею може конкурувати лише ЗПГ. Ціна на метанол, вироблений з натурального газу, вища, ніж на ЗПГ. Біопаливо виробляється з біомаси і традиційно дорожче за нафту марки Brent. Ці види палива в майбутньому, найімовірніше, зможуть конкурувати з MGO (дизельне паливо).

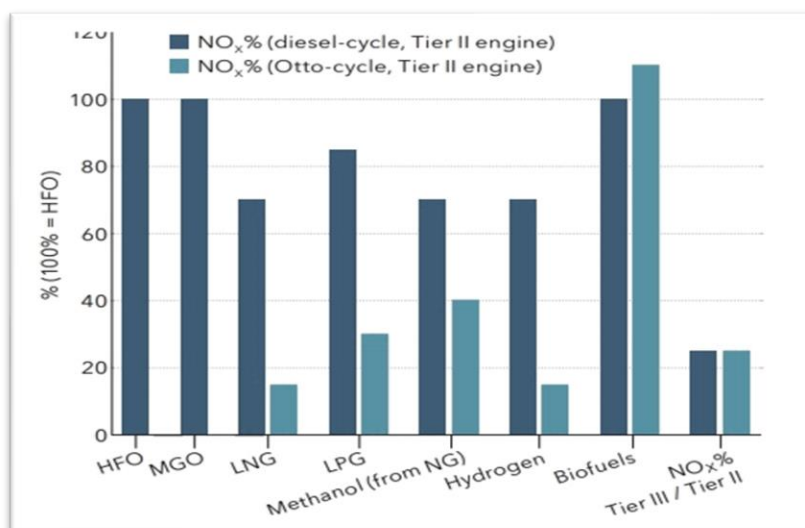


Рис. 3. Рівень викидів азоту при використанні різних видів палива (джерело DNV GL)

Що стосується водню, то він тут не розглядається, оскільки є набагато дорожчим за інші види палива. Він абсолютно неконкурентоспроможний на ринку за ціною, тому шанс у нього отримати поширення з'явиться тільки за умови значних субсидій або високих податків на звичайне паливо.

Безумовно, використання альтернативних палив дасть змогу забезпечити судновласникам стійкість транспортних операцій у довгостроковому періоді в частині забруднення атмосфери. Наслідки розливів нових видів палив, зокрема нафтових низькосірчистих,

недостатньо добре вивчені, однак для кліматичних умов наслідки забруднення морських вод від розливів є ключовим фактором. Використання дистильованих палив призведе до негайного зростання операційних витрат, а встановлення скрубера може бути неправильною інвестицією при введенні заборони на використання залишкових палив, і інвестиції в обладнання не встигнуть окупитися. Ще більші ризики в судновласників виникають під час будівництва нових суден, що потребують високих капітальних вкладень. За сукупністю властивостей у нафти і

нафтопродуктів нема конкурентів на світовому ринку, але регулярні інформаційні вкидання, що запаси нафти вичерпуються, і зростаючі вимоги стимулюють спроби шукати заміну нафти як палива і сировини.

Незважаючи на переваги водневого палива, існує також ряд проблем, які необхідно вирішити для його впровадження на судах. Однією з головних проблем є висока вартість виробництва та зберігання водню. Хоча технологічний прогрес знижує витрати, він все ще дорожчий за традиційні викопні види палива. Крім того, водень є легкозаймистим і вимагає особливого поводження та заходів безпеки, що робить його потенційною загрозою для безпеки на борту суден. Втім водневі дизельні двигуни можуть бути розроблені на базі стандартних судових середньооборотних судових дизельних двигунів або модернізовані для роботи на водні, тому, спираючись на такі дані, можна зазначити, що застосування водню як палива на судах, з технічного погляду, зовсім не віддалена перспектива, а цілком реалізована дія.

Висновки. Водневе паливо має потенціал відігравати значну роль у скороченні викидів парникових газів від судноплавства, але його впровадження не

позбавлене викликів. Хоча технологія все ще перебуває на ранніх стадіях розвитку, поточні ініціативи та проекти прокладають шлях до більш чистого і сталого майбутнього судноплавства. За умови продовження досліджень і розробок водневе паливо може стати основним рішенням для скорочення викидів і пом'якшення наслідків зміни клімату в судноплавній галузі. Використання водню як палива на судах має потенціал для скорочення викидів парникових газів і поліпшення якості повітря, що робить його привабливим варіантом для судноплавної галузі. Однак все ще існують проблеми, які необхідно подолати, включаючи вартість виробництва і зберігання, а також обмежену інфраструктуру для бункрування суден воднем. У статті обговорено екологічні переваги використання водневого палива, включаючи потенціал для значного скорочення викидів парникових газів і поліпшення якості повітря. Також досліджуються технічні виклики, пов'язані з використанням водневого палива, такі як потреба в інфраструктурі зберігання та розподілу, а також потенційні витрати та економічні наслідки переходу на таке альтернативне джерело енергії.

Список використаних джерел

1. Solakivi Tomi & Paimander Alekski & Ojala Lauri (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 113. 103500. 10.1016/j.trd.2022.103500.
2. Kouzelis Konstantinos & Frouws Koos & van Hassel Edwin (2022). Maritime fuels of the future: what is the impact of alternative fuels on the optimal economic speed of large container vessels. *Journal of Shipping and Trade*. 7. 10.1186/s41072-022-00124-7.
3. Huang Jinjin & Fan Hongjun & Xu Xiangyang & Liu Zheyu (2022). Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment for Using Alternative Marine Fuels: A Very Large Crude Carrier (VLCC) Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10. 1969. 10.3390/jmse10121969.
4. Heine Dirk & GGde Susanne & Dominioni Goran. (2014). Unilaterally Removing Indirect Subsidies for Maritime Fuel. *SSRN Electronic Journal*. 10.2139/ssrn.2512747.
5. Md Moshiul Alam & Mohammad Roslina & Hira Fariha & Maarop Nurazean (2022). Alternative Marine Fuel Research Advances and Future Trends: A Bibliometric Knowledge Mapping Approach. *Sustainability*. 14. 10.3390/su14094947.

6. Pekşen Duygu & Alkan Güler (2018). Application of Alternative Maritime Power (AMP) Supply to Cruise Port. *Journal of ETA Maritime Science*. 6. 307-318. 10.5505/jems.2018.15870.
7. Benet Álvaro & Villalba-Herreros Antonio & d'Amore-Domenech Rafael & Leo T.J. (2022). Knowledge gaps in fuel cell-based maritime hybrid power plants and alternative fuels. *Journal of Power Sources*. 548. 232066. 10.1016/j.jpowsour.2022.232066.
8. Barberi Salvatore & Campisi Tiziana & Neduzha Larysa (2022). The role of cold ironing in maritime transport emissions. *AIP Conference Proceedings*. 2611. 060013. 10.1063/5.0119881.
9. Wang Qiuwen & Zhang Hu & Huang Jiabei & Zhang Pengfei (2023). The use of alternative fuels for maritime decarbonization: Special marine environmental risks and solutions from an international law perspective. *Frontiers in Marine Science*. 9. 10.3389/fmars.2022.1082453.
10. Melnyk O., Onyshchenko S. Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. *ISEM 2021, LNNS 463*. 2022. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9.
11. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
12. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Kalinichenko Y., Rossomakha O., Naleva G., Rossomakha O. Autonomous Ships Concept and Mathematical Models Application in their Steering Process Control. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 553-559. doi:10.12716/1001.16.03.18.
13. Melnyk O. Onyshchenko S. Navigational safety assessment based on Markov-model approach. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2022. 36 (2). P. 328-337. <https://doi.org/10.31217/p.36.2.16>.
14. Застосування двигунів на водні на судах змішаного плавання можливе вже в найближчому майбутньому. *Portnews*. URL: <https://portnews.ru/news/308409/> (дата звернення 15.03.23).
15. Reshetkov D. M. & Bondaryuk M. A. & Onyshchenko S. P. (2023). Essence, advantages and existing experience of the smart ports development. *Transport development*. 2023. 4(15). P. 108-122. doi:10.33082/td.2022.4-15.09.
16. Shumylo O. M. Optimization of passenger vessels dimensional modernization taking into account the energy efficiency. Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Transport development*. 2023. 4(15). P. 58-77. doi:10.33082/td.2022.4-15.06.
17. Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства / О. М. Мельник, О. А. Онищенко, А. О. Волошин та ін. *Розвиток транспорту*. 2022. № 3 (14). С. 179-191. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>.

Мельник Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Онищенко Олег Анатольович, доктор технічних наук, професор кафедри технічної експлуатації флоту, Національний університет «Одеська морська академія», Україна. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Шумило Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0003-0574-1951.

Михайлова Юлія Валеріївна, кандидат економічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0002-4882-7803.

Коробко Тетяна Олександрівна, доцент кафедри українознавства, історико-правових та мовних дисциплін, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0009-0000-1588-2163.

Обнявко Тетяна Севастіанівна, кандидат економічних наук, доцент кафедри тилового забезпечення, Військова академія, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0002-2192-6377.

Melnyk Oleksiy Mykolayovych, PhD (Eng.), Assoc. Prof. at Navigation and Maritime Safety Dept., Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Onishchenko Oleg Anatliyovych, Dr. of Science (Eng.), Professor at Technical Fleet Operation Dept., National University «Odesa Maritime Academy», Ukraine. ORCID: 0000-0003-3749-4908.

Shumylo Oleksandr Mykolayovych, PhD, Professor of the Ship Power Plants and Technical Operation Department, Odesa National Maritime University, Ukraine. ORCID: 0000-0003-0574-1951.

Mykhailova Iuliia Valeriiivna, PhD (Econ.), Assoc. Prof. of the Department of Fleet Operation and Shipping Technology, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-4882-7803.

Korobko Tetiana Oleksandrovna, Assoc. Prof. of the Department of Ukrainian Studies, Historical, Legal and language disciplines, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0009-0000-1588-2163.

Obniavko Tetiana Sevostianovna, PhD (Econ.), Assoc. Prof. of the Department of Logistics Military Academy, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0002-2192-6377.

Статтю прийнято 24.03.2023 р.

УДК 656.223:502.5

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ВАНТАЖНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЯК БАГАТОЕТАПНОЇ ТА БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, канд. техн. наук Г. О. Примаченко

FORMALIZATION OF MULTIMODAL TRUCK TRANSPORTATION AS A MULTI-STAGE AND MULTI-OBJECTIVE TRANSPORT PROBLEM

Dr. Sc. (Tech.) D. Lomotko, PhD (Tech.) H. Prymachenko

Анотація. У статті розглянуто транспортну модель витрат на перевезення на мультимодальних маршрутах переміщення вантажів, що залежать від часу в дорозі, бо саме такий підхід до оптимізації мультимодальних перевезень вантажів у сучасних умовах має покликання до їхнього розвитку на транспортному ринку України та світу. Розроблену в роботі модель можна вважати достатньо універсальною за своєю структурою, що залежить від особливостей виконаних вантажних операцій із окремими типами вантажу з прибуття або відправлення.

Ключові слова: вантажні перевезення, мультимодальні перевезення, оператор мультимодального перевезення, багатоетапна транспортна задача.

Abstract. The article examines the transport model of costs for transportation on multimodal routes for the movement of goods, depending on the time in transit, because this approach to the optimization of multimodal transportation of goods in modern conditions is called for their development in the transport market of Ukraine and the world. The analysis of the latest research

and publications showed that the process of transportation under the control of a multimodal transportation operator is not considered, the use of this approach in the interaction of modes of transport is not taken into account, that the goal of synchromodal optimization is to determine a synchronized uninterrupted transportation system, and this study was developed for this purpose. In order to set the problem, a research principle scheme was formed, which includes a set of sources of material flows, a set of points of movement of material flows, a set of destination points of material flows and a set of multimodal transportation routes. According to the central limit theorem, taking into account a large number of transport units, customers of multimodal transportation services and consignees, the distribution of the sum of independent identically distributed random variables converges to the normal distribution law. The implementation of the developed model in the conditions of the organization of multimodal routes on the territory of Ukraine with the participation of railway transport showed that for the averaged initial data it is possible to obtain an optimal solution for optimizing the costs of moving transport loads and optimizing the time spent on the multimodal route. The developed model can be considered quite universal in its structure, while only the parameters of the model will change, which depends on the specifics of the performed cargo operations with individual types of cargo upon arrival or departure.

Keywords: freight transportation, multimodal transportation, multimodal transportation operator, multi-stage transportation task.

Вступ. Завдання оптимізації використовують у багатьох сферах діяльності, а транспорт є важливою галуззю, що потребує постійної оптимізації, особливо в умовах воєнного стану. Для ефективного управління процесом перевезень підприємствами транспорту активно застосовується апарат математичного програмування, у тому числі методи лінійного програмування. При цьому виникає питання обліку параметричної невизначеності моделей процесів здійснення перевезень. Деякі фактори транспортування вантажів, такі як попит, вартість ресурсів, заробітна плата персоналу тощо, змінюються незалежно від самого підприємства транспорту. В умовах варіації параметрів середовища доводиться приймати рішення, подаючи ці параметри як випадкові величини. Для цього застосовується апарат стохастичного програмування [1]. Рішення, прийняте в подібних умовах, не завжди є оптимальним, що спричиняє збитки, тому використовується оцінка області ймовірнісної стійкості рішення. У статті авторами розглянуто транспортну модель витрат на перевезення на мультимодальних маршрутах переміщення вантажів, що

залежать від часу в дорозі (час на переміщення, перевантаження і т. д.), тому час на мультимодальному маршруті є стохастичною величиною, що залежить від довжини маршруту – детермінованої величини при плануванні маршруту руху, отже, сам час у русі – детермінована величина, і швидкості руху – стохастичної величини, але є середні швидкості руху на дільницях, тому при моделюванні прийнято середні значення швидкостей руху на дільницях, і сама величина швидкості стає детермінованою величиною. Отже, саме такий підхід до оптимізації мультимодальних перевезень вантажів у сучасних умовах має покликання до їхнього розвитку на транспортному ринку України та світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [2] розглянута проблематика щодо оптимальної організації руху різних видів транспорту в системі контейнерних мультимодальних перевезень на основі оцінювання таких параметрів, як час, вартість і якість перевезення вантажу, але не враховано стохастичні параметри часу на очікування на кожному з етапів перевезення. Для того щоб описати оптимальну організацію завдання, авторами розроблено модель, заснована на

динамічному програмуванні, запропоновано алгоритм програмування для отримання оптимальної стратегії поєднання видів транспорту, але не розглянуто процес перевезення під контролем оператора мультимодального перевезення.

У ході виконання роботи [3] було проаналізовано модель класичної транспортної задачі для дослідження найбільш популярних методів оптимізації перевезень, доведено актуальність цього дослідження та обґрунтовано мету вдосконалення математичної моделі транспортної задачі, сформовано критерії ефективності для розроблення опорного плану перевезень за рахунок введення нових обмежень на завантаженість і якість покриття доріг, але не враховано використання такого підходу при взаємодії видів транспорту.

Основними відмінностями і перевагами багатоетапної та багатоцільової транспортної задачі порівняно з класичною, за роботою [4], є специфіка математичних моделей, що дає можливість розробити простіший і більш точний метод розв'язування, а за роботою [5], дає змогу застосовувати основні методи розв'язування транспортних задач в умовах невизначеності, методи побудови початкових опорних планів збалансованих транспортних задач, враховувати особливості застосування сучасних методів стохастичного програмування до розв'язування транспортних задач з різними пропусковими спроможностями комунікацій.

У праці [6] зазначається, що метою синхромодальної оптимізації є визначення синхронізованої безперебійної транспортної системи, де оператори спільно обмінюються інформацією, а технології дають змогу перемикаєти модальності на основі поточного стану мережі, що динамічно оновлюється на ходу, хоча це ідеалістичне бачення далеке від нинішньої ситуації транспортування кількома способами, мета полягає в тому, щоб отримати оптимізовану

та повністю синхронізовану систему, а саме для цього і розроблено це дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є пошук шляхів оптимізації плану перевезення вантажів на мультимодальних маршрутах за допомогою математичного апарату розв'язання транспортної задачі.

Завдання дослідження:

- провести аналіз видів транспортних задач;
- проаналізувати елементи і показники мультимодальних перевезень;
- визначити залежності між показниками мультимодального перевезення;
- сформулювати стохастичну модель мультимодальних вантажних перевезень і оцінити її за теоретичними та емпіричними даними.

Основна частина дослідження. Для постановки задачі сформовано принципову схему дослідження, що включає множини джерел матеріальних потоків (замовників послуги мультимодального перевезення), пунктів переміщення матеріальних потоків (проміжні пункти, мультимодальні термінали і т. п.), пунктів призначення матеріальних потоків (вантажоотримувачів) і маршрутів мультимодального перевезення (рис. 1).

За теорією математичного апарату, для розв'язання транспортної задачі часто використовують одноетапні транспортні задачі як класику для вирішення питань доставки матеріальних потоків від власників до отримувачів вантажу. У багатоетапних транспортних задачах вантаж від постачальників спочатку надходить на проміжні пункти (вузли транспортної мережі, розподільчі центри, склади і т. п.), де за потреби він перевантажується або ж розвантажується та певний час зберігається [8]. Тобто для мультимодальних маршрутів вантаж буде переміщуватися від замовника послуги мультимодального перевезення [9] у транспортних одиницях фактичними перевізниками на мультимодальний

термінал за участю, можливо, третіх осіб, залучених до надання послуги мультимодального перевезення, так може повторюватися певну кількість разів і все це під контролем оператора мультимодального перевезення (рис. 2).

За схемою на рис. 2, процес мультимодального перевезення вантажів можна подати як багатоетапну транспортну задачу – коли на шляху від постачальника до споживача матеріального потоку проміжних пунктів є декілька.

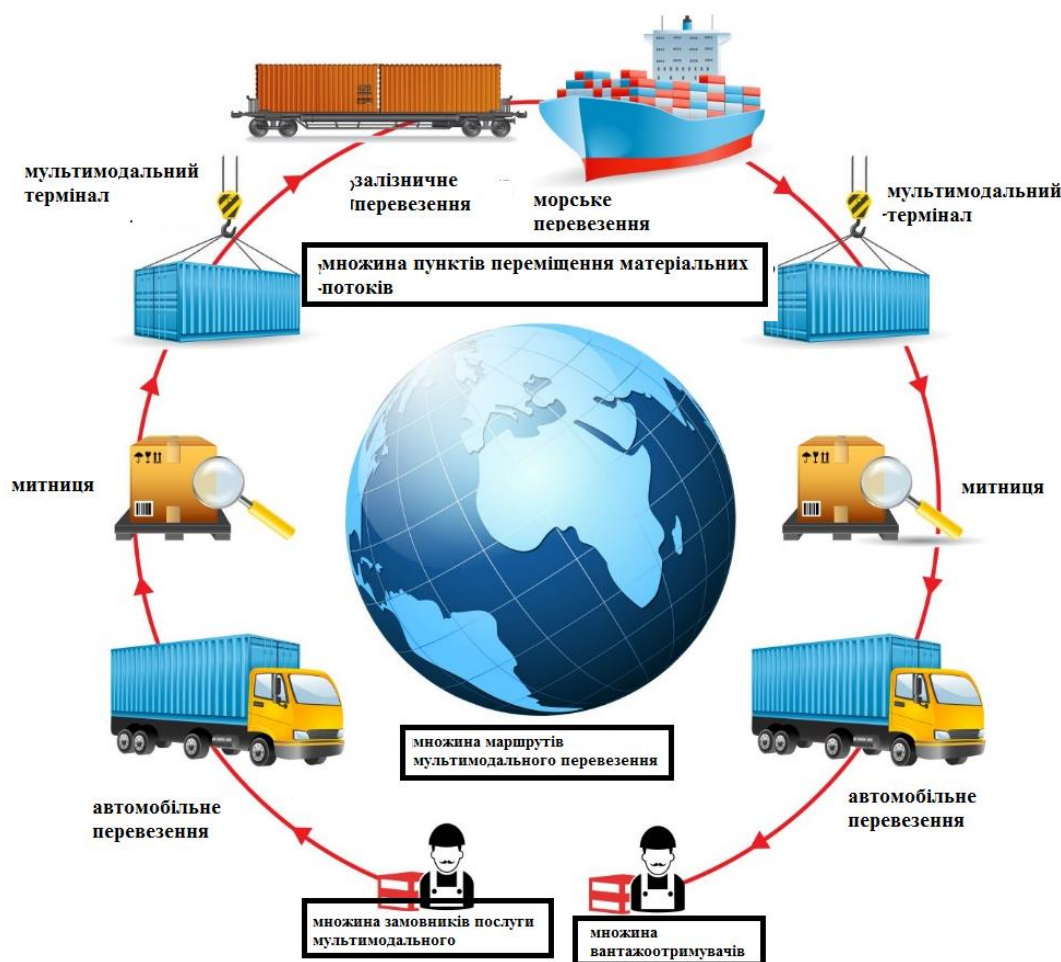


Рис. 1. Принципова схема полігону дослідження мультимодальних вантажних перевезень [7]

Вантаж, що перевозитиметься, вважається однорідним як транспортна одиниця. Замовників послуги мультимодального перевезення, транспортних одиниць, фактичних перевізників, мультимодальних терміналів, третіх осіб і вантажоотримувачів може бути декілька, а ось оператор мультимодального перевезення – один. Вважаються відомими запаси вантажу в замовників послуги мультимодального перевезення, пропускні спроможності проміжних пунктів

(залізничних станцій, портів, автошляхів, мультимодальних терміналів і т. д.), потреби вантажоотримувачів, а також тарифи на перевезення одиниці продукції (транспортної одиниці) і пропускні спроможності кожного з можливих мультимодальних маршрутів. За цих умов потрібно визначити найекономічніший план перевезень вантажів від замовника послуги мультимодального перевезення до вантажоотримувача.

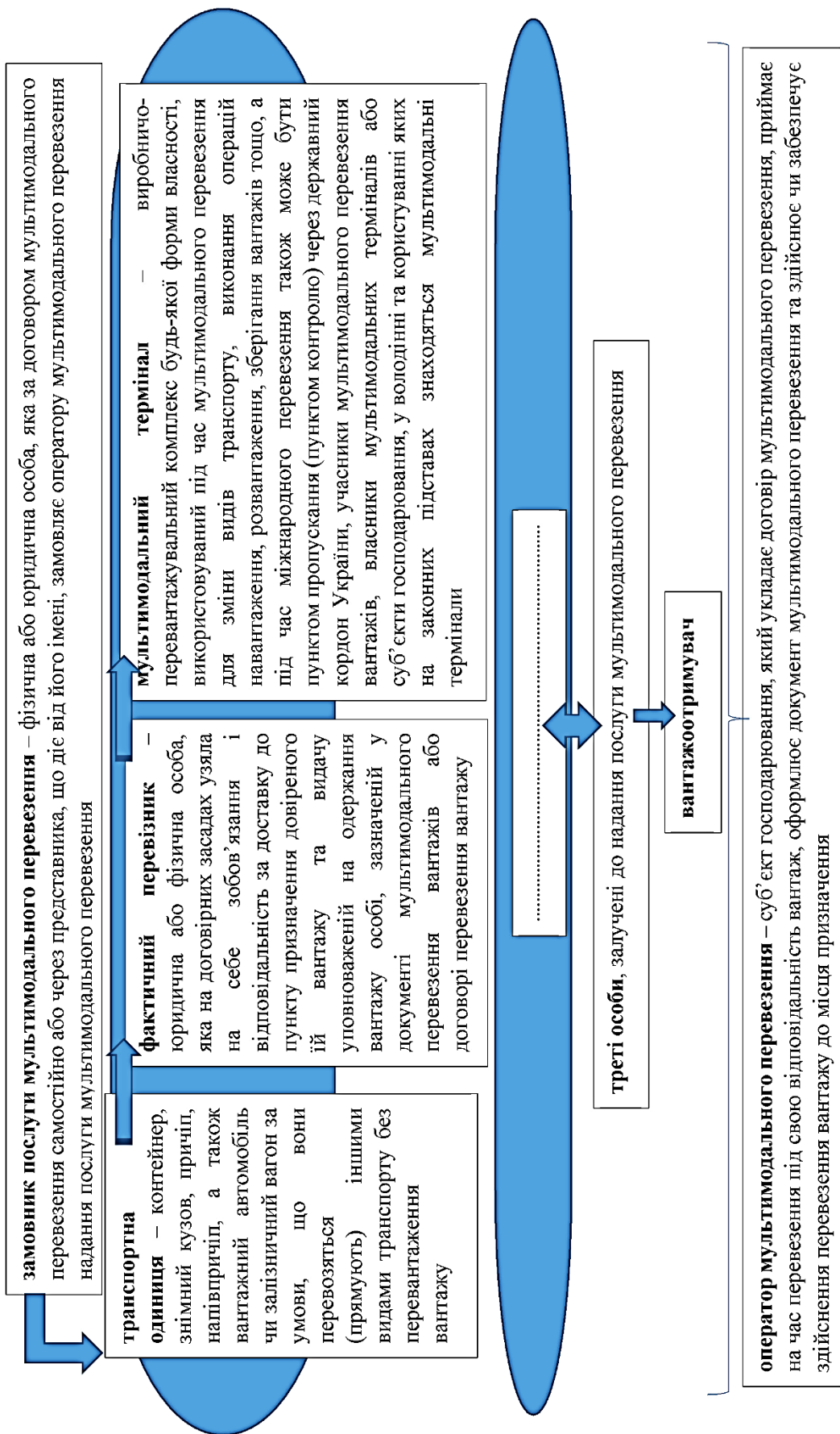


Рис. 2. Схема переміщення матеріальних потоків при мультимодальному перевезенні вантажів

Основна частина дослідження.

Позначимо кількість замовників послуги мультимодального перевезення через m , а обсяг наявного в кожного з них вантажу (транспортних одиниць) через a_i ($i = \overline{1; m}$). Кількість вантажоотримувачів позначимо через n , попит кожного вантажоотримувача – b_j ($j = \overline{1; n}$). Припустимо, що перевезення вантажу від замовників послуги мультимодального перевезення до вантажоотримувачів здійснюватимуться у d етапів. Спочатку вантаж від замовників послуги мультимодального перевезення надходить на проміжні пункти, а вже з проміжних пунктів – до вантажоотримувачів (рис. 2). Кількість проміжних пунктів позначимо через p , а пропускну спроможність окремого k -го проміжного пункту – c_k ($k = \overline{1; p}$).

Витрати на перевезення одиниці вантажу від i -го замовника послуги мультимодального перевезення на k -й проміжний пункт позначимо через s_{ik} ($i = \overline{1; m}; k = \overline{1; p}$), витрати на перевезення одиниці вантажу від k_1 -го проміжного пункту до k_p -го проміжного пункту позначимо через $v_{k_1 k_p}$, витрати на перевезення одиниці продукції з k -го проміжного пункту до j -го споживача – t_{kj} ($k = \overline{1; p}; j = \overline{1; n}$). Зроблено припущення, що пропускі спроможності кожного з можливих мультимодальних маршрутів є достатніми для пропускання всіх вантажопотоків. Потрібно знайти обсяги

x_{ik} перевезень вантажів від замовників послуги мультимодального перевезення на проміжні пункти ($i = \overline{1; m}; k = \overline{1; p}$), обсяги $w_{k_1 k_p}$ перевезень вантажів між проміжними пунктами та обсяги y_{kj} перевезень вантажів з проміжних пунктів до вантажоотримувачів ($k = \overline{1; p}; j = \overline{1; n}$), щоб загальні витрати Z на здійснення всіх перевезень були мінімальними.

Згодом значення попиту, запасів і вартості перевезення та інших параметрів можуть змінюватись, причинами чого є криза, зміни цін тощо. У зв'язку з цим виникає потреба постановки завдання з імовірнісними характеристиками здійснення оптимального плану мультимодального вантажного перевезення, а саме використання стохастичної постановки задачі, змінні параметри якої є випадковими величинами, тобто залучити апарат стохастичного програмування.

На відміну від класичної постановки транспортної задачі, у стохастичній задачі витрати на перевезення, попит вантажоотримувачів і пропозиція замовників послуги мультимодального перевезення можуть набувати випадкових значень. Зокрема може бути враховано, що змінна величина вартості перевезення на мультимодальному маршруті залежить від особливостей тарифної політики внаслідок фінансових, законодавчих чи ринкових причин зрушень у галузі. Тоді економіко-математична модель d -етапної транспортної задачі набуде вигляду

$$\begin{aligned}
 z &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p s_{ik} \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^p v_{k_1 k_p} \cdot w_{k_1 k_p} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n t_{kj} \cdot y_{kj} = \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} s_{ik} \cdot \varphi(s_{ik}) ds_{ik} \right) \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} v_{k_1 k_p} \cdot \chi(v_{k_1 k_p}) dv_{k_1 k_p} \right) \cdot w_{k_1 k_p} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n \left(\int_{t_0}^{\tau} t_{kj} \cdot \gamma(t_{kj}) dt_{kj} \right) \cdot y_{kj} = \quad (1) \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} s_{ik} \cdot P'(s_{ik}) ds_{ik} \right) \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} v_{k_1 k_p} \cdot P'(v_{k_1 k_p}) dv_{k_1 k_p} \right) \cdot w_{k_1 k_p} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n \left(\int_{t_0}^{\tau} t_{kj} \cdot P'(t_{kj}) dt_{kj} \right) \cdot y_{kj} \rightarrow \min
 \end{aligned}$$

де $\overline{s_{ik}}$, $\overline{v_{k_1k_p}}$, $\overline{t_{kj}}$ – математичне очікування витрат на перевезення від замовників послуги мультимодального перевезення до проміжних пунктів, між проміжними пунктами мультимодального маршруту і з проміжних пунктів до вантажоотримувачів, відповідно, умов. од.;

t_0 – момент часу початку перевезення;

τ – кінцевий момент часу перевезення;

$\varphi(s_{ik})$ – щільність розподілу безперервної випадкової величини витрат на перевезення від замовників послуги мультимодального перевезення до проміжних пунктів як функція, що є похідною P' від функції, що диференціюється;

$\chi(v_{k_1k_p})$ – щільність розподілу безперервної випадкової величини витрат на перевезення між проміжними пунктами мультимодального маршруту як функція, що є похідною P' від функції, що диференціюється;

$\gamma(t_{kj})$ – щільність розподілу безперервної випадкової величини витрат на перевезення з проміжних пунктів до вантажоотримувачів як функція, що є похідною P' від функції, що диференціюється;

Отже, отримали стохастичну постановку транспортної задачі для мультимодального перевезення:

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} s_{ik} \cdot P'(s_{ik}) ds_{ik} \right) \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} v_{k_1k_p} \cdot P'(v_{k_1k_p}) dv_{k_1k_p} \right) \cdot w_{k_1k_p} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n \left(\int_{t_0}^{\tau} t_{kj} \cdot P'(t_{kj}) dt_{kj} \right) \cdot y_{kj} \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ik} \leq a_i, i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^p y_{kj} = b_j, j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$a_i \geq \sum_{k=1}^p w_{k_1k_p} \leq b_j, \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ik} = \sum_{j=1}^n y_{kj} \leq c_k, k = \overline{1, p}, \quad (6)$$

$$x_{ik} \geq 0, i = \overline{1, m}, k = \overline{1, p}, \quad (7)$$

$$w_{k_1k_p} \geq 0, k = \overline{1, p}, \quad (8)$$

$$y_{kj} \geq 0, k = \overline{1, p}, j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Цільова функція (2) задачі (2) – (9) відображує вимогу пошуку найекономічнішого плану перевезень вантажів. Інші умови задачі означають, відповідно, що:

(3) – обсяг вантажу, що вивозиться від кожного замовника послуги мультимодального перевезення, не має перевищувати наявного в нього запасу;

(4) – обсяг вантажу, що завозиться кожному вантажоотримувачу, має відповідати його попиту;

(5) – вантаж на маршруті руху не перевищує наявний обсяг у замовників послуги мультимодального перевезення і попит вантажоотримувачів;

(6) – увесь вантаж, що завозиться на кожний проміжний пункт від замовників послуги мультимодального перевезення, має бути потім надісланий до вантажоотримувачів, причому слід враховувати пропускні спроможності кожного проміжного пункту;

(7)–(9) – обсяги перевезень за кожним із маршрутів мають бути невід’ємними.

Математично задача (2)–(9) є стохастичною моделлю процесу мультимодального перевезення.

Для розв’язання такої транспортної задачі (2)–(9) можна використовувати різні методи. Існує поняття дисбалансу та виродженості у транспортній задачі. Виконання умови збалансованості

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad [10] \text{ дуже важливо під час}$$

розв’язання транспортної задачі. Це означає, що до базисного допустимого розв’язку входить $m+n-1$ базисна змінна. Така умова не виконується, якщо замовники послуги мультимодального перевезення можуть запропонувати більше, ніж потрібно вантажоотримувачам, тоді для розв’язання задачі вводиться фіктивний вантажоотримувач, попит якого дорівнює

$$b_{n+1} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j. \text{ Вартість перевезення для}$$

цього вантажоотримувача дорівнює 0 умовних одиниць. Отже, при розв’язанні задачі надлишки списуються цьому вантажоотримувачу, і отримуємо транспортне завдання, для якого виконується умова збалансованості.

Щоб при розв’язанні транспортної задачі не виникло труднощів, необхідно також перевіряти розв’язок на невиродженість. Опорний план

транспортної задачі є невиродженим, якщо кількість базисних змінних дорівнює $m+n-1$. Якщо вона менше цього значення – опорний план вироджений. Така ситуація може виникнути, якщо одночасно задоволені потреби вантажоотримувачів і порожній склад замовників послуги мультимодального перевезення. Це призводить до того, що система матиме не єдине значення. Для вирішення проблеми в такій ситуації привласнюємо змінній, що стоїть у транспортній таблиці поруч із базисною, нульове значення.

Знайдений оптимальний розв’язок (2) необхідно перевірити на належність до області імовірнісної стійкості. Якщо цей розв’язок для нас неприйнятний, постає завдання його корекції. Відомі дані минулих років АТ «УЗ» щодо перевезення транспортних одиниць (наприклад контейнерів), завдяки їм ми можемо знайти оптимальний план мультимодальних перевезень вантажів у контейнерах і мінімізувати витрати на їх транспортування. Приймаємо умову, що кількість вантажних одиниць у замовників послуг мультимодального перевезення відповідає потребам вантажоотримувачів і тому задача (2)–(9) розв’язується в закритому вигляді.

Витрати на перевезення $S_{ik}, v_{k_i k_p}, t_{kj}$ є стохастичними параметрами моделі і залежать від часу знаходження транспортних одиниць на мультимодальному маршруті:

$$t = \tau - t_0. \quad (10)$$

Відповідно час t включатиме такі основні складові:

$$t = t_{пер.} + t_{вант.} + t_{очік.} \quad (11)$$

де $t_{пер.}$ – час на переміщення транспортних одиниць на мультимодальному маршруті, год, є детермінованою величиною, бо залежить від відстані S перевезення, що є

відомою детермінованою величиною для конкретного мультимодального маршруту, км, і швидкості руху у транспортному засобі V , км/год, що приймається як середнє значення для конкретного транспортного засобу на певній ділянці руху (наприклад середня швидкість перевезення для залізничного транспорту власного вагона перевізника з транспортними одиницями (приймаємо універсальні платформи з контейнерними відправками), введена в дію з 01.03.2023 р., складає мінімум 50 км/добу (рис. 3)):

$$t_{пер.} = \frac{S}{V}, \quad (12)$$

$t_{вант.}$ – час на перевантажувальні роботи за потреби є детермінованою величиною за технологічними нормами проведення навантажувально-розвантажувальних робіт, год;

$t_{очік.}$ – час на очікування при переміщенні транспортних одиниць на мультимодальному маршруті, є випадковою величиною.

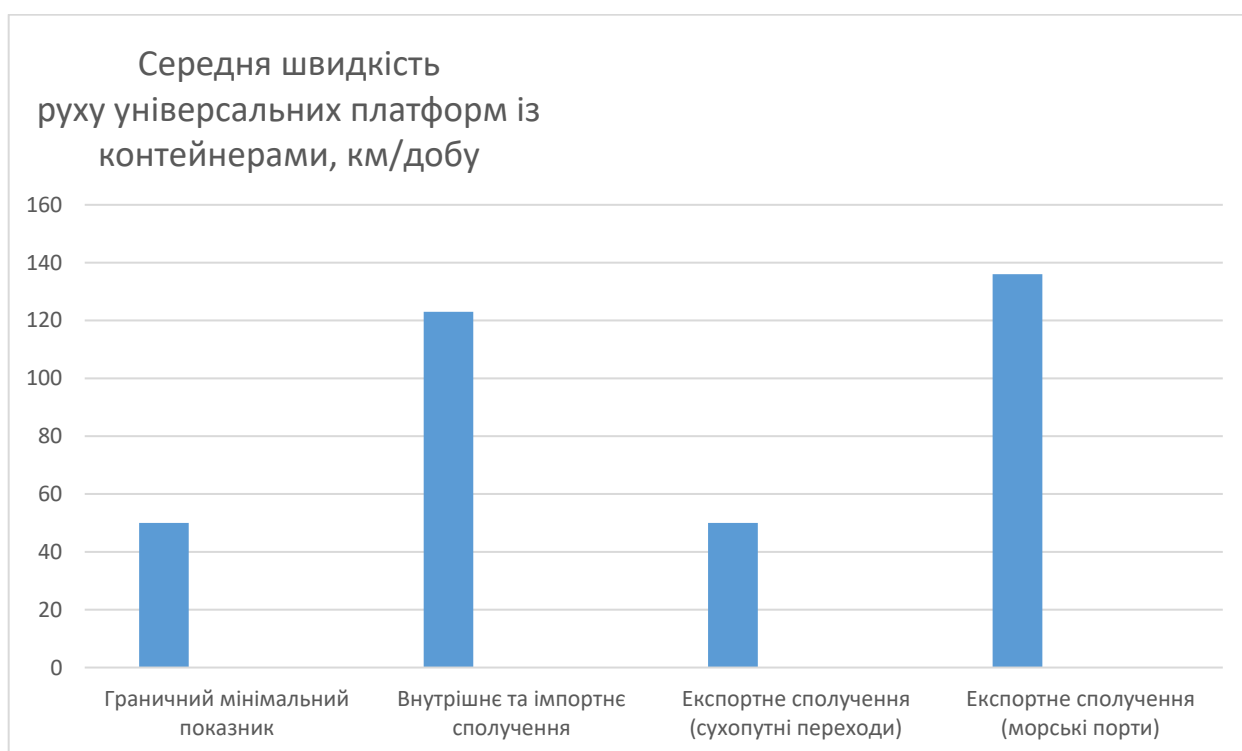


Рис. 3. Середня швидкість перевезення для залізничного транспорту власного вагона перевізника з транспортними одиницями (приймаємо універсальні платформи з контейнерними відправками), введена в дію з 01.03.2023 р.

Відповідно до технології перевезення вантажу витрати, пов'язані з перебуванням транспортних одиниць під час $t_{очік.}$ будуть

на проміжних пунктах мультимодального маршруту і складатимуть

$$z_{очік.} = \sum_{k=1}^p \frac{C_{прост.} \cdot q}{q_{см}} \cdot \int_{t_{min}}^{t_{очік.}} t_{очік.k_1k_p} \cdot f(t_{очік.k_1k_p}) dt_{очік.k_1k_p}, \quad (13)$$

де $C_{прост.}$ – вартість години простою транспортного засобу на мультимодальному маршруті;

q – маса вантажу для переміщення по мультимодальному маршруту, т;

$q_{ст}$ – статичне навантаження транспортного засобу, т/засіб;

t_{min} – мінімальний час простою транспортного засобу під час очікування операцій із транспортними одиницями на мультимодальному маршруті.

Отже, цільова функція моделі набуде вигляду

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} s_{ik} \cdot P'(s_{ik}) ds_{ik} \right) \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^{\tau} v_{k_1 k_p} \cdot P'(v_{k_1 k_p}) dv_{k_1 k_p} \right) \cdot w_{k_1 k_p} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n \left(\int_{t_0}^{\tau} t_{kj} \cdot P'(t_{kj}) dt_{kj} \right) \cdot y_{kj} + \sum_{k=1}^p \frac{C_{прост.} \cdot q}{q_{ст}} \cdot \int_{t_{min}}^{t_{очік.}} t_{очік. k_1 k_p} \cdot f(t_{очік. k_1 k_p}) dt_{очік. k_1 k_p} \rightarrow \min. \quad (14)$$

Експериментальні дослідження моделі показали, що, за положеннями центральної граничної теореми [11], з урахуванням великої кількості транспортних одиниць, замовників послуг мультимодального перевезення та вантажоотримувачів існує збіжність розподілу суми незалежних однаково розподілених випадкових величин до нормального закону розподілу.

Подальші статистичні дослідження доводять, що $t_{очік.}$ в основному складається з часу очікування на пунктах пропускання через державний кордон, мультимодальних терміналах, при очікуванні навантажувально-розвантажувальних операцій і т. п., його можна вважати підпорядкованим усіченому нормальному закону розподілу із щільністю

$$f(t_{очік.}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t_{очік.} - \overline{t_{очік.}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (15)$$

де $\overline{t_{очік.}}$ та σ – відповідно математичне очікування та середньоквадратичне відхилення випадкової величини $t_{очік.}$. Це обумовлює несинхронне функціонування замовників послуги мультимодального

перевезення, оператора мультимодального перевезення, терміналів і вантажоотримувачів.

У роботі [12] досліджено показник простою великовагового контейнера під 1-ю вантажною операцією і доведено, що випадкова величина підкоряється нормальному закону розподілу, функція щільності якого $f(t_{очік.}) = 0,019 \cdot e^{-\frac{t_{очік.}-74,33}{861,125}}$. Гістограма та функція щільності розподілу простою великовагового контейнера на прикладі транспортного перевантажувального вузла М під 1-ю вантажною операцією наведено на рис. 4. Виявлено наявність тенденції до збільшення часу простою внаслідок нерівномірності підведення вагонів і контейнерів, а також із коливанням обсягів роботи.

Оцінювання результатів моделювання вантажних мультимодальних залізничних перевезень показало, що реалізація формалізованої технології при інтенсивності відправлення транспортних вантажів у розмірі 1 тис. TEU/добу дає витрати на рівні 5...6 грн/ TEU*км, що на 2..3,5 % менше, ніж існуючі.

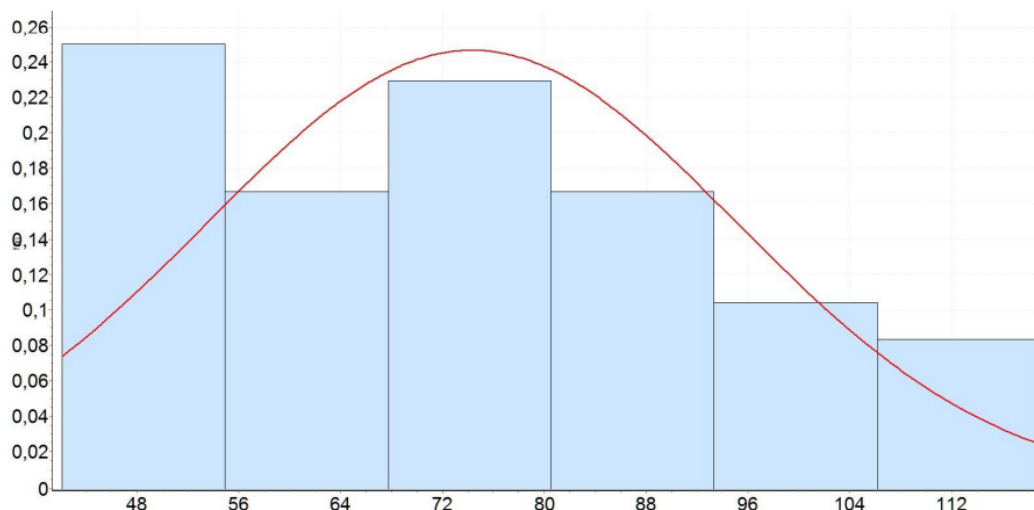


Рис. 4. Гістограма та функція щільності розподілу простою великовагового контейнера під 1-ю вантажною операцією

Висновки. Реалізація моделі (14) в умовах організації мультимодальних маршрутів на території України за участю залізничного транспорту показала, що для усереднених вихідних даних можна отримати оптимальне рішення щодо оптимізації витрат на переміщення транспортних вантажів і оптимізації часу знаходження на мультимодальному маршруті. Зокрема для умов експериментального полігону отримано, що реалізація розробленої технології при інтенсивності відправлення транспортних вантажів у розмірі 1 тис. TEU/добу,

мінімальних витрати за експертними розрахунками 5,42 грн/ TEU, що на 3 % менше, ніж за теоретичними даними.

Розроблену модель можна вважати достатньо універсальною за своєю структурою і використовувати її при подаванні транспортних одиниць для перевезень за мультимодальним маршрутом до вантажоотримувачів і у зворотному напрямку. При цьому будуть змінюватися тільки параметри моделі, що залежить від особливостей роботи видів транспорту з окремими типами вантажу з прибуття або відправлення.

Список використаних джерел

1. Колбин В. В. Стохастическое программирование. *Palmarium Academic Publishing*. 2013. 396 с.
2. Congli Hao, Yixiang Yue Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System *Procedia Engineering* 137 (2016). P. 382–390. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581600299X?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7ac5f507d8f2c30a.
3. Кошевий Д. О. Дослідження методів оптимізації транспортних перевезень: пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 122 Комп'ютерні науки / М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2019. 81 с. URL: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/10958>.

4. Економіко-математичні методи та моделі: навч. посіб. / Н. Л. Воропай, Т. В. Герасименко, Л. О. Кирилова та ін.; за заг. ред. В. М. Мацкул. Одеса: ОНЕУ, 2018. 404 с.
5. Іксанов О. М., Шевченко В. І. Транспортна задача, її властивості та методи розв'язування (курс «Дослідження операцій»): навч. посіб. Київ: Наукове видавництво «ТВиМС», 2010. 84 с.
6. Claudia Archetti, Lorenzo Peirano, M. Grazia Speranza Optimization in multimodal freight transportation problems: A Survey. *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 299, Is. 1. P. 1-20. ISSN 0377-2217. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.031>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221721006263>.
7. Законопроект № 4258 «Про мультимодальні перевезення» змінить транспортну систему. Від 10.03.2021 р. URL: <https://www.ua-bud.com.ua/zakonoproekt-4258-pro-multimodalni-perevezennya/>. Дата звернення: 07.03.2021.
8. Транспортна задача лінійного програмування. URL: <https://www.mathros.net.ua/transportna-zadacha-matematychna-postanovka-zadachi.html>.
9. Про мультимодальні перевезення: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>.
10. Zhuk V. V., Tumka O. A. About the uniform approximation on the all real axis of continuous distribution functions. *International Conference on «Stability and Control Processes» in Memory of V.I. Zubov, SCP 2015 – Proceedings*. 7342141. 2015. P. 364-365.
11. Центральна гранична теорема. URL: <https://uk.wikipedia.org/>.
12. Ломотько Д. В., Дерев'яно О. В., Дворецький П. О. Підвищення ефективності роботи з контейнерами в умовах перевантажувальних вузлів за участю залізниць. *Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 11. С. 48-54.

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, професор, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925. Тел.: +38 (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.
Примаченко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7326-8997. Тел.: +38 (066) 567-97-72. E-mail: gannaprymachenko@kart.edu.ua.

Lomotko Denys, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of the department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925. E-mail: den@kart.edu.ua.
Prymachenko Hanna, PhD (Tech). Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7326-8997. E-mail: gannaprymachenko@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 25.03.2023

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 203

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 27.03.2023 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 9,75. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.