



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 208

Харків 2024

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 № 6 від 28 червня 2024 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 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2024.

Редакційна колегія

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

Випусковий редактор – Харін Роман Олександрович, 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 (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка 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., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзьяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)
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 (Tohoku
University, Японія)

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., доцент (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)
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)

<i>Воронін С. В., Стефанов В. О., Суранов О. О., Гамора В. О., Стефанов С. О.</i> Дослідження систем аерозольного нанесення мастильного матеріалу в контакт «колесо-рейка»	7
<i>Козар Л. М., Романович Є. В., Кравець А. М., Бабенко А. О.</i> Модернізація навісного пристрою для перевантаження вантажів у кіпах	23
<i>Воронін С. В., Стефанов В. О., Васянович Р. С., Трифонов Т. В., Півоваров С. О.</i> Методика та приклад розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин мобільної техніки	36
<i>Волков О. О., Краєвська Ж. В., Субботіна В. В., Субботін О. В., Федоренко Г. А.</i> Зміцнення поверхні за допомогою тертя	44

Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Плугін А. А., Жван В. Д., Лобяк О. В., Назаренко О. М., Наджафов Е. Ф., Березовська А. О.</i> Прогнозування залишкового ресурсу залізобетонної димової труби коксохімічного виробництва	51
<i>Бінкевич К. О., Володимиров А. В., Колчанов А. В.</i> Аналіз деструкцій і методів підсилення збірних залізобетонних панелей перекриттів	67
<i>Плугін А. А., Чайка В. М., Мусієнко С. М., Наджафов Е. Ф.</i> Особливо дрібнозернистий бетон із відходів ГЗК для будівельних виробів	79

Геодезія та землеустрій (193)

<i>Угненко Є. Б., Шарий Г. І., Ужвієва О. М., Коростельов Є. М., Сорочук Н. І., Шевченко А. О., Белікова А. О.</i> Інженерно-геодезичні вишукування. Геометричне нівелювання траси	92
<i>Клюка О. М., Бахарєв В. С., Гальченко Н. П., Шелковська І. М., Васильєв М. А.</i> Методичні підходи щодо розроблення комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади	106

Залізничний транспорт (273)

<i>Берестов І. В., Колісник А. В., Раківненко В. П., Кириченко О. М., Сведюк Р. Р.</i> Шляхи підвищення надійності контейнерних перевезень у міжнародному сполученні в умовах війни	122
<i>Кудряшов Д. В., Кудряшова Н. С.</i> Огляд і аналіз основних напрямів наукових досліджень із підвищення ефективності перевезень масових вантажів залізничним транспортом	130

<i>Волошин Д. І., Волошина Л. В., Плескач О. І.</i> Технології підтримки прийняття рішень при формуванні системи управління якістю на вагоноремонтних підприємствах	140
<i>Горобченко О. М., Заїка Д. О.</i> Створення математичної моделі визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива	146
<i>Кузишин А. Я., Ковальчук В. В.</i> Експериментальне дослідження впливу додаткового резервуара на деформування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу залізниці	162
<i>Воронін С. В., Стефанов В. О., Комар С. В., Савченко А. Д., Губін О. О.</i> Вплив навантажень на моторно-осьовий підшипник локомотива, на умови утворення мастильної плівки на поверхнях тертя	172
<i>Панченко В. В., Туренко О. Г.</i> Синтез нейрорегулятора NARMA-12 для системи тягового асинхронного електропривода	180

Транспортні технології (275)

<i>Хітров І. О.</i> Дослідження шумового навантаження транспортних засобів	188
<i>Шевченко В. І., Мацієвський Б. В., Андрушко І. М.</i> Аналіз нормативно-правового забезпечення оренди вантажних вагонів	197
<i>Мурад'ян А. О., Демидюков О. В.</i> Перспективи розвитку вантажного обладнання та особливості його використання в умовах автоматизації портових терміналів	207
<i>Арсененко Д. В., Ломотько Д. В., Ковальова О. В.</i> Розроблення оптимальної технології перевезення зернових вантажів з урахуванням сучасних тенденцій галузі	215
<i>Семененко О. І., Семененко Ю. О., Одсгов М. М.</i> Застосування м'якої комутації у трифазних інверторах напруги тягового рухомого складу	222
<i>Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Івахно В. В., Замаруєв В. В., Гордієнко Д. А., Шелест Д. А.</i> Дослідження ефективності пошукового алгоритму відбору максимальної потужності сонячних панелей підвищувальним dc-dc перетворювачем	234
<i>Огар О. М., Левченко А. О., Кондратьєв І. В., Кустов Р. В., Зав'ялов М. І.</i> Науковий підхід до зменшення потужності паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів	250

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 625.032.3

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНЕСЕННЯ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ В КОНТАКТ «КОЛЕСО-РЕЙКА»

Д-р техн. наук С. В. Воронін, кандидати техн. наук В. О. Стефанов, О. О. Суранов, аспіранти В. О. Гамора, С. О. Стефанов

RESEARCH OF AEROSOL APPLICATION SYSTEMS FOR APPLYING LUBRICATING MATERIAL IN THE «WHEEL-RACK» CONTACT

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Stefanov, PhD (Tech.) O. O. Suranov, postgraduate student V. O. Hamora, postgraduate student S. O. Stefanov

***Анотація.** У статті описано різні методи лубрикації зони контакту «колесо-рейка», спрямовані на зменшення коефіцієнта тертя і підвищення ефективності використання енергоресурсів, безпеки руху та екологічних показників. Наведено технології подавання мастильних матеріалів у цю зону, такі як мастильні стрижні, стаціонарні системи через щітки або головку рейки. Виділено проблеми наявних технологій, такі як надмірне змащування, необхідність заміни елементів змащення, великі витрати мастильного матеріалу, а також нерівномірне та некоректне нанесення. Зазначено, що точність у нанесенні та дозуванні мастильного матеріалу є надзвичайно важливою для запобігання потраплянню на поверхню колеса та рейки, що може знизити зчеплення, аерозольний метод нанесення лубриканта на ребро колеса є більш точним і економічно вигідним. Розроблено нову форсунку для аерозольного розпилювання мастила, а також виготовлено лабораторну установку для досліджень цього процесу. Установка працює на стисненому повітрі та включає компресор із ресиверним балоном для стабілізації роботи форсунки. Описано гідравлічну схему установки, де основні елементи включають кульковий кран, редукційний клапан, манометр, бак і форсунку. Показано підготовку установки до роботи і принцип її функціонування. Результати досліджень показали, що розроблена установка ефективно розпилює як густі, так і рідкі мастильні матеріали залежно від тиску повітря та діаметра сопла форсунки. Наведено графіки витрат мастила для різних типів мастил і параметрів форсунки.*

***Ключові слова:** форсунка, аерозольне розпилювання, мастило, витрати мастильного матеріалу, рейкозмащувач, крива ділянка колії.*

***Abstract.** The article discusses various methods of lubricating the «wheel-rail» contact zone aimed at reducing friction coefficient and improving the efficiency of energy resource utilization, safety of movement, and environmental indicators. Technologies for delivering lubricating materials to this zone, such as lubricating rods, stationary systems using brushes, or railhead applicators, are outlined. The article highlights issues with existing technologies, including excessive lubrication, the need for component replacements, high lubricant material consumption, and uneven or incorrect application. It is emphasized that precision in the application and dosage of lubricating material is crucial to prevent its transfer onto the wheel and rail surfaces, which could reduce traction. The*

aerosol method of applying lubricant to the wheel edge is stated to be more accurate and cost-effective. The article mentions the company «SKF» and their EasyRail systems utilizing nozzles with the SP9-2 and SP9-2-S7 metering valves. Schematic representations of the nozzle and its working principle are provided. Sécheron is also mentioned, offering a nozzle for spraying lubricant onto the wheel edge through a two-tube system for oil and oxygen supply. An image of this company's nozzle is included. The text delves into the equipment of the lubrication system by Sécheron, specifically detailing the product's technical characteristics. Information about the development and manufacturing of the locomotive wheel flange lubrication system by the company "Scientific and Production Firm «Yugtekhnотrans» is presented. The article introduces the TrainSys-AL system for lubricating the rail head/running surface, providing a detailed description of its features and technical specifications, including the use of friction modifiers «HeadLub 90» and «RailLub». The products of the company Dropsa are mentioned, specifically the spray valve of the 1132330 series for the lubrication system of railway rolling stock and tracks. The overall context of the text is oriented towards the technical aspects and features of modern lubrication systems in railway transport.

The study reviews existing designs of rail and wheel lubrication devices, revealing that there is no ideal design that meets all requirements for material consumption and precision in applying lubricating material. Consequently, a new nozzle for aerosolized oil spray is developed, and a laboratory setup for researching this process is manufactured. The setup operates on compressed air and includes a compressor with a reservoir tank for stabilizing nozzle operation. The hydraulic scheme of the setup is described, with key elements such as a ball valve, pressure reducing valve, pressure gauge, tank, and nozzle. The preparation of the setup for operation and its functioning principle are demonstrated. Research results indicate that the developed setup effectively sprays both dense and liquid lubricants depending on the air pressure and nozzle diameter. Graphs illustrating lubricant consumption for different types of lubricants and various nozzle parameters are provided.

Keywords: nozzle, aerosol spray, lubricant, lubricant material consumption, rail lubricator, curved section of the track.

Вступ. Фізичною основою пересування потягів на залізниці є взаємодія колеса та рейки, що визначає безпеку руху, найважливіші техніко-економічні показники, вагу потягів, швидкість їхнього пересування та рівень експлуатаційних витрат, тому розроблення та удосконалення рейко- та гребенезмашувальних машин є актуальним завданням.

Вимоги до показників взаємодії коліс і рейок у різних зонах контакту та тертя суперечливі. З одного боку зчеплення коліс з рейкою має бути таким, щоб забезпечити мінімальний опір пересуванню потягу, з іншого боку для реалізації потрібної сили тяги необхідно забезпечити високий рівень зчеплення локомотивних коліс з рейками. Крім того, для зниження зносу гребня колеса та перехідної поверхні голівки рейки, а також опору пересуванню потягів у кривих ділянках колії потрібно максимально

знижити тертя між гребнем колеса і бічною поверхнею голівки рейки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світовий досвід експлуатації залізниць визначив основне завдання – удосконалення системи колесо-рейка. Дослідження контактної взаємодії колеса з рейкою призвело до розроблення оптимального профілю колеса [1, 2], що в свою чергу сприяє динамічній стабільності. Сили, що діють при проходженні рухомого складу в кривих ділянок колії, призводять до механічного зносу. Не менш важливим фактором є вплив адгезії та абразивів [3-5]. Також під час руху залізничного транспорту, а особливо в кривих ділянках колії, виникає шум, який має негативний вплив як на навколишнє середовище, так і на людське здоров'я. Результати досліджень щодо важливості використання системи рейко- та гребенезмашувача для зниження

шуму висвітлено в наукових дослідженнях [6, 7].

Коефіцієнт тертя напряму залежить від навантаження та мікроструктури матеріалу. Саме за рахунок його зменшення можливо знизити витрати енергоресурсів на тягу локомотива та збільшити ресурс коліс рухомого складу та рейок. Для зменшення коефіцієнта тертя використовують мастильні матеріали які підводяться до зони контакту «колесо-рейка», наприклад «СПРУТ-ВС», «Агрінол Рельсол ГС/М» та інші. Вони суттєво зменшують сили опору руху рухомого складу в кривих ділянках колії. Перспективним напрямком для вирішення цього питання є змащування внутрішньої поверхні рейок локомотивним провідним складом [8].

Висвітлено основні проблеми з системою рейкозмащування на Львівській залізниці, вказуючи на застарілу техніку та неефективність системи, а саме відсутність регулювання якості нанесення мастила в робочу зону, що призводить до необхідності частих зупинок для контролю та обслуговування. [9].

Проведені дослідження використання стаціонарного гребенезмащувача [10]. Приведені результати експерименту по перенесенню мастильного матеріалу від мастильника на гребінь колеса та висвітлені основні недоліки цієї установки. Хоча отримано певні висновки та досягнення, ще залишаються проблеми та відкриті питання, які потребують додаткових досліджень і вдосконалення цієї методології.

Визначення мети та завдання дослідження. Основною метою є порівняльний аналіз параметрів наявних систем рейко- та гребенезмащування та удосконалення наявної системи мащення аерозольного типу.

Для цього необхідно провести огляд на вже наявні прилади та технології для змащення бічної поверхні рейки. На основі отриманих даних створити та запропонувати власний пристрій, який буде

задовольняти вимоги рейко- та гребенезмащування. Провести експериментальні дослідження системи та визначити основні її робочі параметри.

Основна частина дослідження. Нині існує дуже багато методик для реалізації лубрикації зони контакту «колесо-рейка», що так само призводить до зменшення коефіцієнта тертя в кривих ділянках колії та, отже, економить паливо-енергетичні ресурси, рівень безпеки руху залізничним транспортом підвищується, покращуються екологічні показники (зниження вібрацій, шуму, забруднення повітря).

На рис. 1 зображено технології, за допомогою яких відбувається подання в зону контакту «колесо-рейка» мастильного матеріалу, це може бути як мастильні стрижні для змащення реборди (рис. 1, а), так і стаціонарні системи, які підводять мастильний матеріал через щітки (рис. 1, б) [11], чи конкретно через головку рейки (такий метод використовується в трамваях та метро, адже там не виникають такі високі навантаження як на магістральних коліях) (рис. 1, в) [12]. Свою основну мету такі технології виконують вдало, але мають суттєві недоліки, до яких можна віднести: надмірне змащення, необхідність заміни елементів змащення, великі витрати мастильного матеріалу, нерівномірність та некоректність нанесення мастильного матеріалу в зону контакту «колесо-рейка».

Точність у нанесенні та дозуванні мастильного матеріалу є пріоритетною, тому що потрапляння на поверхню катання є недопустимою адже це призводить, в подальшому, до зниженню зчеплення поверхні катання колеса з рейкою.

Аерозольний метод нанесення лубриканта на реборду колеса є більш точним та економічно вигідним порівняно з іншими методами адже забезпечує чіткий рівномірний факел розпилу мастильного матеріалу на реборду колеса та в подальшому його переносі на бічну поверхню рейки.

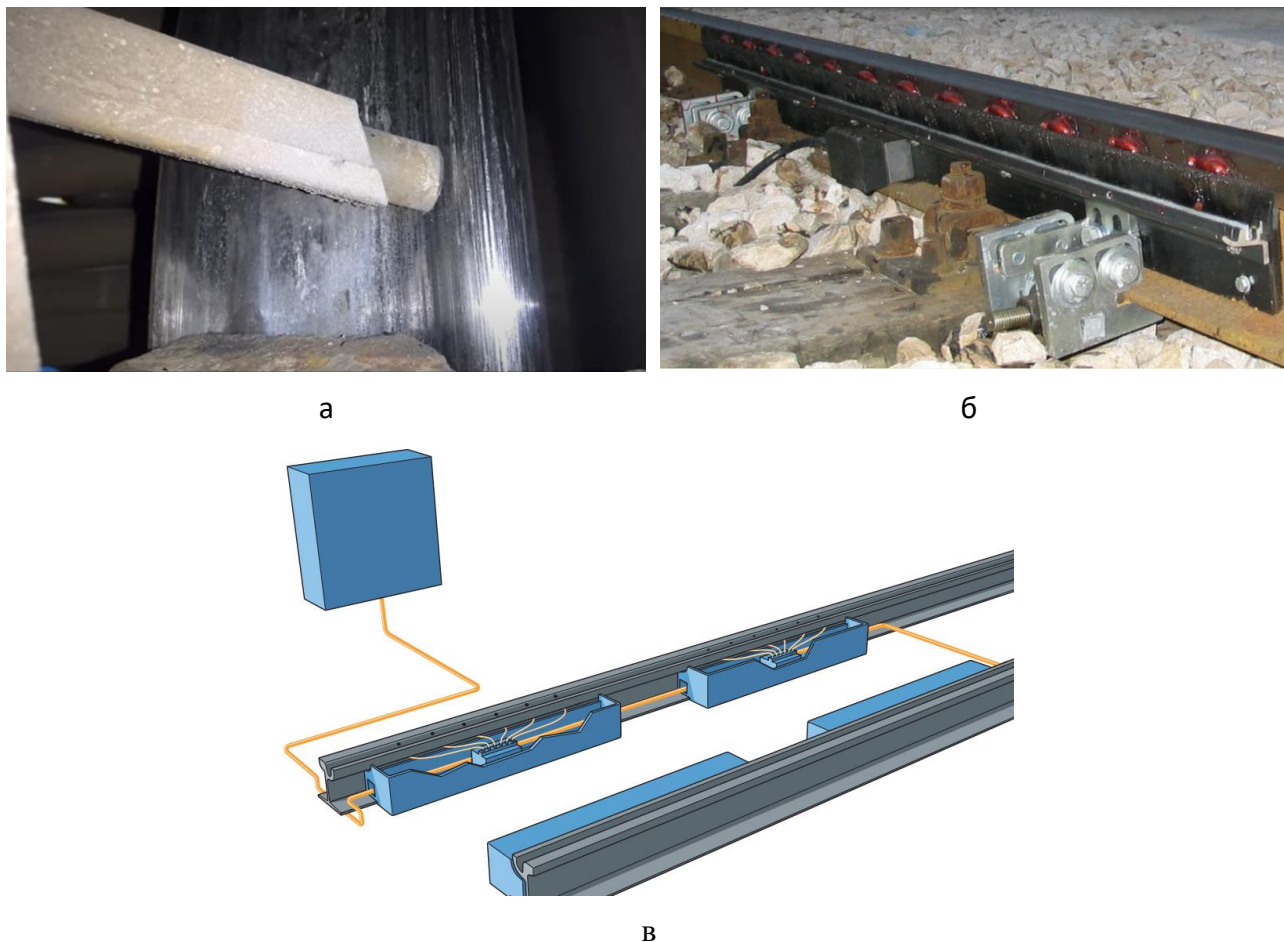


Рис. 1. Технології подавання в зону контакту «третього тіла»:

а – мастильними стрижнями для змащення реборди; б – стаціонарними системами, які підводять мастильний матеріал через щітки; в – стаціонарними системами, які підводять мастильний матеріал через головку рейки

Серед передових систем у вирішенні цього питання виступає компанія «SKF». Системи SKF EasyRail для змащення реборди колеса, а також головок рейок, використовують форсунки з дозувальним клапаном SP9-2, SP9-2-S7 [13]. На рис. 2, а зображено форсунку SP9-2-S7 та її схематичний вид на рис. 2, б. Монтується система на першій колісній парі головного вагону, за необхідності можливо збільшити кількість форсунок шляхом додавання клапанних блоків та реалізувати роздільну подачу на ліве та праве колесо окремо.

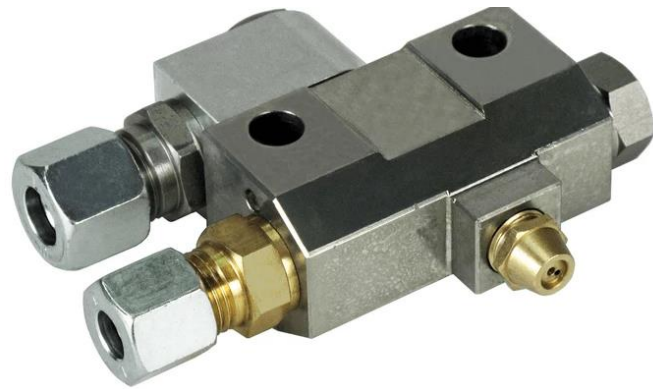
Коли система ввімкнена, повітря та мастильний матеріал подаються з ємності з пластичним мастильним матеріалом до

форсунки розпилення. Мастило розпилюється на реборду колеса тонким шаром і передається на бічну поверхню рейки при безпосередньому контакті.

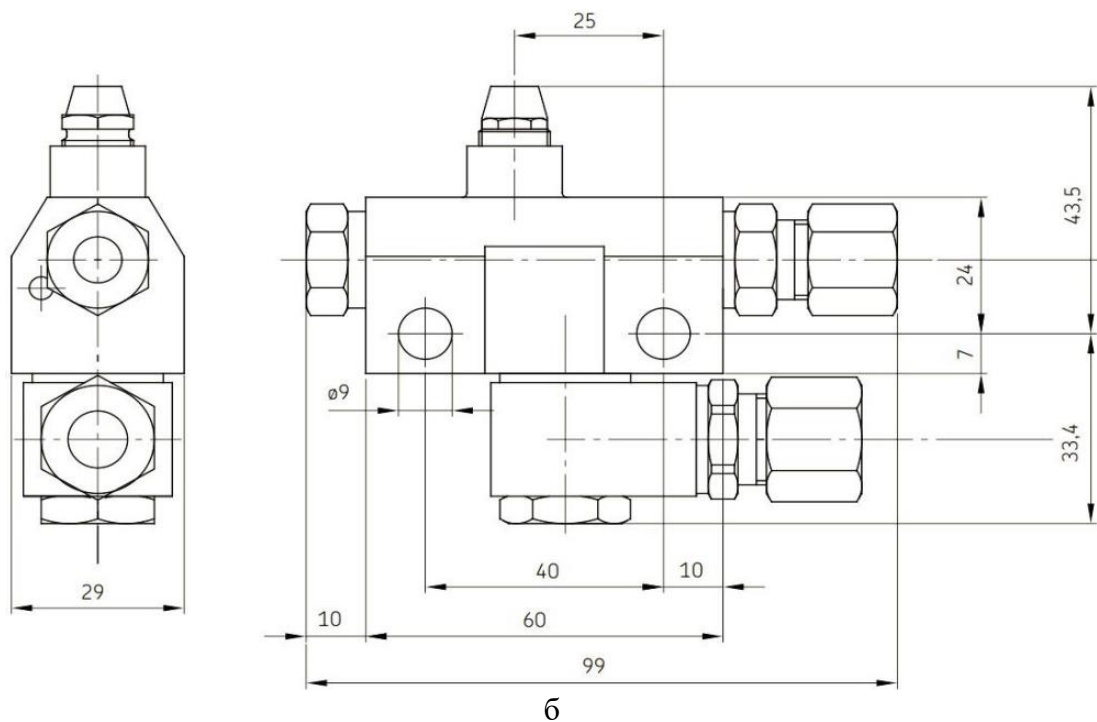
Технічні характеристики форсунок SP9-2, SP9-2-S7 наведено в табл. 1 [14].

Компанія Sécheron пропонує форсунку, що розпиляє мастильний матеріал на реборду колеса за допомогою двотрубною системи, яка підводить мастильний матеріал і повітря до форсунки окремо [15]. На рис. 3 зображено форсунку, що пропонує компанія Sécheron.

На рис. 4 зображено устаткування системи мащення Sécheron.



а



б

Рис. 2. Форсунка SP9-2-S7:

а – загальний вигляд форсунки; б – схематичний вигляд форсунки

Таблиця 1

Технічні характеристики форсунок SP9-2, SP9-2-S7

	SP9-2	SP9-2-S7
Розпилювана кількість	0,03 см ³ /спрацьовування	0,05 см ³ /спрацьовування
Стиснене повітря	4,5-10 бар	4,5-10 бар
Витрати стисненого повітря	близько 4,5 станд. м ³ (при 6 бар/1,5 с)	близько 4,5 станд. м ³ (при 6 бар/1,5 с)
Робочий тиск	40 бар	40 бар
Масило, матеріал	пластичне мастило класів 000, 00 за NLGI	пластичне мастило класів 000, 00 за NLGI



Рис. 3. Форсунка компанії Sécheron

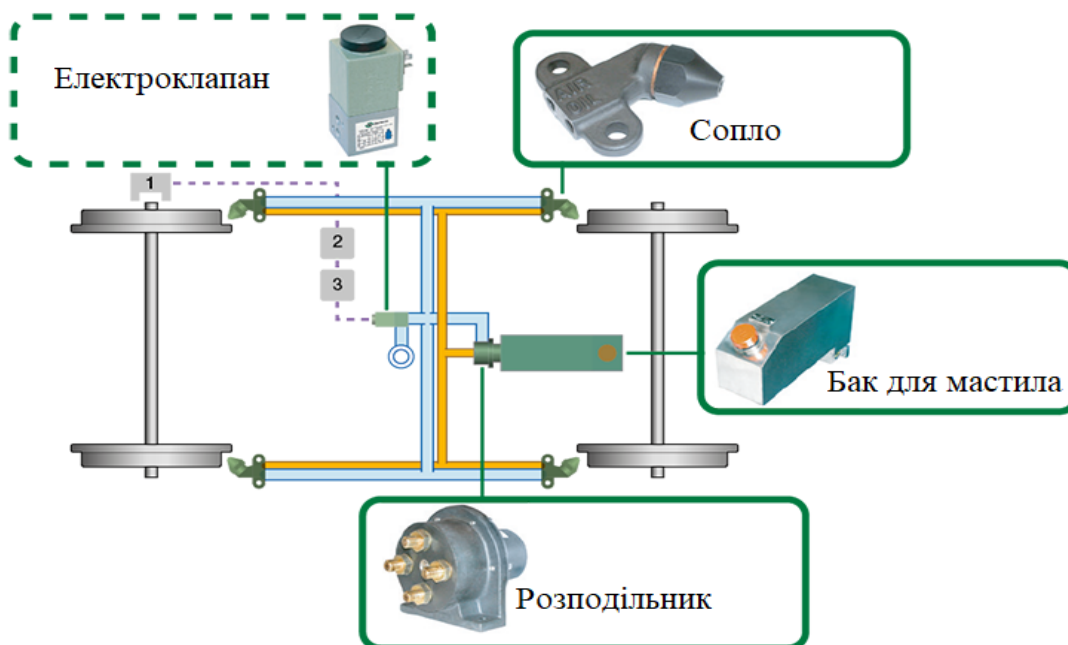


Рис. 4. Устаткування системи мащення Sécheron

Опис продукту:

- об'єм мастильного бака: 7 л (більше – на замовлення);
- напруга керування електропневматичним клапаном від 24 до 110 В ПС;
- електропневматичний клапан підключення повітря G 1/4”;
- номінальний робочий тиск повітря 0,6 МПа;

- розподільник із чотирма мастильними насосами (до чотирьох розпилювачів);
- регульований об'єм мастила від 10 до 40 мм³ на насос;
- підключення повітря розподільника 1 x G 3/8”;
- масляні з'єднання розподільника 4 x G 1/4”;

– повітряний патрубок розпилювальної форсунки G 1/8”;

– придатний для температури навколишнього середовища від –25 °С до +40 °С.

ТОВ «Науково-виробнича фірма «Югтехнотранс» розробило та виготовило

систему змащення гребенів коліс локомотивів СПП 12-5 [16], що зображено на рис. 5, на рис. 6 зображено вигляд форсунки в розрізі [17].

Технічні характеристики СПП 12-5 наведено в табл. 2 [18].

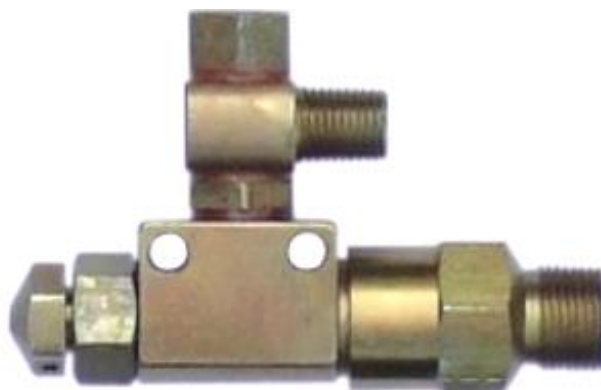


Рис. 5. Форсунка СПП 12-5

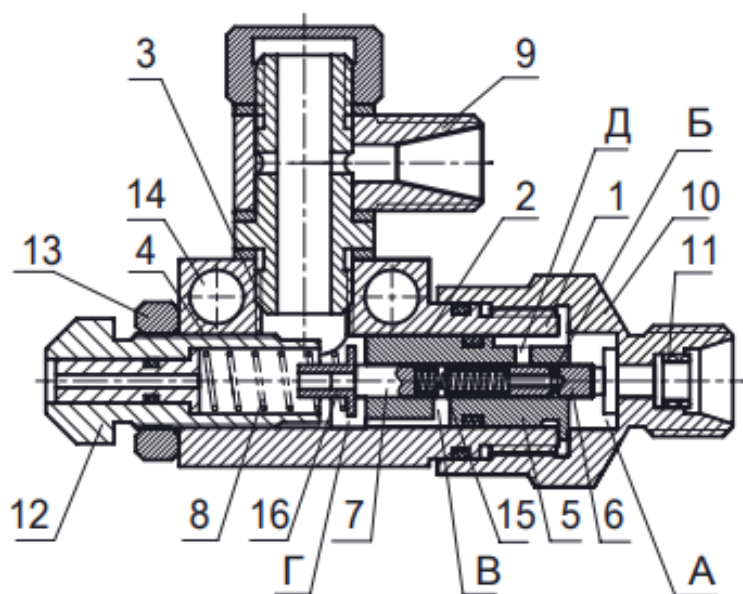


Рис. 6. Конструкція форсунки СПП 12-5:

- 1 – корпус; 2, 3 – входні отвори; 4 – вихідний отвір; 5 – втулка; 6 – розподільчий плунжер; 7 – дозувальний плунжер; 8 – пружина; 9 – штуцер кутовий; 10 – штуцер; 11 – фільтр; 12 – розпилювач; 13 – гайка; 14 – кріпильний отвір; 15 – пружина розпірна; 16 – упор; А, Б, В, Г – порожнини; Д – канал

Технічні характеристики СПП 12-5

Параметр	Показник
Тиск повітря на вході в систему, МПа	0,6 – 0,9
Тиск мастила на виході з насоса, МПа	3,0 – 5,0
Продуктивність насоса подавання мастила, см ³ /хід	12,0
Номінальний обсяг мастила на виході з форсунки за один цикл подавання, см ³	0,05
Кількість змащуваних точок, шт.	2; 4
Об'єм бака, м ³	8,0 (16,0)
Частота подавання мастила, вмик./хв	2 – 4
Час безперервної роботи на одній заправці, год	300 – 350 (600 – 650)

Система складається з таких частин [19]:

- електронний блок керування БУГ, який керує електричними клапанами, які починають виконавчий пристрій мастила живлення, і відкриває прохід повітря у трубопровід повітря;

- агрегат подавання мастила АПС, який є виконавчим пристроєм попереднього очищення та подавання мастила в мастило трубопроводів під високим тиском;

- трубопроводи, які транспортують стиснене повітря та мастильний матеріал під тиском безпосередньо у фільтри тонкого очищення, а звідти – до форсунок;

- форсунки, які є пристроями точного дозування порцій мастильного матеріалу, змішування його з повітрям і тонкого наплення пилу суміші повітря-мастило з утворенням 3-7 мікрон плівки на поверхні гребеня колеса;

- кріплення, фітинги та вентилі.

Для змащування гребенів коліс локомотивів застосовують мастило «Mariol NT».

TrainSys-AL – це система для змочування головки/бігової поверхні рейки без використання стисненого повітря з використанням фрикційної добавки «HeadLub 90» або гребеня колеса з «RailLub». Система складається з бака, насоса, форсунок та блоку керування. TrainSys-AL має модульну структуру та може бути адаптована до розмірів установки. Система характеризується максимальною стабільністю заданої кількості розпилення. Кількість матеріалу, що розпилюється, завжди однакова при кожній активації системи [20]. На рис. 7 зображена насадка TrainSys-AL, використовувана для змочування фланця колеса. На рис. 8 зображено баки з насосами, які керуються окремо для лівого та правого колеса [21].



Рис. 7. Насадка для фланця колеса TrainSys-AL



Рис. 8. Бак з насосами

До особливостей такої технології нанесення мастильного матеріалу відносять:

- система не потребує особливого обслуговування, не потрібне стиснене повітря;

- незалежна від температури, постійна швидкість подавання;

- точна точність потрапляння, відсутність відходів продукту;

- насосами (лівий, правий) можна керувати індивідуально;

- обробляє висококонцентровані фрикційні добавки з твердими частинками (HeadLub 90);

- можливі нестандартні розміри бака.

Dropsa пропонує розпилювальний клапан серії 1132330 [22] (рис. 9). Цей пневматичний розпилювальний клапан призначений для роботи у складі системи змащення залізничного рухомого складу та колій. Розпилювальні клапани встановлюють над лівими і правими передніми та задніми колесами

локомотивів. Керування системою здійснюється бортовим комп'ютером поїзда. Робота системи відбувається в межах мінімального та максимального діапазонів швидкостей і вимикається при гальмуванні поїзда. Поворот розпізнаваний за допомогою світлових променів і фотоелектричних елементів. Світловий промінь прямує у фотоелемент під час руху поїзда по прямій, при повороті світловий промінь переривається рухом візка поїзда. Потім сигнал надходить на бортовий комп'ютер.

Технічні характеристики [23]:

- діапазон тиску: 3 бар хв – максимально 12 бар;

- продуктивність: 30 мм³/хід;

- мастильний матеріал: макс. NLGI 1.

Проведений огляд відомих конструкцій рейко- та гребенезмащувальних пристроїв показав, що нема такої конструкції, яка б задовольняла усі вимоги, що висувають до таких пристроїв. Тому була розроблена нова форсунка для аерозольного розпилювання мастила та виготовлена експериментальна установка

для проведення лабораторних досліджень процесу розпилювання мастила (рис. 10).

Установка працює на стисненому повітрі, тому для роботи їй потрібен

компресор, бажано з ресиверним балоном, щоб досягти стабільності та виключити можливість пульсуючої роботи форсунки.



Рис. 9. Розпилювальний клапан серії 1132330

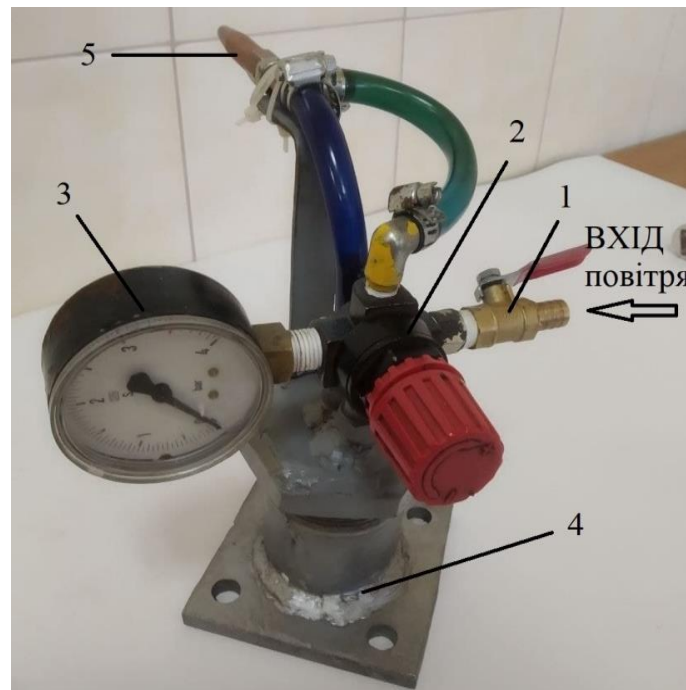


Рис. 10. Складові лабораторного пристрою для дослідження процесу розпилювання рейкозмащувального матеріалу:

1 – кульковий кран; 2 – редукційний клапан; 3 – манометр; 4 – бак; 5 – форсунка

Для підготовки такої установки до роботи потрібно:

- перевірити, чи закритий шаровий кран 1, якщо ні – закрити;
- відкрити кришку бака 4;
- заповнити бак мастильним матеріалом;
- закрити кришку;

- подати стиснене повітря до входу в систему;

- за допомогою редукційного клапана 2 відрегулювати тиск повітря в системі, контролюючи тиск за допомогою манометра 3.

Розглянемо принцип роботи форсунки більш детально на гідравлічній схемі (рис. 11).

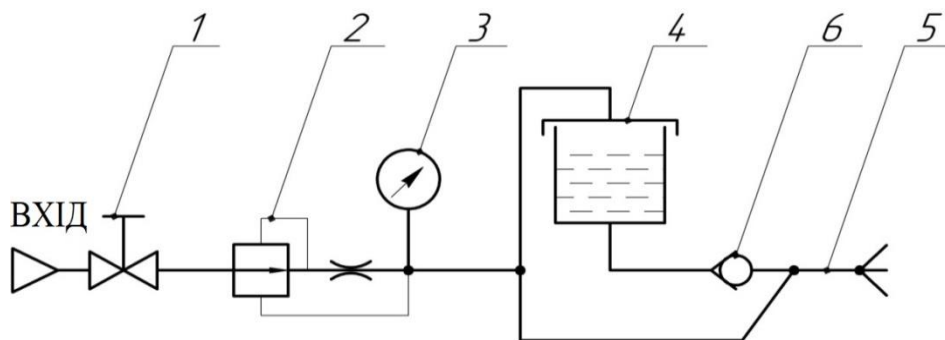


Рис. 11. Гідравлічна схема експериментальної установки для вивчення процесу розпилювання рейкозмащувального матеріалу

На вхід системи подають стиснене повітря від ресиверного балона компресора. Кульковий кран, зображений на позиції 1, призначений для регулювання тиску в системі, щоб завершити процес роботи чи додати мастильний матеріал у бак. Редукційний клапан 2 призначений для регулювання і стабілізації тиску повітря в експериментальній установці. Манометр 3 призначений для контролю тиску в системі. Потім потік стисненого повітря поділяється на два канали. Один канал веде безпосередньо до форсунки 5, а інший до бака 4 з мастильним матеріалом. Повітря тисне на мастило, тим самим витискає його з бака (незалежно від в'язкості рідини). Забір мастильного матеріалу відбувається з низу бака, це забезпечує стабільне подавання мастила. Мастило з бака подається на форсунку через зворотний клапан 6. Він призначений для запобігання самовільного витоку мастильної рідини з

баку. Мастило та повітря подається до форсунки 5, яка формує на виході мастильний аерозольний факел (рис. 12).

На рис. 12 зображено конструкцію форсунки, яка включає такі основні деталі: форсунку 1, у порожнині якої утворюється аерозоль; трубку 2 для подавання мастильної рідини до форсунки; контргайку 3 для формування факела аерозолю та фіксації форсунки; трійник 4 для змішування повітря та мастильної суміші.

Попередніми дослідженнями встановлено, що оптимальними параметрами такої установки є:

- тиск повітря – 0,5 МПа;
- витрати повітря – $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
- діапазон регулювання тиску повітря розпилювача – 0-0,5 МПа;
- вихідний діаметр сопла форсунки – 1-3 мм;
- вага пристрою – 1,5 кг.

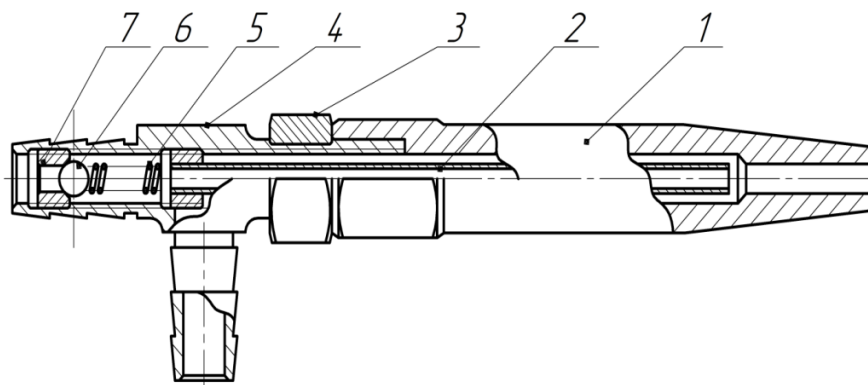


Рис. 12. Конструкція форсунки:

1 – форсунка; 2 – сопло; 3 – контргайка; 4 – трійник; 5 – пружина;
6 – кулька зворотного клапана; 7 – сідло клапана

Для проведення дослідів пристрій було закріплено на маніпулятор. Він забезпечив рівномірний хід пристрою. Мастильний матеріал наносили на ватман, що дало змогу наглядно побачити роботу форсунки за різних режимів подавання стисненого повітря в систему.

Ряд дослідів показав, що така установка добре розпилює як густу (наприклад Рельсол-ГС, Рельсол-М, Мариол-НТ), так і рідку рідину (РС-6 «В») залежно від підбраного тиску повітря та діаметра сопла форсунки.

На прикладі проведених дослідів на мастильній рідині типу РС-6 «В» (рис. 13) добре видно, що форсункою діаметром 1 мм і за тиску повітря 0,05 МПа аерозольне

розпилювання відбувається не рівномірно, а пульсуючи. За підвищеного тиску розпилювання стає рівномірним, пульсуючого ефекту нема, збільшується розмір факела аерозольного розпилювання. У разі застосування форсунки діаметром 3 мм і за тиску повітря 0,05 МПа аерозольне розпилювання відбувається більш рівномірно, але можна спостерігати хвиляподібні виступи на краях лінії факела розпилювання, що свідчить про невелику пульсацію. За підвищення тиску збільшується рівномірність розпилю. Результати показано на рис. 14. У табл. 3 наведено витрати мастильного матеріалу РС-6 «В» за різного подавання тиску повітря та різного діаметра сопла форсунки.

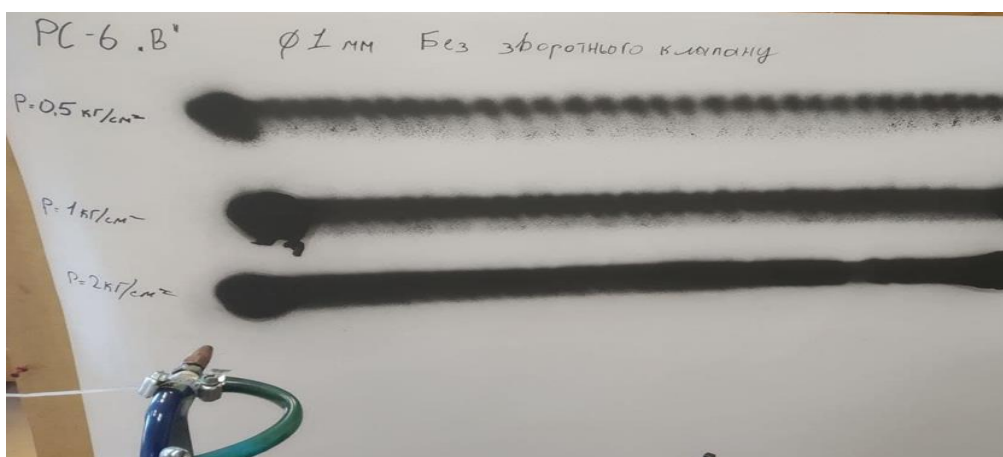


Рис. 13. Результати розпилювання форсунки діаметром 1 мм, РС-6 «В»

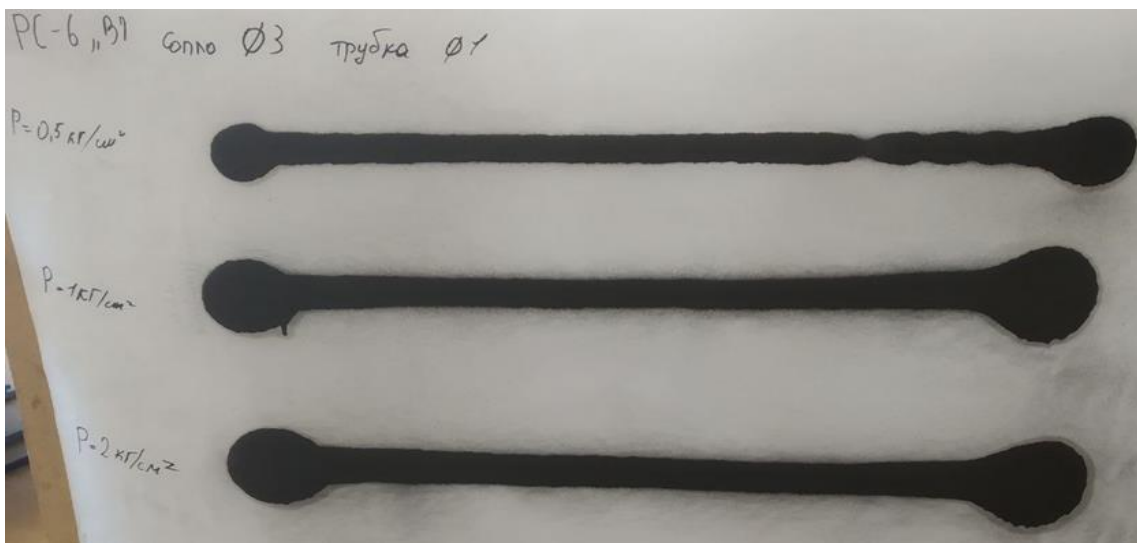




Рис. 14. Результати розпилювання форсунки діаметром 3 мм, РС-6 «В»

Таблиця 3

Витрати матеріалу залежно від тиску, мастило РС-6 «В»

Діаметр форсунки	Тиск повітря, МПа	Витрати мастила, кг/год
1 мм 	0,05	1,08
	0,1	2,16
	0,2	4,32
3 мм 	0,05	2,88
	0,1	5,76
	0,2	7,92

У дослідях із Рельсол-М застосовано форсунку діаметром 3 мм і тиск повітря 0,15 МПа, аерозольне розпилювання нерівномірне, є пульсуючий ефект. За збільшення тиску повітря лінія мащення стає рівномірною, факел розпилювання збільшується.

У дослідях із Рельсол-ГС застосовано форсунку діаметром 3 мм і тиск повітря 0,15 МПа, аерозольне розпилювання рівномірне, відсутній пульсуючий ефект, ширина лінії незмінна. Підвищення тиску лише збільшує товщину нанесеного шару.

У дослідях із Mariol-NT застосовано форсунку діаметром 3 мм і тиск повітря 0,15 МПа, аерозольне розпилювання рівномірне, відсутній пульсуючий ефект, ширина лінії незмінна. Підвищення тиску лише збільшує товщину нанесеного шару.

У табл. 4 наведено витрати мастильних матеріалів Рельсол-ГС, Рельсол-М, Mariol-NT за різного подавання тиску повітря та діаметра сопла форсунки 3 мм.

На рис. 15 (а – РС-6 «В»; б – Рельсол-ГС, Рельсол-М, Mariol-NT) наведено графіки залежності витрат мастильного матеріалу за зміни тиску повітря.

Таблиця 4

Витрати матеріалу залежно від силу тиску, мастила Рельсол-ГС, Рельсол-М, Mariol-NT

Масильний матеріал	Тиск повітря, МПа	Витрати мастила, кг/год
Рельсол – М	0,15	0,15
	0,2	0,180
	0,3	0,54
	0,4	0,72
Рельсол – ГС	0,15	0,06
	0,2	0,24
	0,3	0,36
	0,4	0,48
Mariol – NT	0,15	0,072
	0,2	0,24
	0,3	0,48
	0,4	0,72

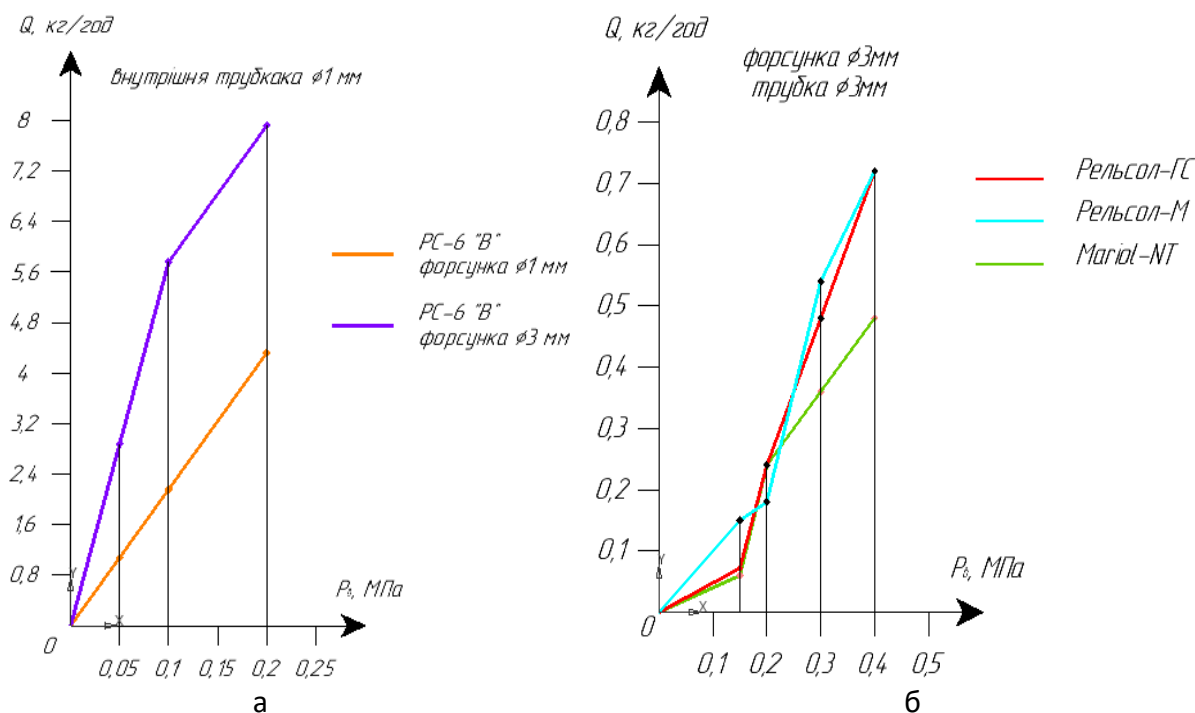


Рис. 15. Графік залежності витрат масильного матеріалу

Висновки. Проведений огляд та аналіз конструкцій рейко- та гребенезмащувальних пристроїв показав, що серед розмаїття механізмів і пристосувань нема таких, щоб відповідали

вимогам економічного та достатнього нанесення масильних матеріалів за пересування потягів із різними швидкостями, тому запропоновано нову конструкцію рейкозмащувача, яка може

працювати як із рідкими, так і густими мастильними матеріалами. Досліджено процес мащення рейок різними форсунками з різними мастильними матеріалами, розроблено методику та засоби для вимірювання основних параметрів нової конструкції розпилювача, проведено вимірювання витрат мастила, розміру

факела та швидкості пересування розпилювача, витрат стисненого повітря. Розроблено експериментальний стенд для проведення базових вимірювань. Проведені дослідження дали змогу встановити оптимальні параметри конструкції та умови розпилювання мастильних матеріалів з урахуванням швидкості потяга.

Список використаних джерел

1. Gang Shen, Xiaobo Zhong. Implementations of newly developed wheel and rail profile design methods. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. Vol. 1. Iss. 3. 2014. P. 221-227. URL: [https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30105-7](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30105-7) (дата звернення 13.09.2023).
2. Jianxi Wang, Zhiqiang Ren, Jinjie Chen, Long Chen. Study on rail profile optimization based on the nonlinear relationship between profile and wear rate. *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 2017. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/6956514> (дата звернення 17.10.2023).
3. Soleimani, H., Moavenian, M. Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue. *Urban Rail Transit* 3. 2017. P. 227–237. URL: <https://doi.org/10.1007/s40864-017-0072-2> (дата звернення 21.08.2023).
4. Anders Ekberg, Elena Kabo, Roger Lundén. Rail and wheel health management. *Wear*. 2023. Vol. 526–527. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204891> (дата звернення: 23.09.2023).
5. Радкевич А. В., Арбузов М. А., Губар О. В. Вдосконалення методики визначення приведенного зносу рейки. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. № 22. URL: <https://doi.org/10.15802/bttrp2022/268392> (дата звернення 27.09.2023).
6. Csontos G., Augusztinovicz F. & Bocz P. (2021). Optimal operation of a rail lubrication device with respect to noise reduction and wheel/rail friction coefficient. *Acta Technica Jaurinensis*. 14. № 2. P. 138–154. URL: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00592> (дата звернення 01.09.2023).
7. Ali Samet Ayvaz, Mohammad Alalou. Lubrication models in railway curves. *International journal of innovations in engineering research and technology*. 2021. Vol. 8. Iss. 4. P. 154-160. URL: <https://repo.ijert.org/index.php/ijert/article/view/2445> (дата звернення 10.10.2023).
8. Valeriy Kossov, Andrey Lunin, Andrey Spirov, Yury Panin, Natalja Ivaškovska, Aleksandrs Nikolajevs. The technology of rail lubrication by the hauling locomotive in train formation. *Procedia computer science*. 2019. Vol. 149. P. 331-335. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.144> (дата звернення 27.10.2023).
9. Баб'як М. О., Джус В. С., Шпира А. Т., Житков С. Б. Аналіз проблеми ефективної експлуатації рейкозмашувачів на львівській залізниці. *75 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 2015. С. 119. URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7075d3e6-a5bf-418a-b23c-013cd2a654ea/content> (дата звернення 16.09.2023).

10. Temple P., Harmon M., Lewis R., Burstow M., Temple B., Jones D. Optimisation of grease application to railway tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 232. Iss. 5. P. 1514-1527. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409717734681> (дата звернення 22.10.2023).
11. Geležinkelio įranga, jos dalys ir remontas. URL: <https://izovoltas.com/veiklos-sritys/gelezinkelio-iranga/> (дата звернення 21.07.2023).
12. SKF lubrication systems optimize tram operations. P. 4. URL: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680c5a59f/pdf_preview_medium/0901d19680c5a59f_pdf_preview_medium.pdf#cid-578207 (дата звернення 19.07.2023).
13. SP9-2-S7 - Vogel / SKF Spray nozzle for fluid grease - 0,05 cm³/Acutation. URL: <https://www.central-lubrication.com/SKF-Spray-nozzle-for-fluid-grease005-cml-Acutation> (дата звернення 19.07.2023).
14. SKF EasyRail Systemkomponenten Produktserien 112, PF, PER, LCG2. P. 19. URL: https://www.vogel-gruppe.de/fileadmin/user_upload/Schmiertechnik/SKF/Produkte/SKF-Produktserien_112_PF_PER_LCG2-Vogel-1-8092-DE.pdf (дата звернення 02.08.2023).
15. Wheel flange lubricators. URL: <https://www.secheron.com/products-solutions/ess/wheel-flange-lubricators/> (дата звернення 12.11.2023).
16. Система змащування гребенів коліс локомотивів СПП 12-5. URL: <https://uttm.com.ua/signal-2-9.html> (дата звернення 06.11.2023).
17. Інструкція з експлуатації СПП 01.00.00 PE. URL: https://www.uttm.com.ua/uploadfile/RE_2.pdf (дата звернення 06.11.2023).
18. Система змащування гребенів коліс локомотивів СПП 12-5. Принцип роботи. URL: <https://uttm.com.ua/constr-2.html> (дата звернення 06.11.2023).
19. Система змащування гребенів коліс локомотивів СПП 12-5. Склад системи. URL: <https://uttm.com.ua/products-2.html> (дата звернення 06.11.2023).
20. Train Sys-AL® druckluftlose Sprühanlage. URL: <https://igralub.com/wp-content/uploads/2022/11/201-Systeme.pdf> (дата звернення 19.10.2023).
21. SYSTEME Fahrzeug- und Schienen-Applikation. URL: <https://igralub.com/spruehsysteme-mobil/> (дата звернення 08.10.2023).
22. Dropsa spray valve for wheel flange lubrication. URL: <https://www.dropsa.com/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/EN/D/D.cf397917c25bdfcabdc4/P/BLOB%3AID%3D991/E/pdf?mode=download> (дата звернення 28.09.2023).
23. Spray Valve Serie 1132330. URL: <https://www.dropsa.com/en/valves-spray-nozzles/spray-valve-serie-1132330> (дата звернення 28.09.2023).

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Суранов Олексій Олексійович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Тел.: +38 (093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Гамора Віталій Олександрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-4150-8153.

Тел.: +38 (067) 69-72-112. E-mail: vitaligamora5912@gmail.com.

Стефанов Сергій Олександрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4686-1757.

Тел.: +38 (093) 69-58-907. E-mail: sergey_stefanov@ukr.net.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222.

Тел.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.

Тел.: +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Suranov Oleksii O. PhD (Tech.), Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Тел.: +38(093) 69-58-907.

E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Hamora Vitalii, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-4150-8153. Тел.: +38 (067) 69-72-112.

E-mail: vitaligamora5912@gmail.com.

Stefanov Sergii, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4686-1757. Тел.: +38 (093) 69-58-907.

E-mail: sergey_stefanov@ukr.net.

Статтю прийнято 29.04.2024 р.

УДК 621.869.4:656.212.6

МОДЕРНІЗАЦІЯ НАВІСНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ВАНТАЖІВ У КІПАХ

Кандидати техн. наук Л. М. Козар, Є. В. Романович, А. М. Кравець, А. О. Бабенко

HITCH DEVICE MODERNIZATION FOR TRANSLOADING OF BALE CARGO

Phd (Tech.) L. Kozar, Phd (Tech.) Y. Romanovych, Phd (Tech.) A. Kravets,
Phd (Tech.) A. Babenko

***Анотація.** У статті запропоновано модернізований навісний вантажозахоплювальний пристрій до універсального малогабаритного вилкового навантажувача. Пристрій є засобом механізації перевантаження вантажів у кіпах. Пристрій містить зіштовхувач, на якому змонтована рама з важільним притискачем і гідроциліндром. На вилах навантажувача встановлені візки, з'єднані з нерухомою плитою зіштовхувача обмежувачем важільного типу. Конструкція візка дає змогу підняти передній край кіпи, а потім вводити вили під вантаж. Пропонований пристрій здатний захоплювати кіпи, укладені в штабель без проміжків, і може бути використаний усередині критого вагона. Виведена математична залежність потрібного тягового зусилля навантажувача від геометричних параметрів візка.*

***Ключові слова:** вантаж у кіпах, вилковий навантажувач, вантажозахоплювальний пристрій, зіштовхувач, тягове зусилля.*

Abstract. The operation of unloading bales from a covered railway wagon is one of the most labor-intensive and dangerous operations when transporting bale cargo. The article proposes a modernized outside-mounted load-handling device for a universal light-sized forklift. The device is a mechanical equipment for transloading of bale cargo. The device includes a push-pull attachment (a purchased part) on which a frame, a lever clamp and a hydraulic cylinder are mounted. Trolleys are installed on the forks of the loader. The trolley is equipped with a roller in the front part and a frame in the back part for longitudinal movement on the forks. The trolley also has a support for the movable pusher plate and a grip for lifting the front edge of the bale. The trolleys are connected to the stationary pusher plate by a lever-type limiter. Before the start of gripping, the forklift is tilted forward at an angle from 3 to 5°, the trolleys are in the most forward position and are supported by a pusher. In this case, the rollers are in the position where they have moved off the forks. By moving the forklift forward, the trolley grips are inserted under the bale. The pusher is brought into the folded state. The loader moves forward, the noses of the forks abut against the roller and it rolls onto the forks, lifting the front edge of the bale. The forks are fully inserted under the bale. The clamp comes into operation, holding the load on the forks. This allows the bales to be removed from the stack and transported. The trolley was designed using CAD KOMPAS-3D. The proposed device is capable of picking up bales stacked without gaps and can be used inside a covered railway wagon. Commonly used side-clamp devices are not capable of this. The mathematical relation of the required traction force of the loader on the geometric parameters of the trolley is derived. It has been established that the required traction force is 60 to 70 % of the maximum traction force achieved by light-sized forklifts with a lifting capacity of 1000 kg.

Keywords: bale cargo, forklift, load-handling device, push-pull attachment, traction force.

Вступ. Частка тарно-штучних вантажів (ТШВ) у загальному обсязі вантажних перевезень залізничним транспортом України з 2019 року коливається в межах від 46 до 52 %, для автомобільного транспорту цей показник – від 23 до 31 % [1]. До ТШВ належать і вантажі в кіпах. У логістиці кіпа – вантаж у

вигляді спресованої маси, оббитий мішковиною і стягнутий мотузкою, металевою стрічкою (дротом) [2]. Таким вантажем може бути бавовна, хімічне волокно, вовна, вата, джутова тканина, вторинна сировина (ганчір'я) тощо. У статті для прикладу розглянуто кіпи бавовни (рис. 1).

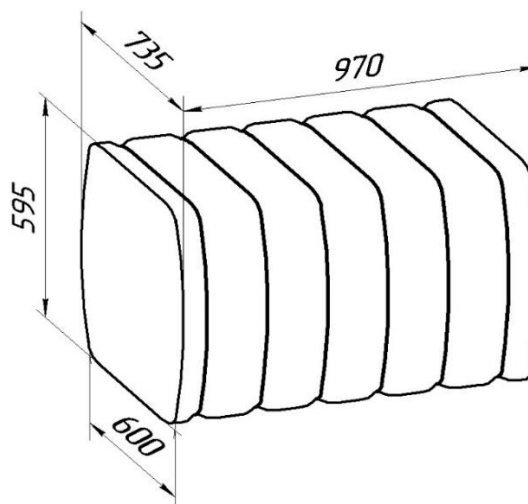


Рис. 1. Зовнішній вигляд і розміри кіпи бавовни

Розміри кіп бавовни встановлені ГОСТ 3152–79, чинність якого в Україні скасовано 01 січня 2018 року без прийняття стандарту на заміну до цього часу. Наприклад, у Республіці Узбекистан, звідки надходить бавовна в Україну, чинним є стандарт Oz DSt 3152-97, на який посилаються автори статті [3].

Щодо перевезення вантажів у кіпах, то однією з найбільш трудомістких і небезпечних є операція вивантаження кіп із критого універсального вагона. Ця операція ускладнена через те, що вантаж усередині вагона додатково ущільнюється через «набухання» кіп під впливом динамічних навантажень, які виникають під час руху поїзда.

Нині актуальним залишається завдання створення засобів механізації перевантаження кіп, які здатні надійно функціонувати в тісних умовах кузова критого вагона без пошкодження вантажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щодо перевезення кіп бавовни

залізничним транспортом, то важливим є питання оптимального використання вантажопідйомності та місткості вагона. Максимальні розміри нормальних стандартних кіп мають бути: поперечний переріз – 735×595 мм, довжина – 970 мм (рис. 1). Залежно від зусилля, що розвиває прес, маса кіпи може складати від 148 до 250 кг, а кількість поясів, які стягують кіпу, із дроту діаметром 4 мм або сталеві стрічки (площа перерізу 14 мм²) – від 4 до 12 [3].

Кіпи укладають у критому вагоні за різними схемами, що дає змогу досягти значення коефіцієнта об'ємного використання вагонів від 0,909 до 0,918. У критому вагоні з об'ємом кузова 120 м³ можна розмістити 183 кіпи. Рекомендовані проміжки: між суміжними кіпами – від 19 до 28 мм, між бічними гранями та торцями – не менше 20 мм [3].

Нині широко використовуваними є захоплювачі для кіп із бічними затискачами як навісне обладнання універсального навантажувача (рис. 2).



Рис. 2. Захоплювачі для кіп із бічними затискачами

Для визначення оптимальних параметрів універсальних вилових навантажувачів і їхнього навісного

обладнання нині широко використовують скінчено-елементне моделювання. З використанням системи автоматизованого

проектування SolidWorks встановлені напруження та прогини вил для різних режимів роботи. Встановлено, що для забезпечення міцності вил межа текучості сталі, з якої вони виготовлені, має бути не менше 360 МПа. Також розроблені рекомендації з запобігання втраті стійкості навантажувача на похилих ділянках із

урахуванням швидкості руху, маси вантажу та ухилу [4].

Скінчено-елементне моделювання дає змогу визначати раціональні параметри конструкції пристрою, але для отримання прийнятної точності значну увагу слід приділяти дискретизації області обчислення, тобто генеруванню тривимірної координатної сітки (рис. 3) [5].

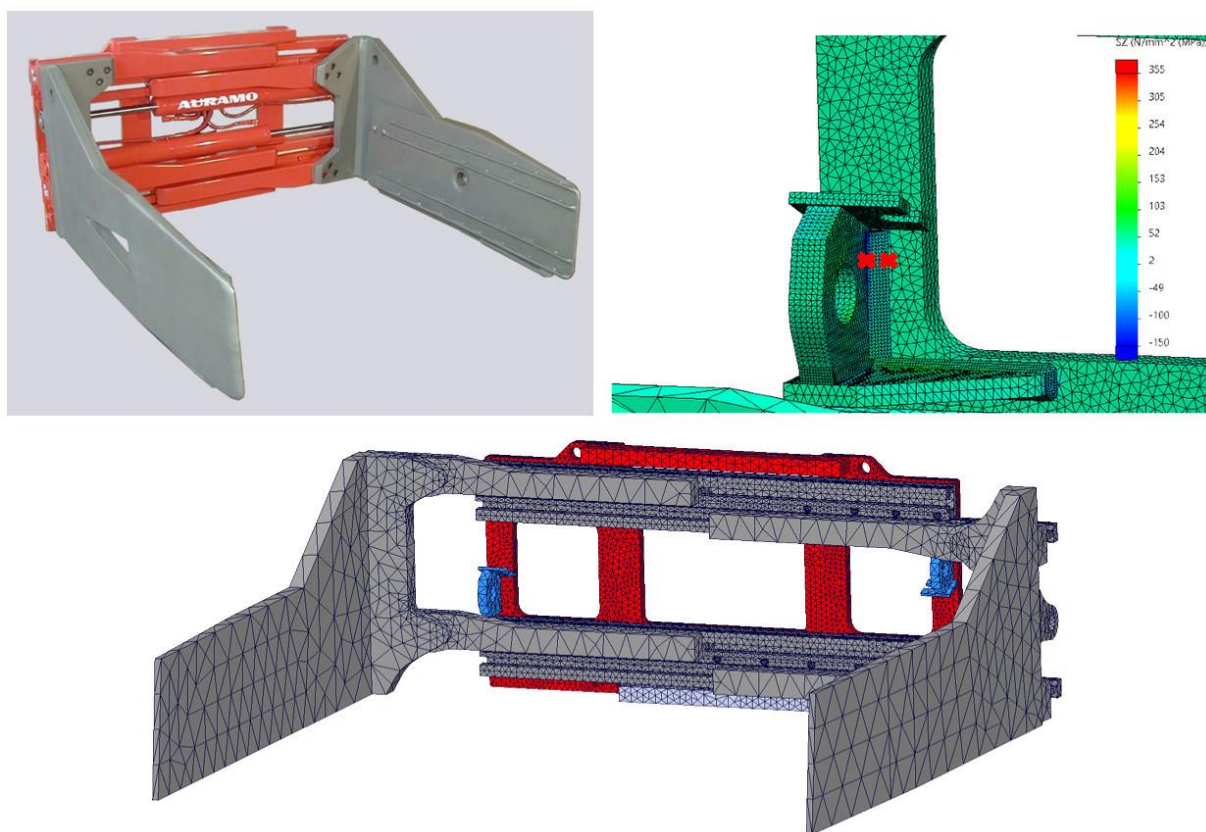


Рис. 3. Захоплювач для кіп і сітка його скінчено-елементної моделі [5]

З використанням спеціалізованого програмного забезпечення NX 7.5 спроектовано вантажозахоплювальний пристрій для кіп, виходячи з необхідних параметрів (розміри кіпи, її вага, вантажопідйомність навантажувача) і умов експлуатації [6]. У статті [6] подано докладний опис алгоритму створення 3D-моделей вузлів і остаточного складання пристрою з використанням різних елементів керування NX 7.5.

Результати досліджень [4-6] можуть бути корисними для подальшого удосконалення пропонованого нами пристрою.

Розглянемо технічні рішення з удосконалення захоплювачів для кіп з бічними затискачами.

Запропоновано спосіб швидкого завантаження, розвантаження та переміщення вантажів правильної форми, у тому числі кіп бавовни, за допомогою вилкового навантажувача, оснащеного

захоплювачем із боковими затискачами. Маневруванням навантажувача, захопленням і встановленням вантажу в потрібне положення керує спеціальний модуль. Силу затискання вантажу також контролюють автоматично [7]. Незважаючи на перевагу за швидкістю здійснення операцій, недоліками цього технічного рішення можна вважати наявність додаткових сервоприводів, давачів, контролера, складність монтажу на наявних навантажувачах і порівняно великі матеріальні витрати.

Навісний захоплювальний пристрій для навантажувача [8] містить монтажну стійку, оснащену двома поворотними столами з бічними затискними вузлами, що приводять у дію гідроциліндри. Слід зазначити, що конструкція є доволі складною і має багато додаткових вузлів. Щогла багатофункційного вилкового навантажувача підвищеної прохідності [9] може нахилитися вперед на кут до 45° , що дає можливість здійснювати розвантаження без примусового зіштовхування. Головним корисним технічним ефектом, який дають запатентовані пристрої [8, 9], є здатність захоплювати різні вантажі, але розширення діапазону застосування пристрою не належить до завдань нашого дослідження.

Для підвищення рівня надійності утримання кіпи, зміцнення конструкції, запобігання виникненню тріщин у зоні шарнірів трубчастих бічних затискачів пропонувано додаткові елементи жорсткості у формі опор, рейок, кронштейнів і зворотний клапан у гідросистемі, який підтримує постійний тиск [10]. Для запобігання вислизанню вантажу внаслідок недостатньої сили тертя між вантажем і бічними затискачами у пристрої [11] передбачений гідравлічний клапан підтримання тиску. Такі рішення є актуальними в тому випадку, коли вантаж знизу не підтриманий вилами.

Пристрій [12] містить основну раму з вертикальними напрямними. Підйомна рама з горизонтальними напрямними

встановлена з можливістю вертикального переміщення по напрямних основної рами за допомогою гідроциліндра. Підвісний телескопічний механізм із бічними затискачами здатний переміщуватися по напрямних підйомної рами вздовж осі навантажувача і обертатися навколо вертикальної осі. Така конструкція дає змогу захоплювати кіпи на різній висоті, під різними кутами їх розташування в горизонтальній площині з наступним їхнім орієнтуванням у потрібне положення. На нашу думку, недоліками цього запатентованого пристрою є неможливість захоплення кіпи, розташованої близько до стелі та дублювання основною рамою функцій механізму піднімання навантажувача.

На каретці навантажувача для кіп бавовни або подібних вантажів встановлені піддони з приводом повороту у площині, перпендикулярній до повздовжньої осі навантажувача [13]. Конструкція дає змогу орієнтувати кіпи в положення штабелювання, а розвантажувати піддони під дією гравітації. Для нас суттєвим недоліком цього технічного рішення є відсутність механізму затискання вантажу, що виключає можливість вилучення кіп зі штабеля у вагоні.

Захоплювач для кіп [14] з одним приводом містить щонайменше два затискних елементи і одну частину, яка виступає і з'єднана з кожним затискним елементом. Конструкція частини, яка виступає, дає змогу заглиблювати її в кіпу під час використання і захоплювати одну або декілька кіп. Суттєвим недоліком подібних захоплювачів є необхідність порушення цілісності кіп.

Пристрій до вилкового навантажувача [15] містить жорстко закріплену на щоглі раму, до якої підвішений важільний механізм із бічними затискачами. Перевагою пристрою є простота його конструкції, вантаж затискається під дією власної ваги, але суттєвим для нас недоліком, як і у пристрої підвісного типу

[12], є потреба у просторі значної висоти над захоплюваним вантажем.

Усі розглянуті вище технічні рішення стосуються вантажозахоплювачів із бічними затискачами. Навантажувачу, оснащеному пристроєм цього типу, складно або взагалі неможливо здійснювати захоплення щільно укладених кіп всередині критого вагона. Тому детального розгляду заслуговує винахід [16], що стосується пристрою з верхнім притискачем (рис. 4). Навісне обладнання навантажувача містить важільний зіштовхувач 1, нерухома плита 5 якого навішена на плиту 2 вилкової каретки навантажувача. До рухомої плити 5 зіштовхувача шарнірно за допомогою повідків 6 прикріплені L-подібні двоплечі важелі 7 з пружинами 9. Двоплечі важелі 7 у нижній частині оснащені котками 8 для перекочування по вилах 4, а у верхній – роликками 10 для взаємодії з вантажем. На рухомій плиті 5 зіштовхувача встановлені керовані фіксатори 11, а на нерухомій плиті 3 змонтований притискач 13 з гідроциліндром 12 для приведення його в

дію. Така конструкція дає змогу швидко, без пошкодження захоплювати вантаж, щільно (без проміжків) укладений в штабель, у тому числі в критих залізничних вагонах.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення продуктивності універсального вилкового навантажувача за рахунок використання навісного обладнання, здатного захоплювати вантажі в кіпах, у тому числі всередині критого вагона.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- розробити конструкцію навісного вантажозахоплювального пристрою для кіп стандартних розмірів;

- вивести математичну залежність потрібного тягового зусилля навантажувача, необхідного для захоплення вантажу, від геометричних параметрів пропонованого пристрою;

- визначити потрібне тягове зусилля та порівняти його з тяговим зусиллям, яке розвивають наявні малогабаритні навантажувачі.

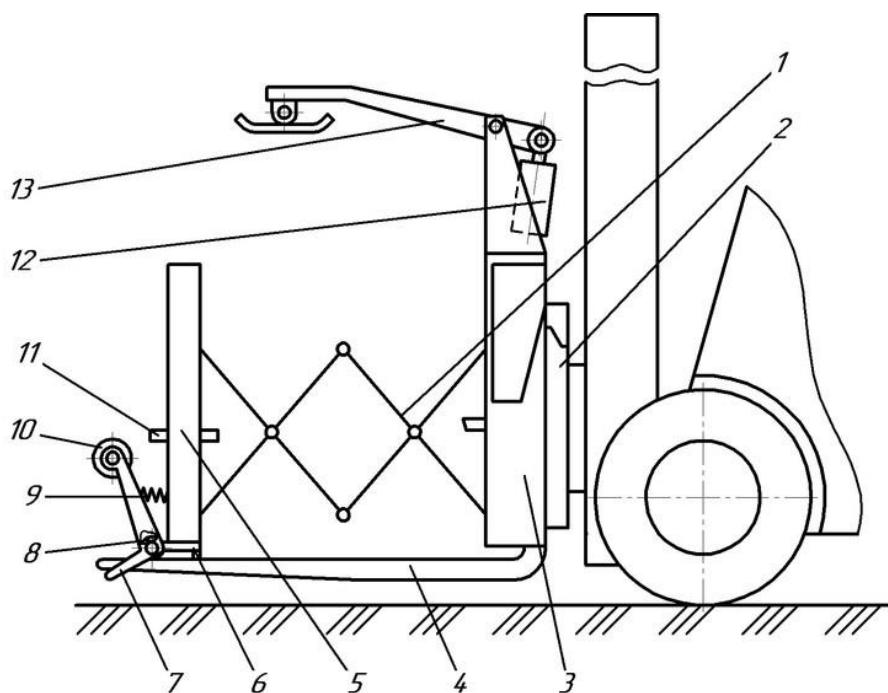


Рис. 4. Навісний пристрій до навантажувача для перевантаження вантажів у кіпах [15]

Основна частина дослідження. На початку розглянемо принцип роботи пристрою (рис. 4) за описом винаходу [16]. Навантажувач під'їжджає до штабеля кіп і вводить кінці вил 4 у штабель під нижню грань захопленої кіпи і незначно піднімає вантаж, створюючи проміжок. Перед початком захоплення кіпи зіштовхувач 1 знаходиться в складеному стані. Горизонтальні плечі L-подібних важелів 7 розташовані нижче верхньої грані вил 4 і підтримуються котками 8. За рахунок переміщення рухомої плити 5 горизонтальні плечі важелів 7 вводяться в проміжок між кіпами. Одночасно ролики 10 торкаються кіпи. Плита 5 рухається далі вперед, горизонтальні плечі важелів 7 підчіпляють кіпу і, повертаючись за рахунок взаємодії роликів 10 з поверхнею вантажу, піднімають передній край кіпи. З наступним рухом навантажувача вперед вантаж притискають до плити 5 важелі 7, які далі утримує фіксатор 11. Під вантажем утворився просвіт, достатній для введення вил. Рухом навантажувача вперед з одночасним складанням зіштовхувача 1 здійснюється повне введення вил під вантаж. Після повного складання зіштовхувача 1 фіксатор 11 звільняє важелі 7, і вантаж лягає на вили 4, після чого вони замикаються притискачем 13 за допомогою гідроциліндра 12. Повністю захоплені кіпи вилучаються зі штабеля і транспортуються до місця укладання, де за допомогою зіштовхувача 1 зсуваються з вил 4. Зіштовхувач 1 приводиться у складений стан і навантажувач переміщується до штабеля за новим вантажем.

У галузевій науково-дослідній лабораторії УкрДУЗТ «Механізація вантажно-розвантажувальних та шляхових робіт на залізничному транспорті» спроектований і виготовлений дослідний зразок пристрою [16] (рис. 4). Випробування показали недостатню ефективність його роботи. Двоплечі L-подібні важелі 7 не здатні підняти передній край кіпи на потрібну висоту, зокрема через її пружні

властивості. Крім того, у процесі введення вил треба узгоджувати рух навантажувача зі складанням зіштовхувача 1. Оскільки двоплечі важелі 7 закріплені на рухомій плиті 5 зіштовхувача 1 і мають опиратися своїми котками 8 на вили 4, це виключає можливість швидкої зміни відстані між вилами в разі потреби.

Ми пропонуємо модернізовану конструкцію пристрою (рис. 5), яка містить раму 1, змонтовану на нерухомій плиті 2 зіштовхувача 3 (покупного виробу). На рамі шарнірно встановлений важільний притискач 4 з гідроциліндром 5. Модернізація полягає в заміні двоплечих важелів візками 6. Візок містить лапу 7, коток 8 і упор 9 для рухомої плити 10 у передній частині та рамку 11 у задній частині. Візки мають можливість перекочуватись по вилах 12 і з'єднані з нерухомою плитою 2 обмежувачем 13 важільного типу. Шарніром, яким кріпиться обмежувач до візків є штанга 14, що проходить через обидва візки. Штанга 14 дає змогу легко пересувати візки поперек поздовжньої осі навантажувача за необхідності зміни відстані між вилами.

Роботу пристрою можна поділити на три етапи:

- етап 1 (рис. 5) – перед початком захоплення щогла навантажувача нахилена вперед на кут від 3 до 5°. Візки 6 приведені у крайнє переднє положення (наскільки дозволяє обмежувач 13) і підпираються рухомою плитою 10. При цьому котки 8 знаходяться в положенні, коли вони з'їхали з вил 12. Візки опираються на вили упорами 9. Рухом навантажувача вперед під кіпу вводять лапи 7;

- етап 2 (рис. 6) – зіштовхувач приводиться в повністю складений стан. Навантажувач рухається вперед, кінці вил впираються в ролик, і той накочується на вили, піднімаючи передній край кіпи;

- етап 3 (рис. 6) – вили вводять під вантаж до упору візків в плиту зіштовхувача. При цьому кут між верхньою гранню вил і нижньою гранню кіпи складає

близько $1,5^\circ$, що запобігає пошкодженню кіпи. Наприкінці вступає в роботу притискач, після чого вантаж захоплений і готовий до транспортування.

Візок пропонованого пристрою спроектований нами з використанням САПР КОМПАС-3D (рис. 7).

Щодо пропонованої конструкції візка, то важливим є питання визначення потрібного тягового зусилля навантажувача для накочування котка на вили на першому етапі захоплювання вантажу. У розрахунко-

вій схемі (рис. 8) приймаємо такі припущення:

1) силами опору руху навантажувача є горизонтальна проєкція нормальної сили P , прикладеної в точці контакту вил із котком візка, і сила тертя між кіпами, яка виникає через те, що в процесі піднімання переднього краю нижньої кіпи, верхня кіпа зсувається (рис. 6). Рештою сил нехтуємо;

2) вважаємо, що вісь котка лежить у площині, якій належить нижня грань кіпи;

3) кутом нахилу кіп, який складає приблизно 5° (рис. 6), нехтуємо.

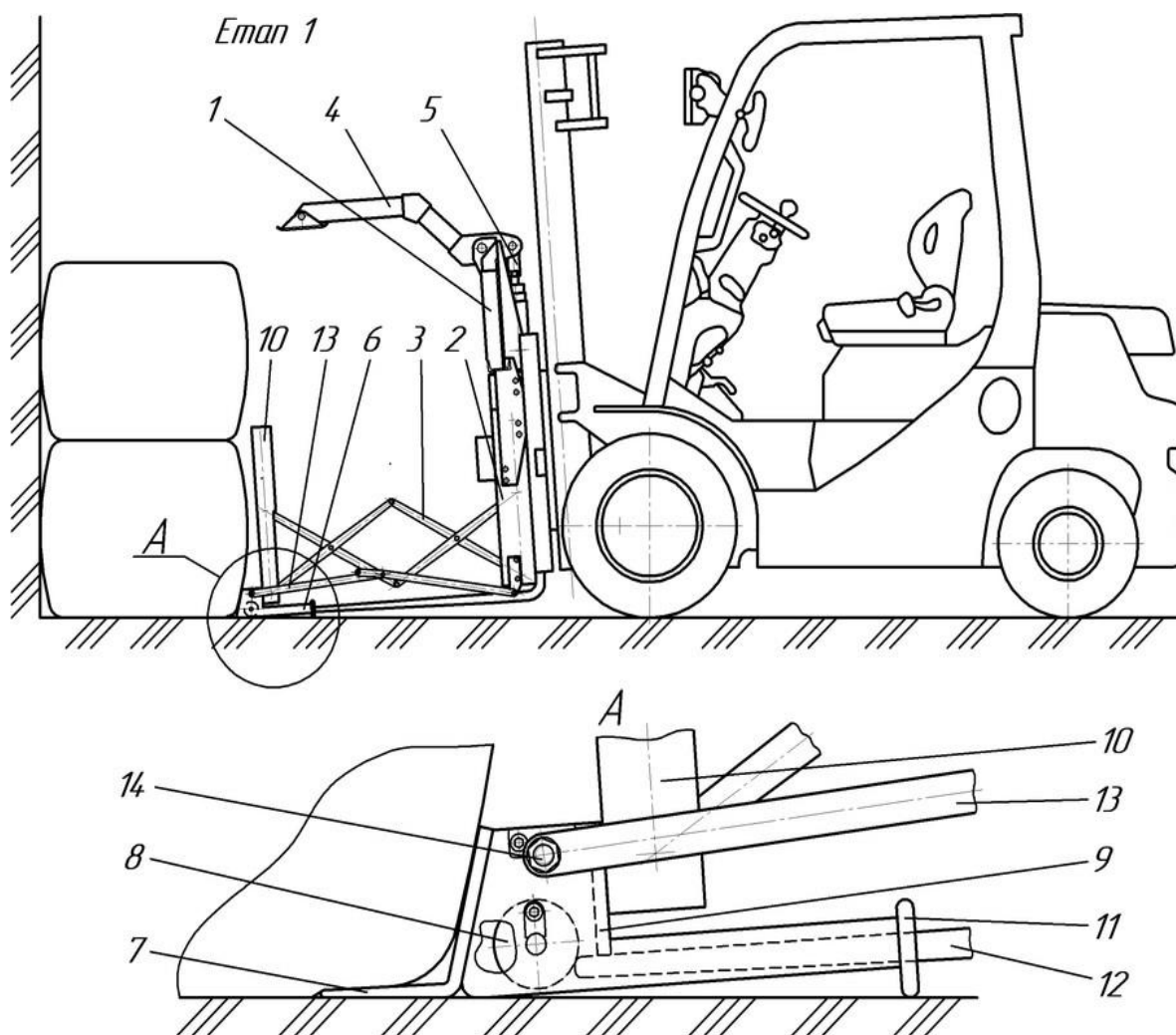


Рис. 5. Пропонована конструкція навісного пристрою (етап 1 захоплювання вантажу)

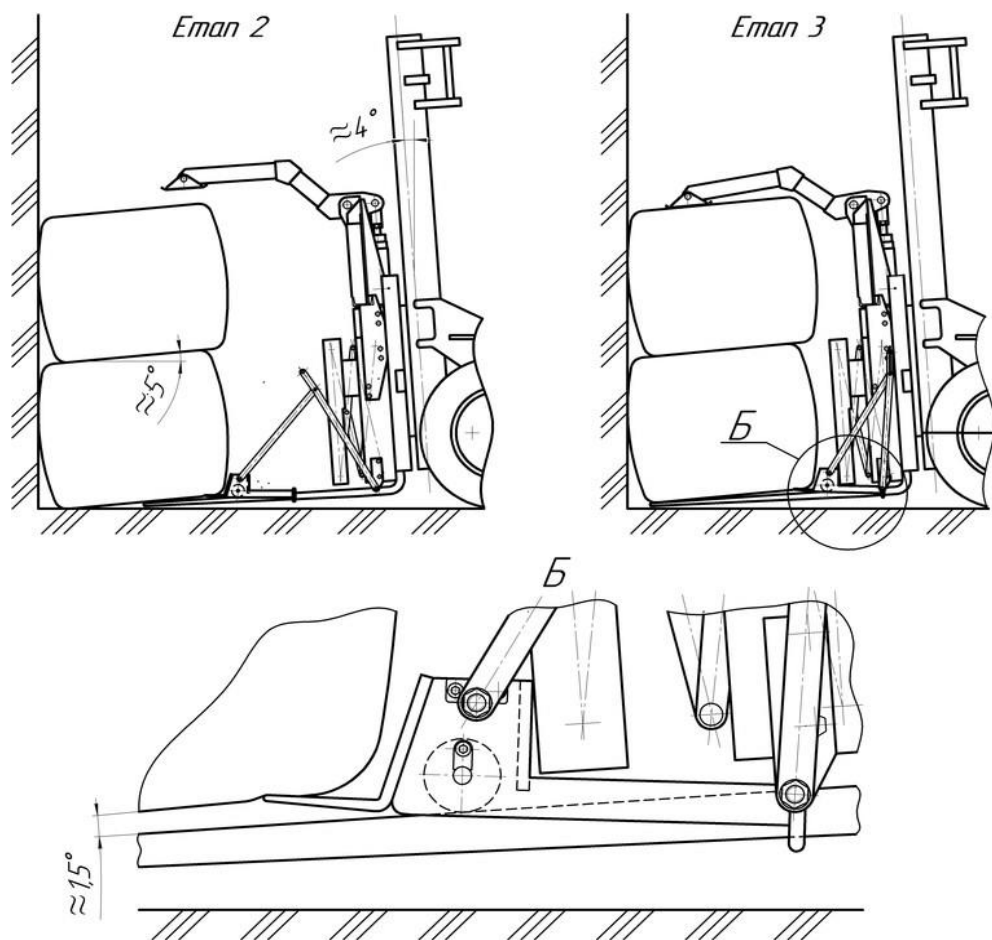


Рис. 6. Етапи 2 і 3 захоплення вантажу пропонованим пристроєм

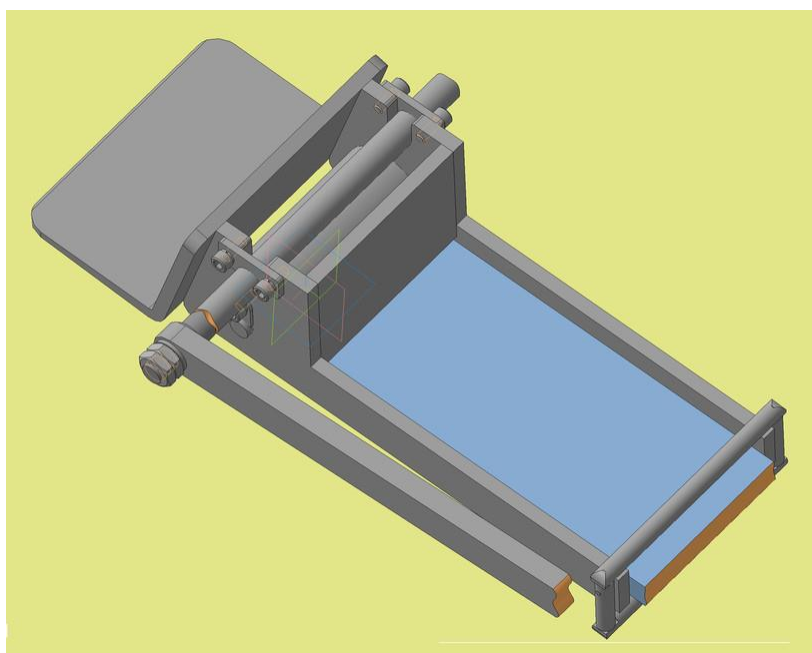


Рис. 7. Спроектований візок пропонованого пристрою

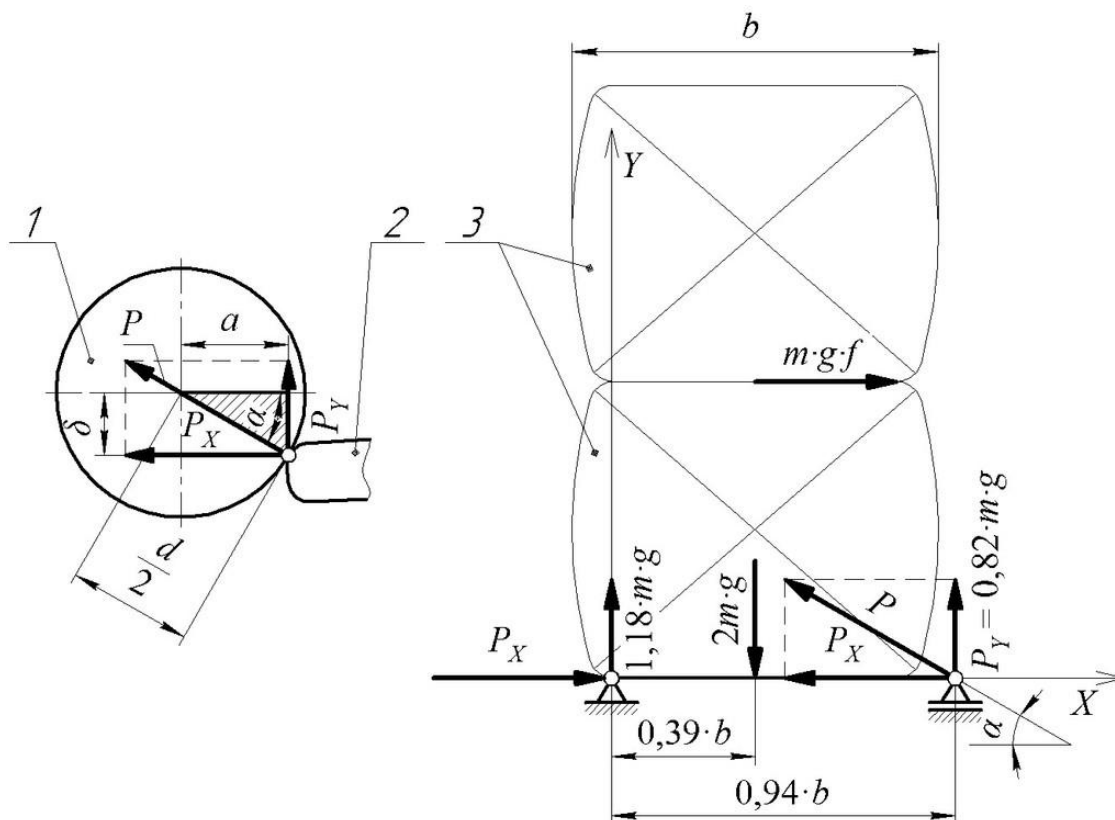


Рис. 8. Розрахункова схема для визначення потрібного тягового зусилля навантажувача:
1 – коток візка; 2 – вили навантажувача; 3 – кіпа

За схемою сил (рис. 8),

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_Y}{P_X}, \quad (1)$$

де P_Y , – вертикальна проєкція нормальної сили P , прикладеної в точці контакту вил із котком, Н;

P_X – горизонтальна проєкція сили P (тягове зусилля навантажувача), Н.

Із заштрихованого трикутника (рис. 8),

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta}{a}, \quad (2)$$

де δ – відстань між горизонталлю, яка проходить через вісь котка, і горизонталлю, яка проходить через точку його контакту з вилами, м;

a – відстань між вертикаллю, яка проходить через вісь котка, і вертикаллю, яка проходить через точку його контакту з вилами, м,

$$a = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2}, \quad (3)$$

де d – діаметр котка, м.

Після підстановки формули (3) у формулу (2) отримаємо

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2}}. \quad (4)$$

Прирівняємо формули (1) і (4):

$$\frac{P_Y}{P_X} = \frac{\delta}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2}}, \quad (5)$$

звідки

$$P_X = \frac{P_Y}{\delta} \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2}. \quad (6)$$

Прийнявши за розрахункову схему статично визначувану балку на двох опорах за відомих співвідношень плечей сил, маємо (рис. 8)

$$P_Y = 0,82 \cdot m \cdot g, \quad (7)$$

де m – маса кіпи, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$$P_{\text{потр.}} = \frac{0,82 \cdot m \cdot g}{\delta} \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2} + m \cdot g \cdot f \quad (9)$$

або

$$P_{\text{потр.}} = m \cdot g \cdot \left(\frac{0,82}{\delta} \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2} + f \right), \quad (10)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання між кіпами.

Результати розрахунків за формулою (10) показали, що потрібне тягове зусилля для введення вил на початковому етапі захоплення двох кіп із максимально можливою масою 250 кг кожна складає 4200 Н. Це становить від 60 до 70 % максимального тягового зусилля, яке розвивають малогабаритні вилкові навантажувачі вантажопідйомністю 1000 кг, здатні працювати всередині критого вагона.

Висновки. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- розроблено модернізовану конструкцію засобу механізації вантажно-розвантажувальних робіт. Пропонований пристрій, навішений на універсальний малогабаритний вилковий навантажувач, дає змогу захоплювати кіпи стандартних

Підставивши формулу (7) у формулу (6), отримаємо потрібне тягове зусилля навантажувача, необхідне для накочування ролика на вили (подолання ваги кіп), Н,

$$P_X = \frac{0,82 \cdot m \cdot g}{\delta} \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \delta^2}. \quad (8)$$

Остаточно потрібне тягове зусилля навантажувача для накочування котка на вили на першому етапі захоплення вантажу з урахуванням сили тертя між кіпами (рис. 8)

розмірів, у тому числі всередині критого вагона;

- застосування візків у модернізованій конструкції замість двоплечих важелів дає змогу піднімати передній край кіпи на потрібну висоту на першому етапі захоплення, не потребує узгодження руху навантажувача зі складанням зіштовхувача і дає можливість швидко змінювати відстані між вилами в разі потреби;

- виведено математичну залежність потрібного тягового зусилля навантажувача, необхідного для введення вил, від геометричних параметрів візка пропонованого пристрою;

- визначено потрібне тягове зусилля, яке становить від 60 до 70 % максимального тягового зусилля, що розвивають

малогабаритні вилкові навантажувачі вантажопідйомністю 1000 кг;
- на відміну від широко розповсюджених пристроїв з бічними

затискачами, пропонований засіб механізації здатний захоплювати кіпи, укладені в штабель без проміжків.

Список використаних джерел

1. Шкурко Є. Л., Безклубна, Н. Л., Юрцева О. С. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку ринку перевезень тарно-штучних вантажів в Україні. *Науковий огляд*. 2022. № 1 (81). С. 6-17. DOI 10.26886/2311-4517.1(81)2022.1. URL: <https://naukajournal.org/index.php/naukajournal/article/view/2445> (дата звернення 31.03.2024).
2. Логістичний словник / Kyiv Logistics School (KLS). URL: <https://kyivlogisticsschool.com/news/rozpochinajte-tizhden-z-vivchennya-novih-terminiv-razom-z-cls/> (дата звернення 31.03.2024).
3. Усманов Д. А., Умарова М. О., Абдуллаева Д. Т., Рустамова М. М. Упаковка кип хлопка: технические нормы загрузки их в вагоны. *Universum: технические науки: электрон. междунар. науч. журн.* 2022. № 3 (96). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13295> (дата звернення 31.03.2024).
4. Jing Wu. Finite element analysis and simulation of cargo fork dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2419 (1). 012072. DOI: 10.1088/1742-6596/2419/1/012072. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2419/1/012072/pdf> (last access 31.03.2024).
5. Paavolainen M. Analysis of bale clamp frame: thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT. 2021. 68 p. URL: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/163312> (last access 31.03.2024).
6. Muscă, G. D., Căpățână, G. F., Potîrniche, M. A. Claw for round bales. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2022. Vol. XIV. № 2. P. 159–165. URL: https://ijmmt.ro/vol14no22022/17_Gina_Diana_Musc.pdf (last access 31.03.2024).
7. Method for quickly loading, unloading and transferring goods with regular shapes: пат. CN117263096A КНР. МПК (2006.01) B66F 17/00; B66F 9/075; B66F 9/18; B66F9/22; B66F9/24; № 202311017994.3; заявл. 14.08.2023; опубл. 22.12.2023. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089220336/publication/CN117263096A?q=pn%3DCN117263096A> (дата звернення 31.03.2024).
8. Soft package clamp forklift attachment: пат. CN116354273A КНР. МПК (2006.01) B66F 9/06; B66F 9/075; B66F 9/14; B66F 9/18; № 202310401301.4; заявл. 14.04.2023; опубл. 30.06.2023. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/086933345/publication/CN116354273A?q=pn%3DCN116354273A> (дата звернення 31.03.2024).
9. Multi-functional forklift: пат. CN205398016U КНР. МПК (2006.01) B66F 9/06; № 201620251999.1; заявл. 29.03.2016; опубл. 27.07.2016. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/056419844/publication/CN205398016U?q=pn%3DCN205398016U> (дата звернення 31.03.2024).
10. Bale tongs: пат. KR102463744B1. Південна Корея. МПК (2006.01); A0ID 87/12; A0IB 63/02; A01D 75/04; № 10-2022-0039035; заявл. 29.03.2022; опубл. 04.11.2022. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/084045400/publication/KR102463744B1?q=pn%3DKR102463744B1> (дата звернення 31.03.2024).
11. Bale clamp: пат. CN204356027U КНР. МПК (2006.01) B66F 9/18; № 201420765983.3; заявл. 04.12.2014; опубл. 27.05.2015. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/>

family/053257508/publication/ CN204356027U?q=pn%3DCN204356027U (дата звернення 31.03.2024).

12. Forklift attachment bale plucker: пат. CN212954193U КНР. МПК (2006.01) B66F 9/075; B66F 9/18; № 202021145502.0; заявл. 18.06.2020; опубл. 13.04.2021. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/075387449/publication/CN212954193U?q=pn%3DCN212954193U> (дата звернення 31.03.2024).

13. Forklift truck: пат. CN107840276A КНР. МПК (2006.01) B66F 9/07; B66F 9/18; B66F 9/19; B66F 9/20; № 201711275474.7; заявл. 12.06.2017; опубл. 27.03.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/061664497/publication/CN107840276A?q=pn%3DCN107840276A> (дата звернення 31.03.2024).

14. Bale clamp: пат. AU 2013100455 A4 Австралія, МПК (2006.01) A01D 87/12; № 2013100455; заявл. 10.04.2013; опубл. 16.05.2013. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/048326785/publication/AU2013100455A4?q=pn%3DAU2013100455A4> (дата звернення 31.03.2024).

15. Притискний пристрій до вилкового навантажувача: пат. 40649 Україна, МПК B66F 9/18; B66F 9/12; № 96124701; заявл. 17.12.1996; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7. URL: <https://uapatents.com/3-40649-pritisknijj-pristriij-do-vilkovogo-navantazhuvacha.html> (дата звернення 31.03.2024).

16. А. с. 1791371 СССР, МКИ³ В 66 F 9/12. Навесное устройство к погрузчику для перегрузки грузов в кипах / А. И. Гребцов, И. А. Деркач, Ю. И. Ивашко, Н. Г. Стогний; Харьк. ин-т инженеров ж.-д. трансп. № 4882036/11; заявл. 14.11.90; опубл. 30.01.93, Бюл. № 4. URL: <https://patents.su/?search=1791371&type=number> (дата звернення 31.03.2024).

Козар Леонід Михайлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Тел.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: leokozar@gmail.com.

Романович Євгеній Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Тел.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net.

Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково дослідної частини, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3251-6576. Тел.: +38 (050) 503-98-23. E-mail: kravets_am@ukr.net.

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Тел.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Leonid Kozar, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3740-6966. Tel.: +38 (050) 302-42-75. E-mail: leokozar@gmail.com.

Romanovych Yevhenii, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2555-5849. Tel.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net.

Andrii Kravets, Leading Researcher of the Scientific Research Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3251-6576. Tel.: +38 (050) 503-98-23. E-mail: kravets_am@ukr.net.

Andrii Babenko, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Tel.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko_ngkg@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 07.05.2024 р.

УДК 621.651

**МЕТОДИКА ТА ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕСУРСУ
АКСІАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНИХ ГІДРОМАШИН МОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

Д-р техн. наук С. В. Воронін, канд. техн. наук В. О. Стефанов,
аспіранти Р. С. Васянович, Т. В. Трифонов, магістр С. О. Півоваров

**METHODOLOGY AND EXAMPLE OF CALCULATING THE RATIONAL RESOURCE
OF AXIAL-PISTON HYDRAULIC MACHINES OF MOBILE EQUIPMENT**

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Stefanov, postgraduate student R. Vasianovych,
postgraduate student T. Tryfonov, master S. Pivovarov

***Анотація.** У статті наведено методику розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин мобільної техніки, що побудована на основі вибраної моделі оптимізації довговічності простих технічних систем і враховує закономірності зношування плунжерних пар і залежності для розрахунку сумарного граничного зносу. Також наведено результати порівняльного розрахунку раціонального ресурсу регульованого аксіально-плунжерного насоса гідравлічної системи одноковшового екскаватора для двох рівнів протизношувальної властивості оливи.*

***Ключові слова:** аксіально-плунжерна гідромашина, зношування, технічне обслуговування, питомі витрати, раціональний ресурс.*

***Abstract.** The article analyzes approaches for creating models for optimizing the durability of mobile machine units. On the basis of the selected model, in which the target function is the total specific costs of purchasing the machine and the costs of maintaining its working condition, a method of calculating the rational resource of axial-plunger hydraulic machines has been developed for the condition when the resource of the hydraulic machine is limited by the resource of only its plunger pairs. The methodology, built on the basis of the chosen model for optimizing the durability of simple technical systems, takes into account the patterns of wear of plunger pairs under certain operating conditions, and also takes into account the proposed dependencies for calculating their total wear limit. The methodology consists of five consecutive operations, namely: determining the total marginal wear; obtaining experimental patterns of wear of plunger pairs over time in the form of regression equations; calculation of the number and periodicity of technical maintenance of the hydraulic machine for the inter-repair cycle; calculation of the rational resource of the hydraulic machine.*

The results of the comparative calculation of the rational resource of the adjustable axial-plunger pump 321.224 of the hydraulic system of the single-bucket excavator EO-3323 according to the developed method are also given.

The total marginal wear of the pump was determined according to the criterion of reducing its efficiency, namely from the condition of a drop due to the wear of its volume coefficient of useful action by 30 %.

To obtain the patterns of wear of the pump's plunger pairs, the results of previous operational tests of the pump were used for two variants of its lubrication: lubrication with ordinary hydraulic oil and lubrication with oil whose anti-wear properties are activated by an external electric field.

Specific costs for the purchase of the pump, which are included in the durability optimization model in the form of depreciation deductions, were calculated for the inter-repair cycle. The specific costs of maintaining the working condition of the pump were equal to the costs of its maintenance, during which hydraulic oil and filters are replaced, that is, the pattern of wear of plunger pairs is returned to the starting point.

Keywords: axial-plunger machine, wear, technical maintenance, specific costs, rational resource.

Вступ. Аксіально-плунжерні гідромашини (АПП), насоси і гідромотори обертової дії з поступовим рухом плунжерів набули широкого застосування в силових передачах енергонасичених мобільних машин і пливних системах дизельних двигунів [1, 2]. Їхня надійність визначена конструктивними особливостями, режимами навантаження, якістю робочої рідини [1]. Унаслідок впливу великої кількості факторів прогнозування показників надійності АПП на етапі експлуатації є складним завданням, вирішення якого дасть змогу підвищити ефективність застосування машин та організації робіт з їхнього обслуговування і ремонтів, особливо за планово-попереджувальної системи.

Головним показником надійності АПП, що потребує прогнозування, є ресурс, який залежить від характеру розвитку зношування відповідальних деталей і встановлений по досягненню граничного зносу [1, 2]. За відомого значення граничного зносу ресурс обернено пропорційно залежить від швидкості зношування відповідальних деталей. Отже, одним із важливих завдань механіків є уповільнення зношування, наприклад, шляхом удосконалення системи технічного обслуговування (ТО) з одночасним покращенням якості мастильних матеріалів і фільтрувальних систем. З іншого боку, головною комерційною метою будь-якого експлуатуючого підприємства є забезпечення максимальної економічної ефективності, що суперечить прагненню до

максимального ресурсу машин. У такій ситуації йтиметься про поняття оптимального (або раціонального) ресурсу, по досягненні якого сумарні витрати на підтримку надійності агрегатів машин протягом життєвого циклу будуть мінімальними. Реалізація такого підходу потребує застосування моделей оптимізації довговічності машин, однак для виконання розрахунків за такими моделями часто невідомими є закономірності зношування АПП, які можуть бути отримані лише експериментальним шляхом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Усі моделі оптимізації довговічності засновані на аналізі цільових функцій, що встановлюють зв'язок критеріїв економічної ефективності з технічними показниками машини або окремого агрегату за обраної системи ТО. Економічними критеріями можуть бути загальні питомі експлуатаційні витрати [3, 4] або сукупний дохід від роботи машини, або її економічна ефективність за певних умов підтримання якості [5]. У будь-якому випадку ресурс технічної системи, як головний показник довговічності, набуває свого оптимального значення в точці мінімуму загальних питомих витрат на придбання машини та підтримку її працездатного стану, як показано на рис. 1.

Якщо за ресурс машини прийняти її напрацювання до капітального ремонту, як це запропоновано в роботах [3, 4], тоді цільову функцію питомих сумарних витрат можна подати як

$$\sum C = \left(\frac{C_{AM}}{T}\right) + \left(\frac{C_P + C_{MM}}{T} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{TOi}}{\tau_{TOi}}\right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де C_{AM} – середня величина амортизаційних відрахувань за один ремонтний цикл машини;

C_P – витрати на усунення відмов і несправностей у процесі ремонтів за один ремонтний цикл;

C_{MM} – витрати на компенсацію втрат внаслідок зниження продуктивності та збільшення витрат на ММ при зношуванні

головних конструктивних вузлів машини протягом одного ремонтного циклу;

T – періодичність виконання капітального ремонту (ресурс);

C_{TOi} – витрати на технічне обслуговування за видами;

τ_{TOi} – періодичність проведення технічного обслуговування;

n – кількість технічних обслуговувань за міжремонтний цикл.

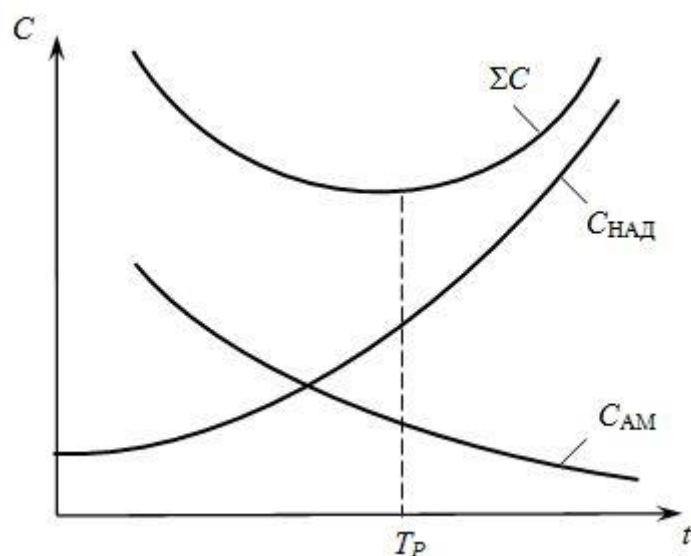


Рис. 1. Визначення раціонального ресурсу за питомими витратами [2, 3]:
 ΣC – загальні питомі витрати; $C_{НАД}$ – питомі витрати на підтримку працездатного стану;
 C_{AM} – питомі витрати на придбання (амортизація)

Досвід експлуатації парків машин різного призначення показав, що дійсні закономірності зношування їх АПГ на стадії нормальної роботи мають різний характер, за якого знос ΔU_i за малий проміжок часу $\Delta t_i < \Delta t$ зростає як лінійно, так і нелінійно, тобто коли швидкість зношування $V_U \neq const$ або $V_U = f(t)$. На рис. 2 наведені приклади таких закономірностей [6, 7].

Імовірність розвитку зношування за кожною з наведених на рис. 2 закономірностей залежить від конструкції та умов роботи агрегату. Однак найбільш типовою [1, 7] для деталей АПГ є ступенева залежність 4, яку можна записати так:

$$U(t) = U_{II} + bt^\alpha, \quad (2)$$

де U_{II} – початковий знос;

α – безрозмірний показник ступеня за t ;

b – розмірний коефіцієнт, який за своїм фізичним змістом є швидкістю зношування, але лише у випадку, якщо $\alpha = 1$.

У цих же роботах був встановлений зв'язок між ресурсом і періодичністю виконання ТО, що є дуже важливим, оскільки саме ТО є операціями, спрямованими на підтримку надійності АПГ (заміна оливи, фільтрів, регулювання). Ця залежність за умови, що $U_{II} = 0$, має такий вигляд [7]:

$$T_p = \frac{U_{ГР}}{\Delta U_i} \cdot t_{ТО} = \frac{U_{ГР}}{bt_{ТО}^{\alpha-1}}, \quad (3)$$

де $U_{ГР}$ – граничний знос;
 $t_{ТО}$ – періодичність виконання ТО.

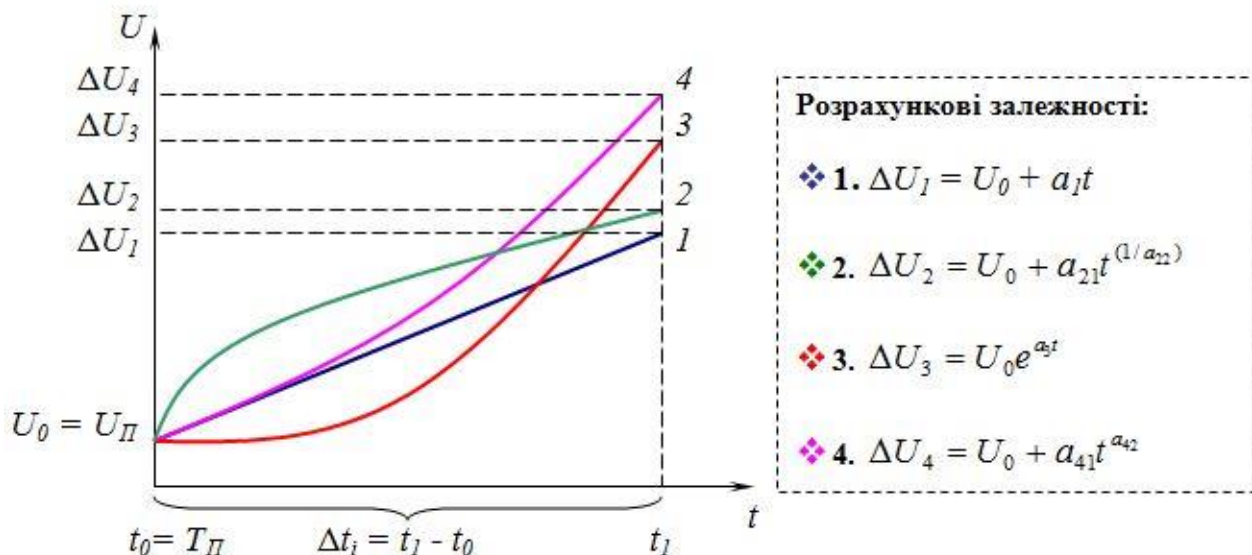


Рис. 2. Дійсні закономірності зношування на стадії нормальної роботи

Поєднання залежностей (1) і (3) у роботі [4] дало змогу отримати модель оптимізації довговічності для простих агрегатів, якими є АПГ, у вигляді такої системи рівнянь:

– раціональний ресурс T_p як добуток раціональної кількості n_p і періодичності $t_{ТОp}$ ТО:

$$T_p = n_p \cdot t_{ТОp}; \quad (4)$$

– раціональна кількість ТО:

$$n_p = \frac{\beta \cdot (\alpha - 1) \cdot C_{AM}}{C_{ТО} \cdot (\beta - 1)}; \quad (5)$$

– раціональна періодичність ТО:

$$t_{ТОp} = \left(\frac{U_{ГР}}{b \cdot n_p} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (6)$$

Залежності (4)-(6) були отримані з урахуванням таких припущень:

– витрати на ТО в період до капітального ремонту не залежать від періодичності його виконання і прийняті сталими;

– витрати на усунення відмов і несправностей не залежать від напрацювання на відмову та прийняті сталими на весь період до проведення капітального ремонту;

– ТО агрегатів із періодичністю $t_{ТОp}$ дає змогу відновити найбільш сприятливі умови зношування, які повертаються до початкових значень.

Наведена модель оптимізації довговічності (залежності (4)-(6)) буде застосована в цьому дослідженні для побудови методики розрахунку раціонального ресурсу АПГ.

Для проведення розрахунків за наведеною моделлю оптимізації невідомим залишається закономірність розвитку зносу деталей АПГ у часі, потрібна для

встановлення коефіцієнтів α та b . Для встановлення такої закономірності скористаємося результатами експлуатаційних випробувань АПГ, результати яких наведені в роботі [8].

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є розроблення методики розрахунку раціонального ресурсу АПГ на основі вибраної моделі оптимізації довговічності з урахуванням закономірностей зношування плунжерних пар за різних умов мащення.

Завданнями дослідження є:

- розроблення методики розрахунку раціонального ресурсу АПГ;
- проведення порівняльних розрахунків раціонального ресурсу на прикладі насоса 321.224 для різних закономірностей зношування;
- оцінювання впливу покращення якості оливи на величину раціонального ресурсу обраного насоса.

Методика розрахунку раціонального ресурсу АПГ. Методика заснована на моделі оптимізації довговічності (залежності (4)-(6)), враховує експериментальні закономірності зношування плунжерних пар у часі роботи і має таку послідовність дій:

1. *Визначення сумарного граничного зносу $U_{ГР}$.* Для АПГ граничний знос визначають за критерієм зменшення його ефективності, наприклад урахування лише зносу плунжерних пар, – граничний знос слід встановлювати за допустимим значенням об'ємного коефіцієнта корисної дії (ККД) $\eta_{ГР}$, оскільки його визначають через величину зазорів у плунжерних парах.

За умови рівномірного зношування всіх плунжерних пар сумарний граничний знос дорівнює

$$U_{ГР} = N_{ПЛ}(\delta_{ГР} - \delta_0), \quad (7)$$

де $N_{ПЛ}$ – кількість плунжерних пар;
 δ_0 – початковий зазор, м;
 $\delta_{ГР}$ – граничний зазор, м.

Зв'язок між граничним зазором та об'ємним ККД встановлений через величину витрат оливи за зазором $Q_{ВТ}$ на робочому ході плунжера. Об'ємний ККД насоса пов'язаний із витратами рідини в ньому такою залежністю:

$$\eta_{ОБ} = \frac{Q_{ПН}}{Q_0} = \frac{Q_0 - Q_{ВТ}}{Q_0} = 1 - \frac{Q_{ВТ}}{Q_0}, \quad (8)$$

де $Q_{ПН}$ – подавання насоса за номінального тиску та частотою обертів, м³/с;

Q_0 – подавання насоса за мінімального тиску в напірній магістралі та номінальною частотою обертів, м³/с.

За теорією кільцевих ущільнень [9] (власне, зазор у плунжерній парі є кільцевим ущільненням), існує такий зв'язок між витратами рідини та зазором:

$$Q_{ВТ} = \frac{\pi \cdot \kappa_e \cdot N_{ПЛ} \cdot \Delta p \cdot d_{ПЛ} \cdot \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot l_{ПЛ}}, \quad (9)$$

де κ_e – коефіцієнт, що враховує ексцентриситет розташування плунжера відносно осі отвору в блоці, $\kappa_e = 1,75$;

Δp – перепад тиску на насосі за номінальної частоти обертів, МПа;

$d_{ПЛ}$ – діаметр плунжера, м;

μ – динамічна в'язкість оливи, Па·с;

$l_{ПЛ}$ – середня довжина зазора, м.

Із залежностей (8) і (9) отримаємо зв'язок між зазором і ККД:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot Q_0 \cdot \mu \cdot l_{ПЛ}}{\pi \cdot \kappa_e \cdot N_{ПЛ} \cdot \Delta p \cdot d_{ПЛ}} (1 - \eta_{ОБ})}. \quad (10)$$

За залежністю (10) можна визначити значення початкового зазора та граничного зазора. Для цього необхідно замість $\eta_{об}$ підставити відповідні значення початкового та граничного ККД.

2. *Встановлення закономірності зношування плунжерних пар у часі.* Ця закономірність має бути встановлена у вигляді рівняння (2), однак для її практичного застосування слід мати функцію зносу в явному вигляді, тобто з визначеними значеннями коефіцієнтів α та b . Така закономірність може бути отримана лише експериментальним шляхом за проведення стендових або експлуатаційних випробувань АПГ.

3. *Розрахунок раціональної кількості ТО АПГ пр.* Розрахунок виконують за залежністю (5).

4. *Розрахунок раціональної періодичності ТО АПГ тто.* Розрахунок виконують за залежністю (6).

5. *Розрахунок раціонального ресурсу АПГ Тр.* Розрахунок виконують за залежністю (4).

За розробленою методикою проведено розрахунок раціонального ресурсу аксіально-плунжерного насоса марки 321.224, встановленого як основний агрегат гідравлічної системи екскаватора ЕО-3323. Як вихідні дані застосовували результати експлуатаційних випробувань насоса [8]. Зазначимо, що дані випробування були метою визначення впливу активації робочої рідини електричною обробкою, що призвело до уповільнення зменшення об'ємного ККД насоса внаслідок уповільнення зношування плунжерних пар. Отже, дані роботи [8] дали змогу виконати порівняльний розрахунок раціонального ресурсу насоса для двох фізичних станів робочої рідини: звичайної та активованої електричним полем.

Розрахунок виконували в послідовності, наведеній вище. Граничний знос насоса встановлювали за умови падіння його об'ємного ККД на 30 %. Він розрахований за залежністю (7) і має

однакове значення для обох варіантів експлуатації.

Закономірності зношування плунжерних пар насосу встановлювали перерахуванням вимірюваних у випробуваннях значень об'ємного ККД у значення сумарного зносу плунжерних пар на початку та наприкінці випробувань. Для цього використовували залежності (7) і (10). У результаті встановили такі закономірності зношування насоса:

– для варіанта 1 (робота на звичайній оливі)

$$U(t) = 0,0253 t^{1,13}; \quad (11)$$

– для варіанта 2 (робота на активованій оливі)

$$U(t) = 0,0159 t^{1,09}. \quad (12)$$

Остаточні результати розрахунку зведено в таблицю.

Розрахункові значення кількості обслуговувань, періодичності ТО та раціонального ресурсу АПГ отримані для двох варіантів якості робочої гідравлічної оливи. Значення раціонального ресурсу, особливо для варіанта 1, менші за паспортні значення міжремонтного циклу обраного насоса майже вдвічі. Це свідчить про те, що за штатної експлуатації насоса підприємство зазнає додаткових витрат на підтримку працездатного стану. Покращення якості оливи, наприклад її протизношувальних властивостей, шляхом електричної обробки підвищує раціональний ресурс насоса приблизно на 85 %, що підтверджує актуальність забезпечення якості оливи. Зазначимо, що за розрахунків амортизаційних відрахувань одноразові витрати на систему електричної обробки не враховували, але за відносно малої вартості такої системи результати розрахунків за варіантом 2 зміняться незначно.

Результати розрахунку ресурсу насоса

Номер з/п	Параметр	Значення параметра	
		Варіант 1 (звичайна олива)	Варіант 2 (активована олива)
1	2	3	4
Вихідні дані			
1	Амортизаційні відрахування C_{AM} , грн	5000	5000
2	Частка витрат (враховують лише витрати на ТО насоса від загальних) на виконання одного ТО $C_{ТО}$, грн	90	90
3	Коефіцієнти: - α - β - b	1,13 2,5 0,0253	1,09 2,5 0,0159
4	Граничний знос $U_{ГР}$, мкм	68,6	68,6
Розрахункові значення			
5	Кількість обслуговувань за раціональний ресурс n_p	12	8
6	Раціональна періодичність ТО $t_{ТОp}$, год	118	326
7	Раціональний ресурс T_p , год	1416	2608
Приріст раціонального ресурсу за використання електричної обробки оливи склав $\Delta T_p = 1192$ год			

Висновки

1. Розроблена методика розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин враховує модель оптимізації довговічності «простих» технічних систем, закономірності зношування відповідальних деталей, а також залежності для розрахунку їхнього граничного зносу.

2. Отримані розрахункові дані підтверджують можливість практичного застосування запропонованої методики визначення раціонального ресурсу АПГ.

Методика може бути застосована для всіх типів АПГ – гідравлічних насосів і моторів, насосів високого тиску паливних систем дизельних двигунів та інших аналогічних гідромашин.

3. За результатами порівняльного розрахунку підтверджено актуальність напрямів підвищення раціонального ресурсу АПГ шляхом покращення якості гідравлічних олив в експлуатаційних умовах, до яких належать електрична обробка, дозоване уведення присадок, очищування від механічних домішок і води.

Список використаних джерел

1. Фінкельштейн З. Л., Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів : навч. посіб. / за ред. П. М. Андренка. Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2014. 308 с.

2. Design and experimental studies of a novel double-row radial piston pump / Zh. Shengdun, T. Guo, Y. Yu and oth. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2015. Vol. 231(10). P. 1884–1896. DOI: 10.1177/0954406215623309.

3. Optimization maintenance performance level through collaboration of overall equipment effectiveness and machine reliability / F. Rahman, S. Sugiono, A. A. Sonief, O. Novareza. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20(3). P. 1-20. DOI: 10.5937/jaes0-35189.
 4. Шейнин А. М., Шейнин В. А. Алгоритмы и программы решения оптимальных задач надежности машин. Москва: МАДИ, 1981. 112 с.
 5. Farahani A., Tohidi H., Shoja A. An integrated optimization of quality control chart parameters and preventive maintenance using Markov chain. *Advances in Production Engineering & Management*. 2019. Vol. 14(1). P. 5–14. DOI: 10.14743/apem2019.1.307.
 6. Vukovic M., Murrenhoff H. The next generation of fluid power systems. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 106. P. 2-7. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.002.
 7. Зорин В. А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. Москва: Машиностроение, 1986. 248 с.
 8. Лисіков Є. М., Воронін С. В. Експлуатаційні випробування аксіально-поршневих насосів в умовах обробки РР зовнішнім ЕП. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2004. Вип. 58. С. 58-62.
 9. Lorenz B., Persson B. N. J. Leak rate of seals: Comparison of theory with experiment. *EPL (Europhysics Letters)*. 2009. Vol. 86(4):44006. DOI: 10.1209/0295-5075/86/44006.
-

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38(068)819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Васянович Роман Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-8582-151X. Тел.: +38(097)288-28-46. E-mail: vas.romuch@gmail.com.

Трифонов Тарас Вікторович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Тел.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Півоваров Сергій Олександрович, магістр з галузевого машинобудування. ORCID iD: 0009-0005-7813-3537. Тел.: +38(067)414-26-88. E-mail: pivovarov.s.ua@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech), associate professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Tel.: +38 (068)819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Vasianovych Roman, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-8582-151X. Tel.: +38(097)288-28-46. E-mail: vas.romuch@gmail.com.

Tryfonov Taras, postgraduate student, department of mechanical engineering and technical service of machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-1415-8767. Tel.: +38(050)401-45-48. E-mail: ttrifonov81.tt@gmail.com.

Pivovarov Sergii, master's degree in industrial mechanical engineering. ORCID iD: 0009-0005-7813-3537. Tel.: +38(067)414-26-88. E-mail: pivovarov.s.ua@gmail.com.

Статтю прийнято 14.05.2024 р.

УДК 621.78

ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРТЯ

Канд. техн. наук О. О. Волков, асп. Ж. В. Краєвська,
д-р техн. наук В. В. Субботіна, асп. О. В. Субботін, інж. Г. А. Федоренко

STRENGTHENING OF THE SURFACE BY FRICTION

PhD (Tech.) O. Volkov, postgraduate student Zh. Kraievska,
Dr. Sc. (Tech.) V. Subbotina, postgraduate student O. Subbotin,
engineer A. Fedorenko

***Анотація.** Дослідження присвячено використанню методу зміцнення поверхні за допомогою тертя. Метод дає змогу досягти високих значень твердості, міцності та зносостійкості матеріалів за короткий час і зі значно меншими витратами. Мета дослідження полягає у вивченні характеру зміцнення поверхні зразків із сталі за допомогою тертя. Зміцнений «білий» шар є однорідним на всій поверхні зразків.*

***Ключові слова:** тертя, термофрикційне оброблення, термофрикційне зміцнення, зразки, сталь 65Г, попереднє термічне оброблення, поверхневий зміцнений «білий» шар, мікротвердість, мікроструктура.*

***Abstract.** The study is devoted to the application of the method of surface hardening by friction
Object of study - the process of surface hardening by friction.*

Subject of study - samples of 65G steel the method allows achieving high values of hardness, strength and wear resistance of materials in a short time and at much lower cost compared to other processing methods. The aim and objectives of the study are to investigate the nature of surface hardening of steel samples by friction. To achieve this goal, the following tasks are envisaged: manufacturing samples from 65G steel in the form of plates, preliminary heat treatment of samples for their maximum thermal hardening, hardening of the surface of samples by friction, analysis of the microstructure and microhardness of each sample, comparison of the microstructure, microhardness and depth of hardening of these samples, conclusions on the influence of processing factors on the hardening result. Based on the experimental data obtained, we constructed graphs of microhardness changes in the cross-section of the samples and studied the microstructures. It can be seen that after friction treatment, a layer with a modified structure is formed in the surface of the samples. the microhardness of the surface is significantly higher (approximately 2 times) than the microhardness of the main part in the samples. Metallographic analysis has shown that the layer formed in the samples has a martensitic structure characterized by a higher degree of dispersion and microhardness compared to the martensitic structure obtained during the previous heat treatment. Changes in the microstructure and microhardness of the samples that were surface hardened using different processing modes were compared. Certain differences in the characteristics of their hardened «white» layers were found. It is also shown that the hardened «white» layer is located along the entire length of the surface in the samples and is continuous and homogeneous.

***Keywords:** friction, thermo-friction treatment, thermo-friction strengthening, samples, 65G steel, preliminary heat treatment, surface strengthening «white» layer, microhardness, microstructure.*

Вступ. В останні десятиліття розвиток технологій обробки матеріалів дав змогу створити різні методи обробки металів, серед яких важливе місце займає термомеханічне оброблення з використанням тертя (ТФЗ), за допомогою якого можна досягти високих значень твердості, міцності та зносостійкості матеріалів за короткий час і зі значно меншими витратами порівняно з іншими методами оброблення. Проте, залежно від характеру оброблення, може відбуватися різноманітне структуроутворення і, як результат, формуватися різні властивості.

Визначення мети та завдання дослідження – вивчення характеру зміцнення поверхні зразків із сталі за допомогою тертя. Для досягнення мети передбачені такі завдання: виготовлення зразків із сталі 65Г у вигляді пластин, проведення попереднього термічного оброблення зразків для їхнього максимального термічного зміцнення, зміцнення поверхні зразків за допомогою тертя, проведення аналізу мікроструктури та мікротвердості кожного зразка, проведення порівняння мікроструктури, мікротвердості та глибини зміцнення цих зразків, надання висновків щодо впливу факторів оброблення на результат зміцнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уже проведено ряд досліджень, у результаті яких виявлено різницю в структуроутворенні [1], проте в поверхні досліджених зразків і виробів спостерігається значне деформування матеріалу, що призводить до більш інтенсивного формування дрібнодисперсної мікроструктури, зокрема зерен ультрадрібних розмірів і навіть нанорозмірів, що супроводжено достатньо високими твердістю і міцністю. Отримані результати таких досліджень дають змогу більш точно налаштувати параметри термомеханічного та дотичних методів оброблення, що може допомогти поліпшити властивості виробів і забезпечити більш ефективне їх використання в різних галузях промисловості.

Науково-практичний напрям зміцнення поверхні є актуальним сьогодні, оскільки таке зміцнення може бути досягнуте за допомогою різних методів залежно від конкретних вимог та умов застосування.

Існує багато технологічних методів формування поверхневого зміцнення в металах і сплавах [2]. Так, механо-імпульсне оброблення високошвидкісним тертям, на відміну від інших методів інтенсивного деформування, дає змогу створювати дрібнодисперсні структури на поверхні деталі, виготовленої не тільки з м'яких сталевих матеріалів, а також високоміцних і тих, що важко деформовані. Деформований шар під час фрикційного зміцнення утворюється безпосередньо на поверхні матеріалу деталі та релаксується на певній глибині. Це відрізняє високошвидкісне тертя від обкочування або ударного зміцнювального оброблення, які ініціюють зони максимального контактного напруження на деякій глибині від поверхні, що може призводити до утворення підповерхневих тріщин.

Очевидно, що використання ТФО як саме методу зміцнення є актуальним нині питанням із широкою географією [3–8]. Показано, що енергію тертя використовують із різним ступенем інтенсивності і для вирішення різних технологічних питань. Акцентовано увагу, що тертя є потужним засобом розігрівання поверхні та може бути використане навіть для зварювання феритної нержавкої сталі [3], мідних листів [4], інших матеріалів. Показано, що при цьому відбувається зміна механічних властивостей по перерізу [5], що пояснюється високотемпературним розігріванням аж до температури плавлення і наступним охолодженням із певною швидкістю. Крім того, зміна механічних властивостей може бути викликана й деформацією певних структурних складових [6]. Зазначено, що для зміцнення поверхні використовують й інші альтернативні джерела, наприклад плазмові

оброблення, що дає змогу змінювати структуру поверхневого шару оброблюваних виробів [7], однак цей метод є більш витратним. Часто поверхнєве оброблення з застосуванням тертя та інших джерел енергії призводить до утворення в сталях та інших сплавах так званих поверхневих «білих» шарів [8]. Однак досі не існує однакової думки про природу та особливості саме зміцнення за термофрикційно-деформаційних методів оброблення поверхні.

У всіх описаних випадках на поверхні оброблюваного матеріалу з'являється білий шар, який ще досі не вивчений у повному обсязі та потребує детального дослідження.

Значний внесок у розвиток питань фрикційного оброблення матеріалів зробив М. Д. Кірик [9, 10].

Група дослідників під керівництвом О. В. Манько вивчала утворення «білого» шару при фрикційно-зміцнювальному обробленні тонких пластин, які є основою форми для багатьох видів поліграфічного інструменту. Показано [11], що сталь У8А, яку можна використовувати для такого інструменту, має високі показники зносостійкості. Проводили варіювання режимів зміцнення, що дало змогу отримати мікротвердість зміцненого шару 5–11 ГПа. У цій роботі зазначено, що структура

«білих» шарів являє собою механічну суміш мартенситу і залишкового аустеніту і має високу в'язкість за достатньої твердості. Також підкреслено, що природа утворення таких структур недостатньо зрозуміла, незважаючи на велику кількість проведених досліджень. Дослідження, відображені в роботі О. О. Волкова [12], дали змогу пояснити питання про структуроутворення та властивості в лійці сталей різного призначення та з різним хімічним складом.

Основна частина дослідження. У статті були досліджені зразки зі сталі 65Г, що належить до класу пружинних сталей. Вона є середньовуглецевою, низьколегованою сталлю, має високі механічні властивості, в першу чергу високі границі пружності і міцності, а також підвищену релаксаційну стійкість при достатній в'язкості пластичності [13].

Для експерименту були виготовлені два зразки зі сталі 65Г у вигляді пластин, у попередньому стані після гартування ($t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) і низькотемпературного відпускання ($t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$) з метою дослідження впливу факторів оброблення при зміцненні сталей шляхом ТФЗ.

ТФЗ проводили на плоскошліфувальному верстаті, на магнітній плиті якого фіксували зразки. Схема оброблення подана на рис. 1.

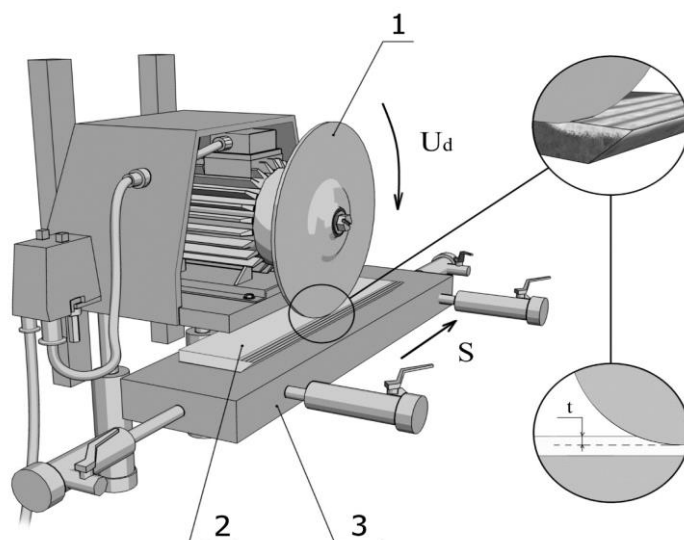


Рис. 1. Схема ТФЗ: 1 – різальний диск; 2 – зразок; 3 – магнітна плита верстата

Зміцнювальний диск виготовлений із сталі Ст3, його використовують на глибину оброблення 0,7 мм. Такий вибір глибини оброблення здійснено з урахуванням перерізу зразків, що зміцнюються, та умовами оптимальності оброблення згідно з попередніми дослідженнями [12].

Переміщення столу давало змогу якісно проводити ТФЗ на всій поверхні зразків. За контакту між різальним диском і зразком реалізувалося ТФЗ, яке проводили в умовах без змащування. Отже, обраний режим ТФЗ має високий рівень жорсткості, що обрано з урахуванням типу матеріалу та поверхні [1].

Параметри режимів оброблення дослідних зразків із сталі 65Г: $S = 30$ мм/с, $t = 0,7$ мм – режим оброблення № 1,

$S = 100$ мм/с, $t = 0,7$ мм – режим оброблення № 2.

Дослідження зразків показало, що під дією ТФЗ з'являється поверхневий шар зі зміненими структурою і властивостями. Він складається з двох різних ділянок: ділянка зі зміцненням; ділянка зі знеміцненням.

Перша розташована біля поверхні та має мікротвердість зміцненого шару H_{100} майже 13000 МПа, глибина зміцнення I близько 300 мкм, які можна спостерігати в зразку 1, обробленому за режимом № 1 (рис. 2).

Ділянка зі знеміцненням, яка знаходиться безпосередньо під ділянкою зі зміцненням, є вузькою смужкою та має знижену мікротвердість до рівня 3800 МПа (рис. 2). У зразку 1 цей підшар має товщину приблизно 70 мкм (рис. 2).

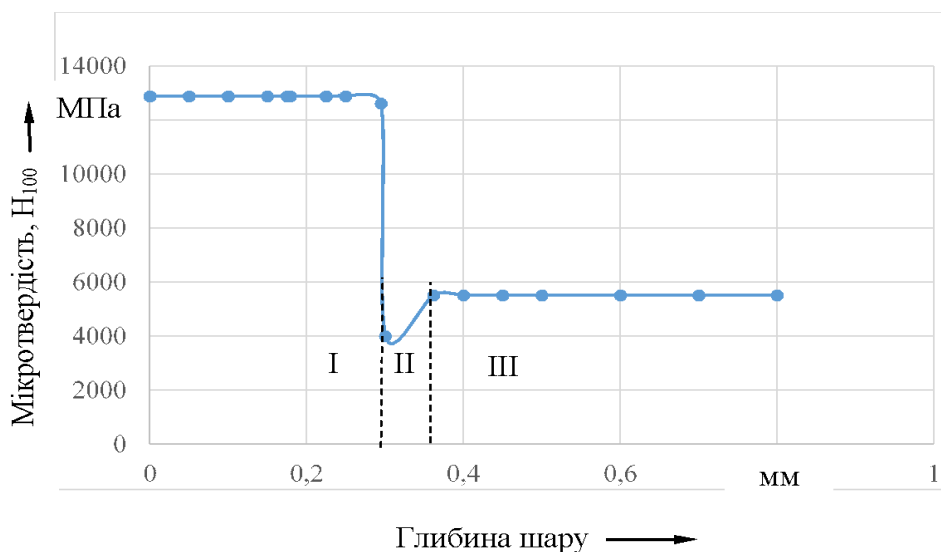


Рис. 2. Зміна мікротвердості по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 1 (Сталь 65Г)

Нижче знаходиться основна частина зразка, яка не зазнала впливу ТФЗ. Мікротвердість її дорівнює близько 5800 МПа.

У зразку 2, обробленому за режимом № 2, спостерігається збереження характеристик зміцнення. Мікротвердість по глибині залишається високою, але трохи нижче, ніж у зразку 1. Тобто шар із зміненими

структурою та властивостями зберігає дві структурні ділянки (із зміцненням і знеміцненням), а значення мікротвердості та глибин зміцнення в них такі: для ділянки зі зміцненням $H_{100} = 11800$ МПа, $l = 240$ мкм, для ділянки зі знеміцненням $H_{100} = 3800$ МПа, $l = 70$ мкм (рис. 3).

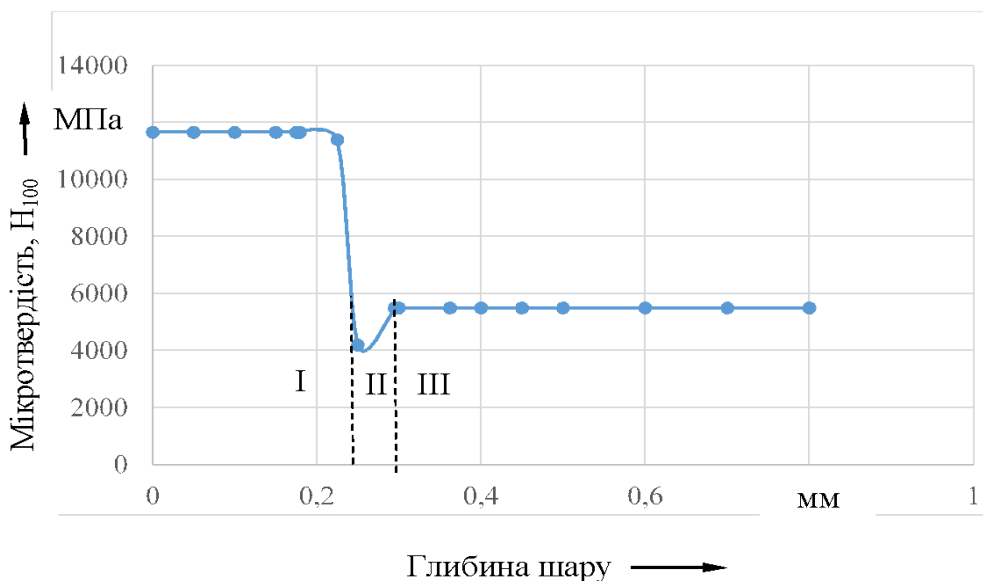


Рис. 3. Зміна мікротвердості по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 2 (Сталь 65Г)

Вивчення мікроструктури дослідних зразків із сталі 65Г показало, що під дією ТФЗ з'являються три різні за кольором шари, які навіть візуально суттєво відрізняються один від одного (рис. 4, 5). Перший, поверхневий «білий» шар, значно світліший порівняно зі структурою основної частини зразка, внаслідок чого цілком доцільно його називати саме так. За структурою цей шар близький до структури

мартенситу відпускання, набутої раніше, проте має сліди пластичного деформування і більш високий ступінь дисперсності, який сформувався внаслідок розігрівання і деформування поверхні при ТФЗ. Таку мікроструктуру можна характеризувати як «деформований дрібнодисперсний мартенсит» або «деформований дрібнозернистий мартенсит» з притаманними цій структурі підвищеними показниками зміцнення.

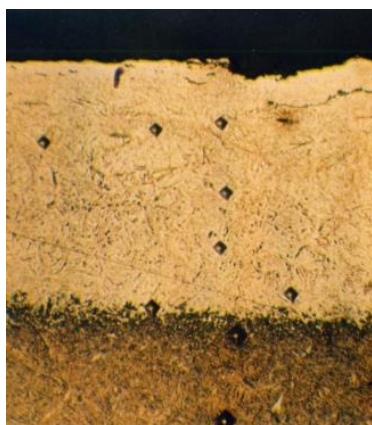


Рис. 4. Зміна мікроструктури по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 1 (Сталь 65Г, х250)



Рис. 5. Зміна мікротвердості по перерізу зразка після ТФЗ за режимом оброблення поверхні № 2 (Сталь 65Г, х250)

Під поверхневим шаром ми спостерігаємо шар зі структурою з більш темним кольором. Ширина його не є дуже великою, що помітно на фотографії цієї структури. У цій ділянці зразка прогрівання відповідає температурам відпускання, через зниження температури по перерізу вглиб зразка, що у свою чергу забезпечує формування сорбіто- і трооститоподібних структур із більш низькою мікротвердістю. Нижче розташована основна частина зразка, де не відбулося жодних змін внаслідок розсіювання підвищеної температури вище рівня такої глибини перерізу. Відповідно мікроструктура там обумовлена попереднім термічним обробленням і відповідає структурі мартенситу відпускання. Окрім того, слід зазначити, що зміцнений «білий» шар у зразках розташований по всій їхній довжині та є суцільним, що характеризує однорідність зміцнення поверхні зразків.

Отже, при порівнянні змін у мікроструктурі та мікротвердості зразків, зміцнених по поверхні з використанням ТФЗ, цілком очевидні мікроструктурні зміни у вигляді появи поверхневого «білого» зміцненого шару надвисокої твердості, який поєднано з основною частиною зразка тонким знеміцненням підшаром. І кожна структурна частина перерізу зразка здатна виконувати свої функції при експлуатації потенційних виробів.

Висновки. 1. Проаналізовано ряд джерел інформації, що дало змогу теоретично вивчити суть і особливості

зміцнення матеріалів із використанням тертя. Розглянуто особливості деяких подібних видів поверхневого зміцнення виробів.

2. За отриманими експериментальними даними побудовано графіки зміни мікротвердості в перерізі зразків, вивчено мікроструктури, з яких видно, що після ТФЗ в поверхні зразків формується шар із зміненою структурою, мікротвердість якого суттєво перевищує (приблизно у два рази) мікротвердість основної частини досліджених зразків.

3. Металографічний аналіз дослідних зразків показав, що сформований у зразках за ТФЗ шар має мартенситну структуру з більш високими ступенем дисперсності та рівнем мікротвердості порівняно з мартенситною структурою, отриману при попередньому обробленні – термічним шляхом.

4. Проведено порівняння змін у мікроструктурі та мікротвердості зразків, які зміцнили по поверхнях із використанням різних режимів ТФЗ. Виявлено певні відмінності у характеристиках їхніх зміцнених «білих» шарів. Також показано, що зміцнений «білий» шар у зразках розташований по всій їхній довжині та є суцільним, що характеризує однорідність і рівномірність зміцнення поверхні зразків.

5. Функціонування технологічного обладнання, використаного при виконанні роботи, не має негативного впливу на навколишнє середовище, а технологія є достатньо економічною і актуальною.

Список використаних джерел

1. Волков О. А. Исследование теплodeформационного влияния при поверхностном упрочнении сталей термофрикционной обработкой. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2016. № 2/5 (80). С. 38–44.
2. Голубець В. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів: навч. посібник. Львів: ВТФ «Друксервіс», 2000. 178 с.
3. Lakshminarayanan A., Balasubramanian V. Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel. *Metals and materials international*. 2011. Vol. 17, no. 6. P. 969–981.
4. Galvao I., Leal R., Loureiro A. Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds thin copper sheets. *Journal of materials processing technology*. 2013. Vol. 213. Is. 2. P. 129–135.

5. Rajamanickam N., Balusamy V., Magudeeswaran G., Natarajan K. Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds. *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Is. 7. P. 2726–2731.

6. Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H., Abbasi S.M. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, Is. 4–5, 25. P. 2158–2163.

7. Використання методу мікродугового плазмового оксидування для підвищення антифрикційних властивостей титану поверхня сплаву / В. Субботіна та ін. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Т. 11, № 3. 03025.

8. Sipos K., Lopez M., Trucco M. Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel. *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*. 2008. Vol. 28, no. 1. P. 46–50.

9. Голубець В. М., Кірик М. Д., Капраль Ю. Р., Рудь А. Є. Фізико-механічні характеристики зміцненого високошвидкісним тертям наноструктурного шару на сталі 45. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: зб. наук.-техн. пр.* Львів: РВВ НЛТУ України, 2012. Вип. 22.13. С. 114–117.

10. Кірик М., Голубець В., Капраль Ю., Рудь А. Встановлення режимів зміцнення високошвидкісним тертям ножів з конструкційних сталей для різання деревини. *Машинознавство*. 2013. № 3–4. С. 28–31.

11. Манько О. В., Стецько Ю. Б., Білявський М. Л. Утворення білого шару при фрикційно-зміцнюючій обробці тонких пластин. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2005. Вип 1. С. 146–157.

12. Волков О. О. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.01 Матеріалознавство. Харків, 2020. 209 с.

13. Матеріалознавство: навч. посіб. / В. Бузило та ін. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.

Волков Олег Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-8797-0322.

Тел.: +38(057) 707-64-35. E-mail: volkovoleg1978@gmail.com.

Краєвська Жанна Владиславівна, аспірантка кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0006-8741-2623. E-mail: 3294280@gmail.com.

Субботіна Валерія Валеріївна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368.

Тел.: +38(057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Субботін Олександр Володимирович, аспірант кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-9422-4480. E-mail: subbotin.alex95@gmail.com.

Федоренко Ганна Анатоліївна, інженер I категорії кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». E-mail: ann161169@gmail.com.

Volkov Oleg, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, department of materials science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0001-8797-0322. Tel.: +38(057) 707-64-35. E-mail: volkovoleg1978@gmail.com.

Kraievskaja Zhanna, postgraduate student, department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0009-0006-8741-2623. E-mail: 3294280@gmail.com.

Valeria Subbotina, Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-3882-0368. Tel.: +38(057) 707-64-35. E-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Oleksandr Subbotin, postgraduate student, department of materials science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». ORCID iD: 0000-0002-9422-4480. E-mail: subbotin.alex95@gmail.com.

Fedorenko Hanna, eng. I category, Department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». E-mail: ann161169@gmail.com.

Статтю прийнято 15.05.2024 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.9:624.07:628.5

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Д-р техн. наук А. А. Плугін, кандидати техн. наук В. Д. Жван, О. В. Лобяк,
О. М. Назаренко, аспіранти Е. Ф. Наджафов, А. О. Березовська

FORECASTING THE FINAL RESOURCE OF THE REINFORCED CONCRETE CHIMNEY PIPE OF THE COKE CHEMICAL PRODUCTION

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, candidats of eng. scien. V. D. Zhvan, O. V. Lobyak,
O. M. Nazarenko, postgraduate students E. F. Najafov, A. O. Berezovska

***Анотація.** Комплексно досліджено технічний стан, корозійні процеси, пошкодження і несучу здатність залізобетонної димової труби, яка відводить газодимову суміш, що утворюється в технологічних процесах коксохімічного виробництва і є агресивним середовищем. Розроблено методіку прогнозування залишкового ресурсу конструкції труби. Встановлено, що пошкодженням, яке визначає залишковий ресурс, є обвалення футерування, після якого відбувається активне корозійне пошкодження залізобетонної конструкції. Проаналізовано склад і температурно-вологісний режим агресивного середовища, встановлено ступінь його агресивної дії та показники кінетики корозії труби зсередини. Проаналізовано напружено-деформований стан труби з урахуванням корозійних пошкоджень, визначено найбільш навантажену небезпечну зону її конструкції, граничні значення товщини стінки та глибини корозійного пошкодження в цій зоні, які забезпечують виконання умов до несучої здатності. Виходячи з величин швидкості корозії визначено час досягнення граничного стану. Показано, що без заходів із ремонту і захисту залишковий ресурс труби не перевищує 11 років. Рекомендовано в найкоротший термін здійснити капітальний ремонт труби з усуненням пошкоджень і відновленням футерування або не пізніше, ніж через 10 років зруйнувати споруду зі зведенням нової.*

***Ключові слова:** залізобетонна димова труба, агресивні гази, корозія, несуча здатність, прогнозування довговічності.*

***Abstract.** A comprehensive study of the technical condition, corrosion processes, damage and load-bearing capacity of the reinforced concrete chimney pipe, which removes the gas-smoke mixture formed in the technological processes of coke-chemical production and is an aggressive environment, was performed. A methodology for predicting the remaining resource of the pipe structure has been developed. It was established that the damage that determines the ultimate resource is the collapse of the lining, after which active corrosion damage of the reinforced concrete structure occurs. An analysis of the composition and temperature-moisture regime of the aggressive medium was performed. It was established that it is gaseous, the most aggressive components of which are acid gases, the degree of aggressive action is moderately aggressive, possibly strongly aggressive. Corrosion of concrete progresses in a concentric front from the inner surface of the chimney to the*

outer surface at a rate of 1.2 to 4.8 mm/year. The corroded layer of concrete loses its strength and protective properties to the reinforcement. An analysis of the stress-strain state of the pipe taking into account corrosion damage was performed, the most heavily loaded dangerous zone and its structure were determined, and the limit values of the wall thickness and the depth of corrosion damage in this zone were determined, which ensure the fulfillment of the conditions for bearing capacity. Based on the values of the corrosion rate, the time to reach the limit state is determined. It is shown that without repair and protection measures, the remaining service life of the pipe does not exceed 11 years. It is recommended to carry out a major repair of the pipe as soon as possible with the elimination of damage and restoration of the lining, or no later than after 10 years to carry out the liquidation of the structure with the construction of a new one.

Keywords: reinforced concrete chimney, aggressive gases, corrosion, carrying capacity, durability prediction.

Вступ. У металургії, паливно-енергетичному комплексі, виробництві будівельних матеріалів більшість технологічних процесів забезпечені горінням палив, що є окисненням сполук вуглецю киснем повітря. Підведення повітря та відведення продуктів горіння забезпечено природною тягою, створюваною за допомогою металевих, цегляних, залізобетонних димових труб [1]. Інтенсивність тяги пропорційна висоті труби, тому труби потужних підприємств мають бути капітальними довговічними спорудами.

Металеві труби будують висотою не більше 60 м. Подальше збільшення висоти металевих труб потребує облаштування підтримувальних конструкцій – каркасів, відтяжок, що різко збільшує вартість будівництва. Цегляні труби будували висотою до 178,3 м (труба мідеплавильного заводу в м. Анаконда, США, зведена в 1919 р.). Завдяки високій корозійній стійкості кераміки в будь-яких середовищах, включно димових газів, цегляні труби характеризують високою довговічністю, що могла перевищувати сотню років. Проте через надто високу трудомісткість зведення та завдяки зростанню якості бетонів і удосконаленню технології зведення залізобетонних конструкцій у другій половині ХХ ст. цегляні труби були витиснені залізобетонними трубами, висота яких досягла вже 420 м (труба теплової електростанції в м. Екібастуз, Казахстан, зведена в 1987 р.).

Через недостатню корозійну стійкість бетону на портландцементі довговічність залізобетонних труб забезпечена футеруванням зсередини керамічною цеглою і виконанням цегляного оголовка, при пошкодженні (обваленні) футерування може суттєво знизитися. Терміни служби футерування менше, ніж несучої конструкції труби, тому впродовж експлуатації стан футерування та залізобетонної конструкції в місцях обвалення потребує постійного моніторингу, який ускладнений безперервністю технологічних процесів, що забезпечує труба. Через нетривалий порівняно з економічно обґрунтованою довговічністю досвід будівництва та експлуатації залізобетонних димових труб (переважно з 1970-х рр.) і різний хімічний склад газодимових сумішей багато аспектів моніторингу їхнього стану, прогнозування довговічності та раціонального розподілу ресурсів на поточні та капітальні ремонти залишаються невивченими.

Стаття підготовлена за матеріалами досліджень корозійного стану залізобетонної димової труби, якою відводять газу від коксових батарей коксохімічного виробництва [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довговічність будівельних конструкцій і споруд визначають здатністю матеріалів, з яких вони зведені, зберігати свої властивості в часі, а отже, кінетикою їхньої деградації. Деградацію матеріалів намагаються моделювати за допомогою

кінетичних і статистичних теорій. За флуктуаційною теорією Журкова, деградація матеріалів відбувається внаслідок розриву хімічних зв'язків у них від теплових флуктуацій і напружень, а час τ від прикладання навантаження до руйнування визначає довговічність конструкції з цього матеріалу [3]:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{V-\gamma\sigma}{RT}}, \quad (1)$$

де τ_0 – постійна, що для всіх матеріалів знаходиться в межах 10^{12} – 10^{13} с;

V – енергія активації розриву зв'язку;

γ – параметр, що враховує неоднорідності структури матеріалу та розподілу напруження;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Щодо залізобетонних димарів, то практичне застосування цього рівняння надто ускладнено гетерогенністю їхньої конструкції (різні складові бетону і мурувального розчину, арматура, теплоізоляційний матеріал, цегла футерування), неврахуванням корозійних процесів і поступового зменшення перерізу конструкцій від них.

У роботі [4] показано, що пошкодження залізобетонних конструкцій труб пов'язані з агресивним впливом продуктів згоряння і запропоновано заходи з ремонту труб з урахуванням цього впливу. У роботах [5, 6] удосконалено методики діагностування стану труб, пошкодження пов'язують із термічними впливами, запропоновано застосовувати тепловізійне обстеження. Зазначено, що руйнівним фактором є і кислотний конденсат, що проникає крізь футерування і теплоізоляцію до залізобетонної конструкції, проте прогнозування залишкового ресурсу на основі врахування агресивних впливів не пропонують. У роботі [7] досліджено процеси, що відбуваються під час ліквідації труб після вичерпання їхнього ресурсу, проте не спрогнозовано цей ресурс.

Визначення мети та завдань досліджень. Мета досліджень – уточнення методики визначення залишкового ресурсу залізобетонної димової труби коксохімічного виробництва. Завдання досліджень: аналіз конструкції, умов експлуатації і результатів натурального обстеження труби; оцінювання показників кінетики корозійного пошкодження; аналіз напружено-деформованого стану конструкції труби; прогнозування залишкового ресурсу та рекомендації з його подовження.

Основна частина дослідження

Конструкція і поточний стан труби.

Труба коксового цеху (рис. 1) спроектована в 1949 р., на момент обстеження перебувала в експлуатації 71 рік. За проектом, висота труби 90 м, зовнішній діаметр на рівні землі – 7,3 м, на рівні верхнього вихідного обрізу – 3,84 м, схил зовнішньої поверхні труби $i = 0,02$, внутрішній діаметр вихідного отвору – 3 м. Стовбур труби до відмітки 85 м монолітний залізобетонний із бетону М200, армований сіткою $\varnothing 20A-II$ 200×200 мм із захисним шаром 30 мм (від зовнішньої поверхні), вище 85 м – із керамічної цегли марки 100 на цементно-піщаному розчині М50. Футерування димохідного каналу з відмітки 2,81 до 90 м товщиною 120–250 мм із керамічної цегли на цементно-піщаному розчині М30. Між футеруванням і залізобетонною несучою конструкцією улаштовано теплоізоляцію з мінеральної вати. Фундамент кільцевий стаканного типу, монолітний залізобетонний. Труба споряджена металевою драбиною з огороженням, світлофорними майданчиками на відмітках 54,6 та 84,5 м, блискавкозахистом. Димові газу підводять до труби двома газоходами.

Під час експлуатації в димохідному каналі періодично траплялися вибухи незгорілих газів, а з 1998 р. – випадки порушення теплового режиму труби через технологічні зупинки. У 2003 і 2019 рр. було обвалення футерування в обсязі 10–15 м³ і понад 90 м³ відповідно. Очевидно, у результаті огляду димового каналу знизу під

час видалення обваленого футерування було припущено, що обвалення сталося на відмітках орієнтовно 25–35 м.

Виконані у 2021 р. візуальний огляд за допомогою оптичних приладів, фото- та відеозйомка труби, у т. ч. за допомогою БПЛА, показали наявність таких пошкоджень (рис. 1, в, з): горизонтальні тріщини, раковини та відколи бетону по їхніх краях без оголення арматури, а також висоли-пательки виключно в місцях горизонтальних швів бетонування (рис. 2, а);

вертикальні тріщини розкриттям до та понад 1 мм на відмітках від 25 до 82 м (рис. 2, б). Поточний стан каналу димоходу залишився невідомим через незупинний технологічний процес і, отже, неможливість огляду. Відхилення осі труби від вертикального положення не виявлено. Міцність бетону на відмітці 1,5 м визначено неруйнівним методом за допомогою ультразвукового приладу – у межах 11,5–12,1 МПа.

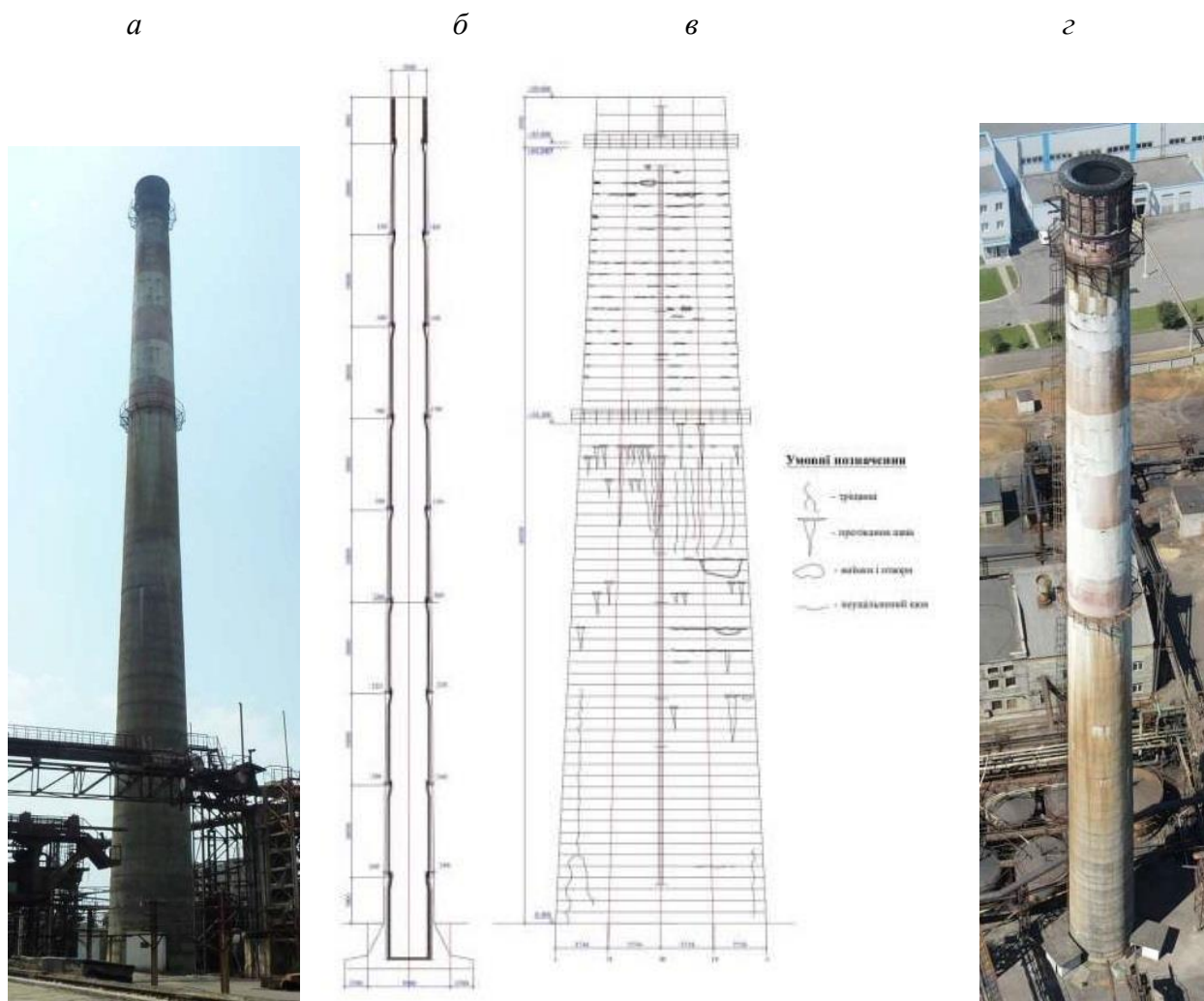


Рис. 1. Димова труба коксового цеху: а – вигляд із землі; б – схема конструкції; в – карта пошкоджень; г – вигляд із БПЛА



Рис. 2. Дефекти і пошкодження залізобетонної конструкції труби:
а – раковини без оголення арматури, горизонтальні тріщини та висоли-пательки в місцях горизонтальних швів бетонування;
б – вертикальні тріщини розкриттям понад 1 мм

Методика прогнозування залишкового ресурсу труби. Припущено, що залишковий ресурс труби визначають кінетикою корозії бетону (швидкістю, мм/р.) у місцях обваленого футерування, а агресивним середовищем є газодимова суміш; корозія просувається фронтом, а в кородованому шарі бетон втрачає міцність і захисні властивості відносно арматури, отже, відбувається зменшення товщини залізобетонної стінки труби і площі поперечного перерізу. За залишковий ресурс прийнято час, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного за несучою здатністю значення. За цими припущеннями запропонована така послідовність прогнозування залишкового ресурсу:

1) тепловізійне обстеження поверхні труби з БПЛА з уточненням зон із втраченим футеруванням, у яких відбуваються корозія бетону, зменшення площі перерізу та несучої здатності;

2) відбір проб і лабораторне дослідження корозійного стану та фізико-механічних властивостей бетону в місцях втраченого футерування;

3) аналіз хімічного складу і температурно-вологісного режиму середовища (газодимова суміш) із визначенням ступеня агресивної дії і швидкості корозії;

4) аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням пошкоджень, визначення критичних зон із максимальними напруженнями і граничних величин товщини стінки, за яких настає відмова за несучою здатністю;

5) розрахунок часу, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного значення, як залишкового ресурсу.

Тепловізійне обстеження поверхні труби виконано за допомогою БПЛА – квадрокоптера DJI Mavic 2 Advanced Enterprise, оснащеного тепловізійною камерою з сенсором Uncooled Vox Microbolometer, і програмного забезпечення DJI Pilot і Thermal Analysis Tool 2. У результаті тепловізійного обстеження отримано 750 зображень в ІЧ-діапазоні. Обробка їх (рис. 3) показала, що середня температура зовнішньої поверхні труби складає 32,4 °С, проте на її верхній частині

спостерігають три локалізовані аномальні (нагріті) зони з максимальною температурою 112,7 °С, середньою температурою 76,7 °С: верхня кільцева висотою 5,65 м, площею 198,9 м² між відмітками 71,55 і 77,2 м; середня у вигляді плями висотою 2,4 м, площею 9,4 м² між відмітками 66 і 68,4 м; нижня кільцева висотою 9,1 м, площею 392,9 м² між відмітками 42,9 і 52 м. На нижній частині труби також спостерігають нагріті зони, у

т. ч. між відмітками 25 і 35 м, але менш упорядковано розподілені по її поверхні.

Положення аномальних зон у верхній частині труби відповідає зонам максимального розвитку пошкоджень труби, особливо зона між відмітками 42,9 і 52 м системі вертикальних тріщин. Це свідчить про втрату футерування і розвиток корозійного пошкодження бетону саме в цих зонах. У зоні відомої втрати футерування на відмітках 25–35 м також відзначають нагріті зони.

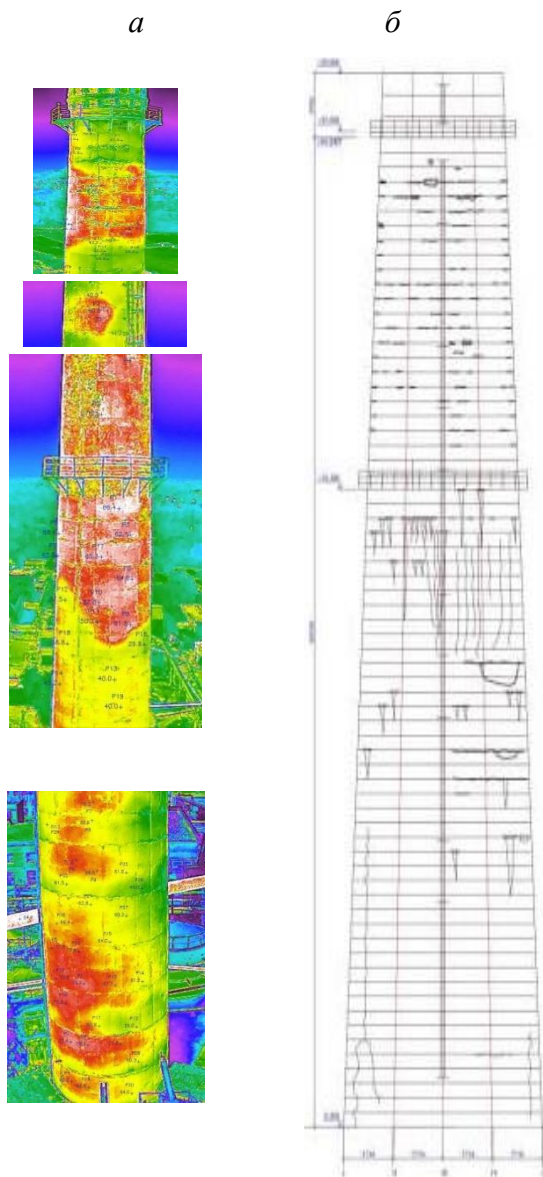


Рис. 3. Інфрачервоні зображення аномальних (нагрітих) зон (а) і карта пошкоджень (б) на поверхні труби

Відбір проб і лабораторне дослідження корозійного стану та фізико-механічних властивостей бетону. Проби бетону у вигляді двох кернів діаметром 43 мм відбирали кільцевим свердлом на відмітці 55,5 м. Під час висвердлювання обидва керни розпалися на фрагменти, менші за розміром ближче до внутрішньої поверхні стінки труби (рис. 4). Сумарну довжину кожного керна встановити точно не вдалося, орієнтовно вона знаходиться в межах 180-230 мм.

Петрографічні дослідження кернів, у т. ч. за допомогою світлового мікроскопа МБИ-3 у режимах збільшення $\times 7$, $\times 12,5$, $\times 25$ показали, що конструкція труби виконана з бетону важкого на портландцементі та щільних заповнювачах. Структура бетону базальна, зі значною кількістю розчинної частини та віддаленим розташуванням частинок крупного заповнювача (рис. 4, *а*). Крупний заповнювач – щебінь крупністю до 20 мм із щільного вапняку темного кольору (рис. 4, *б*), встановленого за реакцією з соляною кислотою та кристалічною будовою, характерною для кальциту. Дрібний заповнювач – пісок кварцовий

дрібний з окремими крупними зернами (рис. 4, *б*). Адгезійний характер руйнування кернів свідчить про слабе зчеплення між розчинною частиною і крупним заповнювачем.

Глибину корозійного пошкодження бетону за кернами встановити не вдалося. Проте на уламках кернів, що були ближче до внутрішньої поверхні стінки труби, спостерігали мелені поверхні розчинної частини, що свідчить про суттєве зниження її міцності через корозію. Тестування соляною кислотою показало «скипання», що свідчить про карбонізацію цементного каменю, а отже, втрату захисних властивостей бетоном відносно арматури. рН змочених водою поверхонь склав близько 7, водної витяжки – 6, що також свідчить про нейтралізацію і втрату захисних властивостей бетону. Водна витяжка мала жовтуватий колір, який може свідчити про наявність сіркомістких сполук. Виявлена на поверхні керна окрема ділянка з білим нальотом, схожим на крейду, з соляною кислотою не реагувала, отже могла бути іншими продуктами корозії – сірко- або азотвмісними солями кальцію.

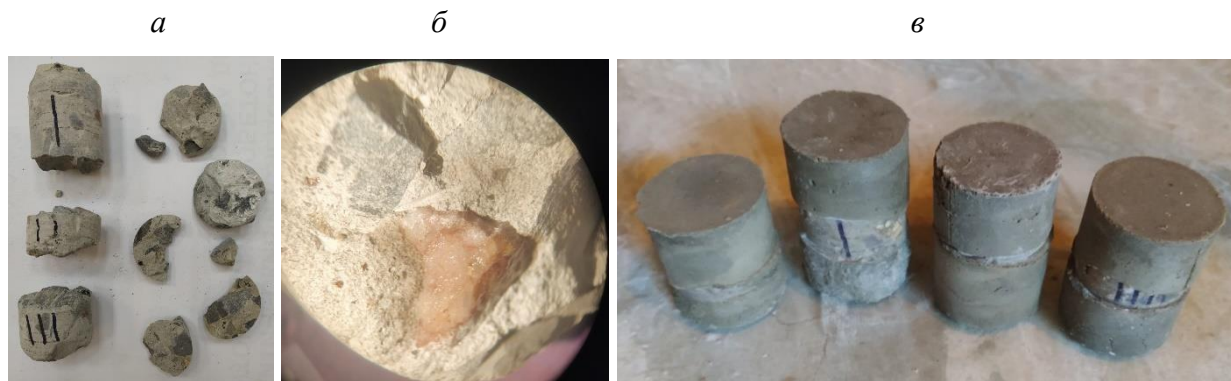


Рис. 4. Зразки-керни: *а* – загальний вигляд керна; *б* – відкол, світловий мікроскоп, $\times 12,5$, частинка сірого кольору – вапняк, рожевого – кварц; *в* – підготовлені для випробування на міцність зразки

Водопоглинання бетону за масою, визначене за ДСТУ Б В.2.7-170 за допомогою електронних ваг-вологоміра

RADWAG WPS 210/C/2 за трьома зразками – фрагментами кернів, ближчими до внутрішньої поверхні стінки труби, склало

7,1, 2,6, 8,6, у середньому 6,1 %, що відповідає бетону підвищеної проникності.

Для визначення міцності бетону найбільші фрагменти кернів, ближчі до зовнішньої некородованої поверхні стінки труби, доформували цементно-піщаним

розчином 1:2 (СЕМ І-500, пісок із модулем крупності 1,1) з В/Ц = 0,5 (рис. 4, в). Результати визначення міцності бетону за отриманими зразками-циліндрами за ДСТУ Б В.2.7-223 і ДСТУ Б В.2.7-214 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Визначення міцності бетону випробуванням

Номер		Розміри, см		h/d	Масштабні коефіцієнти		Руйнівна сила P, кгс	Міцність на стиск $f=0,098 \cdot 4\alpha\eta_1 P/\pi d^2$, МПа	
керна	зразка	d	h		α	η_1		зразка	середня
1	1 (I)	4,3	7,7	1,79	0,85	1,18	1860	12,6	17,3
	2 (III)	4,3	5,5	1,28	0,85	1,10	3670	23,2	
2	3 (I)	4,3	7,0	1,63	0,85	1,14	3230	21,1	
	4 (III)	4,3	6,4	1,49	0,85	1,13	1890	12,3	

Отже, за результатами петрографічного аналізу встановлено, що внутрішній шар бетону стінки труби зазнав нейтралізації кислотними газами і втратив захисні властивості до сталеві арматури. Його водопоглинання за масою складає 6,2 %, отже, він характеризується підвищеною проникністю. Середнє значення міцності бетону на стиск зовнішнього некородованого шару становить 17,3 МПа. Глибину корозійного пошкодження бетону встановити не вдалося.

Аналіз кінетики корозії за ступенем агресивної дії середовища. Конструкції, на які впливає потенційно агресивне середовище:

- канал димової труби – футерування, цегляне мурування у верхній частині труби, залізобетонна конструкція в місцях обвалення футерування;

- зона окутування – цегляне мурування верхньої частини труби ззовні (виконано під час будівництва як захід первинного захисту від корозії в зоні окутування).

Фізичний стан потенційно агресивного середовища – твердий (дим, сажа), газоподібний. Вологісний режим потенційно агресивного середовища: вологість газоповітряного середовища

невідома, проте через те, що під час коксування коксівне вугілля зневоднюється, припустимо, що його відносна вологість перевищує 60 %. За відносної вологості понад 60 % і температури понад 24 °С режим газоподібного середовища є «мокрим».

Тверде середовище – дим, сажа, містить незгорілі частинки вуглецю С і, очевидно, силікатів. Вуглець і силікати є малорозчинними та негігроскопічними, отже, до цегельного мурування, бетону і залізобетону мають неагресивний ступінь дії за будь-якого вологісного режиму середовища.

Газоподібне середовище містить сірчаний ангідрид, чадний газ, оксиди вуглецю. Щодо агресивності чадного газу СО до бетону і залізобетону даних нема. Припустимо, що ступінь його дії неагресивна. Сірчаний ангідрид і оксиди азоту є кислотними газами, які залежно від концентрації та вологісного режиму середовища можуть бути агресивними. У вихідних даних відсутня інформація про вміст у середовищі вуглекислого газу СО₂. Оскільки він є основним продуктом згоряння вугілля, припустимо, що навіть за умови дефіциту кисню його вміст у

середовищі є не менше 2000 мг/м³. Вуглекислий газ є кислим газом, що залежно від концентрації та вологісного

режиму середовища може бути агресивним. Розрахунок агресивної дії газів зведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Зведені дані для розрахунків з визначення ступеня агресивної дії газоподібного середовища

Газ	Молярна маса M , г/моль	Вміст у середовищі				Група газів	Ступінь агресивного впливу		
		C_v , мл/м ³	$C_m = C_v M / 22,4$, мг/м ³		на цеглу керамічну		на бетон	на залізобетон	
Сірчаний ангідрид SO_2	64	280	800		D	Неагресивний	Середньо агресивний	Сильно агресивний	
Монооксид азоту NO	30	290	145	194	D	«	Середньо агресивний	Сильно агресивний	
Діоксид азоту NO_2	46		145	298					
Чадний газ CO	28	73	91		–	«	Неагресивний	Неагресивний	
Вуглекислий газ CO_2	44		понад 2000		B	«	Неагресивний	Середньо агресивний	

Таблиця 3

Інтегральний ступінь агресивної дії газоподібного середовища

Матеріал, конструкція	Ступінь агресивної дії	Гази, що визначають сумарний ступінь агресивної дії
Цегельне мурування, футерування	неагресивний	–
Бетон	середньо агресивний	Кислі гази: сірчаний ангідрид SO_2 ; оксиди азоту $NO + NO_2$
Залізобетон	сильно агресивний	

Аналіз корозійних процесів.

Корозійно небезпечними елементами конструкції димової труби є місця з обваленим футеруванням, де з 2006 р. корозійних процесів зазнає безпосередньо залізобетонна конструкція.

Ураховуючи розташування робочої арматури ближче до зовнішньої поверхні

конструкції труби визначальною буде корозія бетону другого виду, за класифікацією Москвіна, у вигляді взаємодії розчинених у конденсаті кислих газів із продуктами гідратації цементу з утворенням сполук, що не мають в'язучих властивостей [8]. Утворені внаслідок розчинення кислих газів кислоти нейтралізують портландит $Ca(OH)_2$:



Утворені сульфід і нітрит кальцію не мають в'язучих властивостей, у структурі цементного каменю заміщують собою кристалогідрати портландиту, що призводить до зниження міцності бетону. Сульфід кальцію подалі може перетворюватись у сульфати і переводити корозійний процес до більш інтенсивної корозії третього виду. Після вичерпання портландиту і зниження рН відбувається розкладання гідросилікатів кальцію. Корозії

сприяє розкладання високоосновних гідросилікатів кальцію та гідросульфоалюмінатів кальцію під впливом підвищеної температури 270 °С.

Корозійний процес просувається фронтом від внутрішньої поверхні димоходу до зовнішньої (рис. 5). З просуванням фронту корозії від внутрішньої поверхні до зовнішньої кородована зона перерізу втрачає міцність, і фактична товщина кільцевого перерізу зменшується.

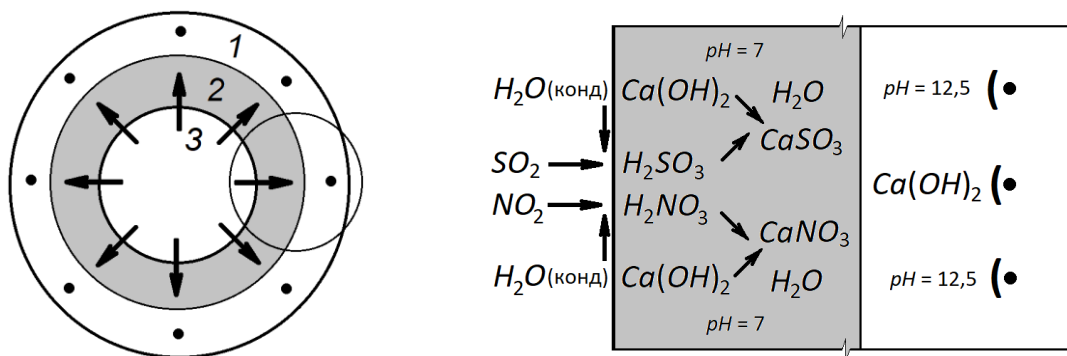


Рис. 5. Спрощена схема просування корозії в поперечному перерізі залізобетонної конструкції димової труби та процесів, що відбуваються:

1 – некородована частина перерізу з робочою арматурою; 2 – уражена корозією частина перерізу; 3 – агресивне середовище і напрямок просування корозійного процесу

Зниження рН призводить до втрати бетоном захисних властивостей відносно арматури та її корозії після досягнення неї фронтом корозії. Після досягнення фронтом корозії робочої арматури її спільна робота з бетоном порушиться, а власна корозія арматури під впливом кислих газів може розвиватися настільки швидко, що в першому наближенні можна прийняти момент досягнення робочої арматури фронтом корозії за момент неприпустимої втрати арматурою сприймати розтягувальні навантаження.

Вертикальні тріщини розкриттям до 1 мм у конструкції труби на висоті від 25 до 82 м можуть свідчити як про початок корозії арматури, так і зменшення товщини перерізу до величини, якої недостатньо для

сприйняття стискальних напружень від власної ваги конструкції.

Можливі граничні стани від розвитку корозії:

1) зменшення товщини перерізу до величини, якої недостатньо для сприйняття стиснутою зоною бетону стискальних напружень від власної ваги, випадкового ексцентриситету та вітрового навантаження;

2) досягнення фронтом корозії робочої арматури і втрата нею здатності сприймати розтягувальні напруження від випадкового ексцентриситету і вітрового навантаження.

Оцінювання кінетики корозії. У табл. 4 наведені дослідні дані з кінетики корозії неметалевих конструкцій [8]. Для аналізу приймемо найбільш несприятливу величину швидкості просування фронту

корозії для середньо агресивного ступеня агресивної дії $a = 1,2$ мм/р., а для сильно агресивного ступеня дії – величини, що перевищують нижню границю – 2,4 і

4,8 мм/р. Відповідні цим показникам швидкості корозії кінетичні залежності наведені на рис. 6.

Таблиця 4

Дослідні дані з кінетики корозії неметалевих конструкцій

Ступінь агресивної дії	Швидкість просування фронту корозії, мм/р.	
	Нижня границя	Верхня границя
Середньо агресивний	0,4	1,2
Сильно агресивний	1,2	–

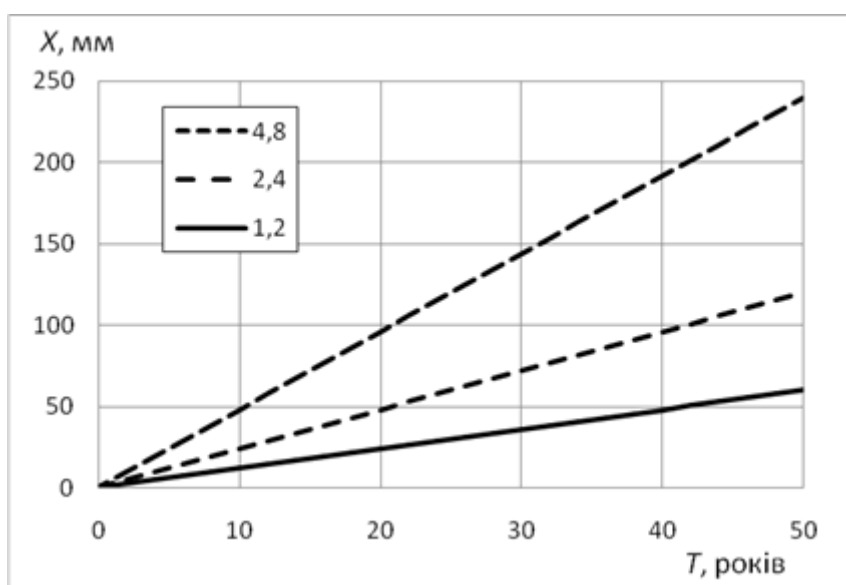


Рис. 6. Кінетика просування фронту корозії – залежність глибини просування X від часу T за швидкості просування 1,2, 2,4 і 4,8 мм/р.

Отже, корозійно небезпечною зоною конструкції димової труби є зона залізобетону, на якій втрачено футерування і теплоізоляцію. Агресивне середовище є газоподібним, найбільш агресивними складовими якого є кислі гази – сірчаний ангідрид SO_2 , оксиди азоту NO і NO_2 , ступінь агресивної дії – середньо агресивний, можливо, ближче до сильно агресивного. Внаслідок агресивної дії кислих газів відбувається корозія бетону, яка просувається фронтом від внутрішньої поверхні димоходу до зовнішньої зі швидкістю від 1,2 до 4,8 мм/р. Кородований

шар бетону втрачає міцність і захисні властивості до арматури. У частині димової труби, у якій у 2006 р. були втрачені футерування та теплоізоляція, за 15 років фронт корозії просунувся не менш ніж на 28 мм, вірогідно, до 74 мм.

Наявність вертикальних тріщин на висоті від 25 до 82 м може свідчити про значні стискальні напруження від сполучення власної ваги конструкції та вітрових навантажень.

Розрахунок несучої здатності стовбура з прогнозуванням граничного стану. Вихідні дані для розрахунку

(прийнято за додатком Е ДБН В.1.2-2:2006 для м. Харків): характеристичне значення вітрового тиску – 430 Па; характеристичне значення тиску вітру за ожеледі – 230 Па; характеристичне значення товщини ожеледі – 14 мм. Температурний режим експлуатації: $T_{вн} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{зовн} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Характер пошкодження: обвалення футерування і теплоізоляції, корозійне і термічне пошкодження бетону, яке розповсюджується концентричним фронтом від внутрішньої поверхні труби (газодимового каналу) до зовнішньої та формалізується виключенням кородованого шару з конструкції, отже, умовним зменшенням товщини стінки.

Розглянуто три розрахункових випадки:

1) стовбур труби не пошкоджений, товщина стінок відповідає проєкту, матеріал труби – бетон класу С12/15, що відповідає марці М200;

2) стовбур труби пошкоджений на відмітках +15...+25 м із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки, гранично допустима залишкова товщина стінки розрахована виходячи з умови наближення до

граничного стану за міцністю бетону на стиск;

3) стовбур труби пошкоджений на відмітках +25...+35 м із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки, гранично допустима залишкова товщина стінки розрахована виходячи з умови наближення до граничного стану за міцністю бетону на стиск.

Оцінено несучу здатність і експлуатаційну надійність коефіцієнтами використання перерізів (коефіцієнтами вичерпання несучої здатності) за методом граничних станів. За ДБН В.1.2-14, коефіцієнт надійності за відповідальністю для розрахунку за першою групою граничних станів прийнято $\gamma_n = 1$, для розрахунку за другою групою граничних станів $\gamma_n = 0,95$. Розрахунки виконано за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР 2018 Pro (Ліцензія № 1/6638).

Розрахункова схема складена з універсальних скінчених елементів оболонки (для стовбура на рис. 7). Розрахункові комбінації навантажень наведено в табл. 5. Результати розрахунків наведено на рис. 7 і в табл. 6.

Таблиця 5

Розрахункові комбінації навантажень

Номер	Власна вага труби з футеруванням	Вітрове навантаження на трубу	Нерівномірний нагрів ($T_{вн} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{зовн} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Вітрове навантаження на трубу, вкриту ожеледдю	Вага ожеледі на стовбурі труби
1	+	+	–	–	–
2	+	+	+	–	–
3	+	–	–	+	+
4	+	–	+	+	+

Примітка: «+» – навантаження входить до сполучення, «–» – не входить до сполучення.

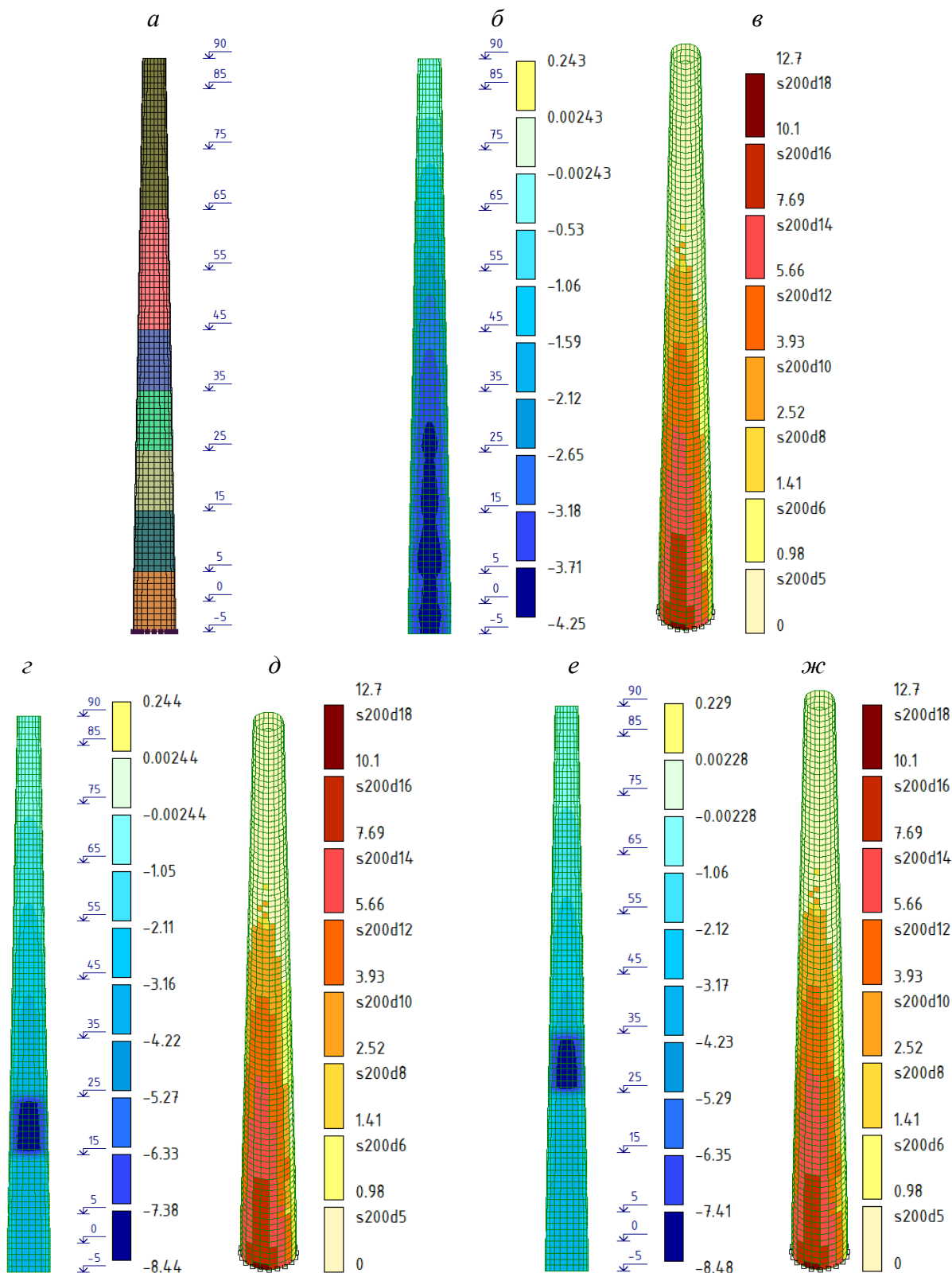


Рис. 7. Розрахункова схема (а), поля напружень, МПа (б, г, е), поля розрахункового армування (в, д, ж) для розрахункових випадків:
 б, в – 1, стовбур труби не пошкоджений, товщина стінок відповідає проекту;
 г, д – 2, стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +15...+25 м; е, ж – 3, те саме на відмітках +25...+35 м

Результати розрахунків несучої здатності стовбура труби

Розрахунковий випадок	Секція	Відмітка, м	Товщина стінки, мм	Напруження, МПа	Коефіцієнт використання
1 – стовбур труби не пошкоджений, товщини стінок відповідають проекту	1	-5...+5	300	-4,11	0,48
	2	+5...+15	260	-4,25	0,50
	3	+15...+25	240	-4,03	0,47
	4	+25...+35	220	-3,99	0,47
	5	+35...+45	200	-3,66	0,43
	6	+45...+55	190	-3,08	0,36
	7	+55...+65	190	-2,37	0,28
	8	+65...+75	180	-1,62	0,19
	9	+75...+85	180	-0,91	0,11
	10	+85...+90	250	-0,27	0,03
2 – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +15...+25 м	1	-5...+5	300	-4,18	0,49
	2	+5...+15	260	-6,21	0,73
	3	+15...+25	112	-8,44	0,99
	4	+25...+35	220	-5,99	0,70
	5	+35...+45	200	-3,65	0,43
	6	+45...+55	190	-3,08	0,36
	7	+55...+65	190	-2,37	0,28
	8	+65...+75	180	-1,62	0,19
	9	+75...+85	180	-0,91	0,11
	10	+85...+90	250	-0,27	0,03
3 – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +25...+35 м	1	-5...+5	300	-4,21	0,50
	2	+5...+15	260	-4,27	0,50
	3	+15...+25	112	-6,10	0,72
	4	+25...+35	96	-8,48	0,99
	5	+35...+45	200	-5,76	0,68
	6	+45...+55	190	-3,07	0,36
	7	+55...+65	190	-2,37	0,28
	8	+65...+75	180	-1,62	0,19
	9	+75...+85	180	-0,91	0,11
	10	+85...+90	250	-0,27	0,03

У результаті аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної конструкції труби (рис. 7, табл. 6) для першого розрахункового випадку – стовбур труби не пошкоджений, товщини стінок відповідають проекту – встановлено:

- несуча здатність при перевірці міцності бетону на стиск забезпечена з коефіцієнтом використання 0,50 за першою групою граничних станів (міцність) і 0,44 –

за другою групою (жорсткість), максимальна деформація становить 118 мм;
- несуча здатність димової труби при перевірці заданого армування ($\varnothing 20A-II$, 200×200 мм) забезпечена з коефіцієнтом використання 0,81 (12,7/15,71).

Для другого розрахункового випадку – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням

товщини стінки на відмітках +15...+25 м – встановлено:

- за умови зменшення товщини стінки на 128 мм (від 240 до 112 мм) несуча здатність димової труби при перевірці міцності бетону на стиск забезпечена з коефіцієнтом використання 0,99 за першою групою граничних станів (міцність) і 0,54 – за другою групою (жорсткість), максимальна деформація становить 148 мм;

- несуча здатність димової труби при перевірці заданого армування ($\varnothing 20A-II$, 200×200 мм) забезпечена з коефіцієнтом використання 0,81.

Для третього розрахункового випадку – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +25...+35 м – встановлено:

- за умови зменшення товщини стінки на 124 мм (від 220 до 96 мм) несуча здатність димової труби при перевірці міцності бетону на стиск забезпечена з коефіцієнтом використання 0,99 за першою групою граничних станів (міцність) і 0,52 – за другою групою (жорсткість), максимальна деформація становить 140 мм;

- несуча здатність димової труби при перевірці заданого армування ($\varnothing 20A-II$, 200×200 мм) забезпечена з коефіцієнтом використання 0,81.

Отже, у результаті аналізу напружено-деформованого стану встановлено, що найбільш небезпечною є зона конструкції труби на висоті близько 25 м. Максимально допустима глибина просування фронту корозійного і термічного пошкодження бетону в несучій конструкції, після якої ймовірність досягнення граничного стану стане високою, складає 124 мм, що відповідає товщині непошкодженого шару бетону на висоті 15–25 м – 112 мм, а на висоті 25–35 м – 96 мм.

Розрахунок залишкового ресурсу димової труби здійснено для третього розрахункового випадку – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування на відмітках +25...+35 м.

Ураховуючи те, що арматура розташована ближче до зовнішньої поверхні конструкції, ступінь дії середовища можна прийняти як для бетону середньо агресивним зі швидкістю корозії до 2,4 мм/р. У цьому випадку зменшення товщини стінки на 124 мм (від 220 до 96 мм) відбудеться за $124:2,4 = 51$ рік. Разом із тим для найбільш несприятливого випадку сильно агресивного ступеня дії середовища на залізобетон зі швидкістю корозії 4,8 мм/р. зменшення товщини стінки відбудеться за $124:4,8 = 26$ років.

Перше обвалення футерування відбулося у 2006 р. саме на відмітках 25–35 м, отже, на момент обстеження тривалість впливу агресивного середовища на бетон досягла 15 років. З урахуванням цього залишковий ресурс конструкції труби без ремонту футерування складатиме $51-15 = 36$ років, можливо, і $26-15 = 11$ років. Виходячи з цього, рекомендовано в найкоротший термін здійснити капітальний ремонт труби з усуненням пошкоджень і відновленням футерування або не пізніше ніж через 10 років зруйнувати споруду зі зведенням нової.

Висновки і рекомендації. Уточнено методику визначення залишкового ресурсу залізобетонної димової труби коксохімічного виробництва.

Проаналізовано результати натурального обстеження труби висотою 90 м, встановлено, що за понад 70 років експлуатації вона зазнала пошкоджень, з яких тим, що визначатиме залишковий ресурс, є обвалення футерування. Залишковий ресурс визначатимуть кінетикою корозії бетону в таких зонах.

Агресивне середовище є газоподібним, найбільш агресивними складовими якого є кислі гази, ступінь агресивної дії – середньо агресивний, можливо, сильно агресивний. Корозія бетону відбувається в місцях обваленого футерування і просувається концентричним фронтом від внутрішньої поверхні димоходу до зовнішньої зі швидкістю від

1,2 до 4,8 мм/р. Кородований шар бетону втрачає міцність і захисні властивості до арматури.

Виконано аналіз напружено-деформованого стану конструкції труби. Встановлено, що з урахуванням наявних обвалень футерування найбільш небезпечною є зона конструкції на відмітці близько 25 м. Максимально допустима глибина просування фронту корозії, після

якої ймовірність досягнення граничного стану стане високою, складає 124 мм.

Спрогнозовано залишковий ресурс, який складатиме 36 років, можливо, і 11 років. Рекомендовано в найкоротший термін здійснити капітальний ремонт труби з усуненням пошкоджень і відновленням футерування або не пізніше ніж через 10 років зруйнувати споруду зі зведенням нової.

Список використаних джерел

1. Ельшин А. М. Дымовые трубы. Москва: Стройиздат, 2001. 296 с.
2. Технічний висновок про стан будівельних конструкцій димової труби коксового цеху (H = 90 м), розташованої по вул. Карачівське шосе, 44, м. Харків: договір № 2201 від 19.07.2021 р. ТОВ «Харківбудніпроект». Харків, 2023.
3. Основи теорії тверднення, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій із них. Т. 3. Теорія міцності, руйнування і довговічності бетону, залізобетону і конструкцій із них / А. М. Пługін, А. А. Пługін, О. А. Калінін та ін.; за ред. А. М. Пługіна. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/331533663_Fundamentals_of_the_theory_of_hardening_strength_destruction_and_durability_of_Portland_cement_concrete_and_structures_made_of_them_Vol3_Theory_of_strength_destruction_and_durability_of_concrete_reinf.
4. Reddy T. V. G., Ojha P. N., Brijesh Singh, Rizwan Anwar, Vikas Patel. Condition Assessment and Repair Strategy for RCC Chimney of Thermal Power Station Located in Semi-Arid Region in India. In book: *Advances in Sustainable Materials and Resilient Infrastructure*. (2022). DOI: 10.1007/978-981-16-9744-9_19.
5. Marek Maj, Andrzej Ubysz, Hala Hammadeh, Farzat Askifi. Non-Destructive Testing of Technical Conditions of RC Industrial Tall Chimneys Subjected to High Temperature. *Materials* 12 (12). (2019). DOI: 10.3390/ma12122027.
6. Marek Maj, Andrzej Ubysz. The effects of thermal overload in chimney caused by insulation damage. *Journal of Physics Conference Series*, 1706 (1). (2020). 012198. DOI: 10.1088/1742-6596/1706/1/012198.
7. Xiaowu Huang, Xianqi Xie, Jinshan Sun, Dongwang Zhong, Yingkang Yao, Shengwu Tu. Monitoring and Analysis of the Collapse Process in Blasting Demolition of Tall Reinforced Concrete Chimneys. *Sensors* 23(13). (2023). 6240. DOI: 10.3390/s23136240.
8. Захист будівельних конструкцій та споруд від агресивних впливів / А. А. Пługін, І. Е. Казімагомедов, О. О. Скорик та ін. Харків: УкрДУЗТ; ХНУБА, 2017. 188 с.

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Жван Віктор Денисович, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID iD: 0009-0006-7593-1696. Тел.: +38 (067) 570-05-16. E-mail: bud.nuzp@gmail.com.

Лобяк Олексій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245. Тел.: +38 (057) 730-10-70. E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Назаренко Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID iD: 0000-0003-3738-1129. Тел.: +38 (066)783-98-55. E-mail: alexnazar75.an@gmail.com.

Наджафов Ельшад Фаїд огли, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>. E-mail: nadjafov@kart.edu.ua.

Березовська Альона Олександрівна, аспірантка, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-5503-5283> Тел.: +38 (098)728-57-97. E-mail: berezovskaja.alna@ukr.net.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Zhvan Viktor PhD (Tech). Professor of the Department of Development and Project Management, National University «Zaporizhzhia Polytechnic» of Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-2541-2066. Tel.: +38(061)7698503; +38 (067)5700516. E-mail: kafedra_bud@zp.edu.ua; viktor.zhvan@ukr.net.

Lobiak Oleksii, PhD (Tech). Associate Professor, department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245. Тел.: +38 (057) 730-10-70. E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Nazarenko Oleksiy Mykolayovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Development and Project Management, National University «Zaporizhzhya Politechnic». ORCID iD: 0000-0003-3738-1129. Tel.: +38 (066) 783-98-55. E-mail: bvup2021@ukr.net, alexnazar75.an@gmail.com.

Najafov El'shad Faih Ohly, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>. E-mail: nadjafov@kart.edu.ua.

Berezovska Alona, postgraduate student, National University «Zaporizhzhya Politechnic». ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-5503-5283> Тел.: +38 (098)728-57-97. E-mail: berezovskaja.alna@ukr.net.

Статтю прийнято 16.05.2024 р.

УДК 624.07

АНАЛІЗ ДЕСТРУКЦІЙ І МЕТОДІВ ПІДСИЛЕННЯ ЗБІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРЕКРИТТІВ

Аспіранти К. О. Бінкевич, А. В. Володимиров, А. В. Колчанов

ANALYSIS OF DESTRUCTIONS AND STRENGTHENING METHODS OF PRECAST REINFORCED CONCRETE FLOOR PANELS

**Postgraduate student K. Binkevych, Postgraduate student A. Volodymyrov,
Postgraduate student A. Kolchanov**

Анотація. У статті наведено результати натурного обстеження панелей перекриттів багатопверхових будинків мікрорайону Північна Салтівка 3 в м. Харкові. Проаналізовані основні деструкції, на базі яких надано градацію ступенів пошкодження. Виокремлено категорії пошкоджень, за яких доцільно виконувати роботи з підсилення. Також у статті розглянуто найбільш поширені способи підсилення деструктурованих залізобетонних перекриттів і наведено прототип конструкції для розроблення конструктивного рішення з відновлення пошкоджених панелей перекриттів.

Ключові слова: великопанельні будинки, деструкції, панелі перекриттів, типова серія.

Abstract. *Currently, there is a high demand in Ukraine for the rapid restoration of buildings destroyed and damaged as a result of Russian armed aggression, as most people, despite active shelling of cities (especially those close to combat zones) and consequent constant danger, want to return to their homes. Due to military aggression to over 160,000 buildings in Ukraine got extensive damage, with nearly 20,000 high-rise residential structures being built using large-panel construction. The challenges of restoration include unpredictable structural failures and the economic feasibility of repair methods.*

Recent studies on building restoration in Ukraine due to military damage have emerged only in recent years, with a focus on panel buildings being notably absent in international literature. Given the current situation, domestic research primarily addresses the inspection methodologies and classification of war-related damages, offering preliminary assessments but limited restoration recommendations.

In this paper, the authors focused on the panel construction of Kharkiv city, as these buildings account for the most destruction among residential buildings. The assessment of damage to panel slabs of multi-story residential buildings focusing on the heavily affected North Saltivka district due to artillery shelling and rocket strikes is discussed. Despite occupying only 9 % of the area, residential buildings in North Saltivka sustained significant damage, with 70 % affected. Construction in the area consists mainly of precast concrete panel buildings of various heights and designs. Damage severity varies, ranging from minor cracks to complete structural failure, influencing repair and reinforcement strategies. The assessment involves on-site inspections and categorizes damage levels to determine the buildings' suitability for repair or replacement. Based on numerous inspections of panel buildings, in which the authors of the article directly participated, it was possible to identify a gradation of the degree of damage to the panels of multi-storey buildings. As a result of summarizing the obtained information, three categories of panels with acceptable damage for restoration were identified.

An analysis of existing methods for reinforcing such structures allowed the selection of a prototype for detailed development of a structural solution to restore the load-bearing capacity of such panels. In the future, the authors of the article will focus on improving the described structural solution and developing a step-by-step technology for its implementation.

Keywords: *large-panel system houses, destruction, floor panels, typical series.*

Вступ. В Україні станом на січень 2024 р. після вторгнення, обстрілів і воєнних дій, здійснюваних російською федерацією, зруйновано та пошкоджено більше 160 тис. будівель і споруд [1]. Майже 20 тис. із них – багатоповерхові житлові будинки, виконані, зокрема, за технологією великопанельного будівництва. Значна кількість будівель має масштабні пошкодження у вигляді обвалення частини будівлі від покриття до фундаментів (рис. 1, а). Окремий клас складних завдань становлять питання відновлення пошкоджень, пов'язаних із руйнуваннями основних несучих конструкцій окремих поверхів внаслідок влучання і детонування снарядів (рис. 1, б). Такі пошкодження мають

непередбачуваний характер, оскільки можуть призвести до подальшого руйнування та катастрофічних наслідків у будь-який момент. Тому необхідність підсилення аварійних конструкцій виникає задовго до початку глобальних відновлювальних робіт. Під час відновлення будівлі проєктом не завжди передбачено демонтаж розташованих вище конструкцій і заміну їх новими, оскільки такі роботи підвищують кінцеву вартість ремонту і збільшують час і трудомісткість. Виникає необхідність підсилення, а іноді й дублювання пошкоджених несучих елементів в умовах, наближених до наявних архітектурних планувань і техніко-економічних показників будівлі.

Як зазначено вище, великий відсоток багатоквартирних житлових будинків, що підлягають відновленню, припадає на панельні будинки. Це інженерне рішення передбачало будівництво житлових будинків із великоформатних залізобетонних панелей заводського виготовлення за серійними типовими проектами. Такий вид будівництва був зорієнтований на індустріалізацію будівництва і давав змогу отримати мінімальну собівартість квадратного метра житла за високих темпів будівництва. Прикладом масової забудови за типовими проектами є місто Харків – великопанельні житлові будинки в усіх районах міста.

Внаслідок дії надмірних позапроектних навантажень, викликаних впливом вибухових хвиль та обваленням розташованих вище конструкцій, елементи панельних будинків зазнають значних пошкоджень і стають непридатними до

подальшої експлуатації. Зокрема, в пошкоджених перекриттях при обстеженні спостерігають тріщини в розтягнутій нижній зоні, в середині прольоту і вертикальні прогини, що перевищують нормативні значення. Несуча здатність таких конструкцій значно знизилась і не відповідає експлуатаційним вимогам. Відновлення стін таких будинків є простішим завданням, ніж відновлення перекриттів, адже через незначну товщину панелей перекриття заміна їх збірними багатопустотними плитами призводить до зменшення корисної висоти приміщення або нестикування підлоги приміщення з рівнем сходової клітки. Використання монолітного перекриття призводить до суттєвого здорожчання конструкції та збільшення строків відновлення. Тому відновлення панелей перекриттів там, де це можливо, – найбільш раціональне рішення.



Рис. 1. Приклади руйнування панельної забудови міста Харків:
а – обвалення несучих конструкцій будівлі від рівня покрівлі до фундаментів; б – руйнування несучих конструкцій 4-6 поверхів

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ураховуючи особливості ситуації, що склалася зараз в Україні, слід зазначити, що дослідження, присвячені відновленню будівель внаслідок впливу бойових дій, почали появлятися у вітчизняній літературі лише в останні два роки. Якщо ж брати до уваги відновлення власне панельних будинків, пошкоджених вибуховим впливом або дією засобів ураження, то такі дослідження відсутні в закордонних джерелах. Більшість публікацій вітчизняних авторів до 24 лютого 2022 р. [2, 3] і сучасних закордонних публікацій [4-6] присвячено модернізації панельних будинків внаслідок морального та фізичного зносу або необхідності термомодернізації. В останні роки з'являються також роботи, у яких розглянуто залучення сучасних ВІМ-комплексів [7] і нейромереж [8] для оцінювання технічного стану великих житлових масивів. Аналізуючи публікації вітчизняних авторів, слід зазначити, що вони переважно присвячені методикам обстеження будинків [9, 10], пошкоджених внаслідок військової агресії, і класифікації отриманих пошкоджень. У роботі [11] висвітлено проблеми визначення технічного стану будинків, що зазнали пошкоджень у Київській області, наведено градацію і детальний опис прикладів найбільш поширених пошкоджень. Разом із тим самим автором зазначено, що стаття має оглядовий характер для ознайомлення читачів із масштабами проблеми, але не дає рекомендацій щодо подальшого відновлення пошкоджених споруд.

У дослідженні [12] наведено рекомендації з обстеження та відновлення експлуатаційної придатності власне панельних будинків на базі узагальненого досвіду обстеження пошкоджених будинків у містах Києві та Чернігові, а також Київській області. Автори надають покрокові рекомендації з обстеження панельних будинків з I та II категоріями технічного стану згідно з роботою [13], а

також класифікують п'ять основних видів пошкоджень їхніх несучих конструкцій. У статті також наведено і деякі рішення з укріплення пошкоджених панелей при проведенні протиаварійних робіт.

Робота [14] відображує результати оцінювання технічного стану будівель, пошкоджених внаслідок бойових дій по всій території України. У дослідженні на конкретних прикладах розглянуто два основні випадки впливу воєнних дій: перший – влучання поряд із будівлею; другий – пряме влучання в будівлю або вибух великої потужності поряд із будівлею. За результатами дослідження зазначено, що найбільш стійкими до впливу воєнних дій слід вважати каркасно-монолітні будівлі, у той час як найменш стійкими названо панельні будинки. Автори зазначають, що загальний характер пошкоджень не залежить від типу будівлі та спрямованості влучання – безпосередньо в будівлю чи поруч із нею. Разом із тим для кожного типу будівель можна зазначити притаманні лише їм дефекти і пошкодження.

У проаналізованих роботах, на жаль, відсутня інформація про конкретні конструктивні рішення з відновлення пошкоджених елементів будівель. Частково це визначено тим, що попри велику кількість зруйнованих будівель кожен конкретний випадок руйнування все ж таки є унікальним, і вибір конструктивних рішень багато в чому визначений територією розташування об'єктів і, як наслідок, можливістю використання тієї чи іншої техніки, технологій і матеріалів. Крім того, використовувані рішення багато в чому залежать від «традицій будівництва» і технічних можливостей безпосередніх виконавців робіт, адже в роботах із відновлення задіяні сотні компаній різного рівня. У цьому дослідженні зроблено спробу класифікувати пошкодження панелей перекриттів багатопверхових панельних будинків і надати універсальне конструктивне рішення з їхнього

відновлення, яке можна масштабувати в пошкоджених будівлях по всій Україні.

Визначення мети і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз пошкоджень перекриттів великопанельних житлових будинків, отриманих внаслідок впливу об'єктів ураження та вибухових хвиль, та ефективних методів підсилення. Об'єкт дослідження – збірні залізобетонні панелі перекриттів з деструкціями різного характеру. Завдання дослідження:

- проаналізувати наявний досвід обстеження та підсилення плит перекриттів різної конструкції;

- класифікувати наявні пошкодження панелей перекриттів багатоповерхових будинків, отримані внаслідок військової агресії рф.

Основна частина дослідження. Для оцінювання ступеня пошкоджень панелей

перекриттів багатоповерхових житлових будинків розглянуто район Харкова, який найбільше постраждав від артилерійських обстрілів і ракетних ударів від початку повномасштабного вторгнення, – Північна Салтівка, розташований за 25 км від кордону з російською федерацією. З початку війни цей район зазнав великої кількості обстрілів, тому найбільша кількість пошкодженої панельної забудови припадає саме на нього. Уся Північна Салтівка має площу 64056 м², з яких житлова забудова – 9 % ділянки, проте з них 70 % будинків – пошкоджені або зруйновані. Найбільшого удару зазнав мікрорайон Північна Салтівка 3, де вцілілих залишилося лише шість будинків [15] (рис. 2) з 32 (27 з них – це житлові будинки, 4 – будівлі навчальних закладів, один медичний заклад).

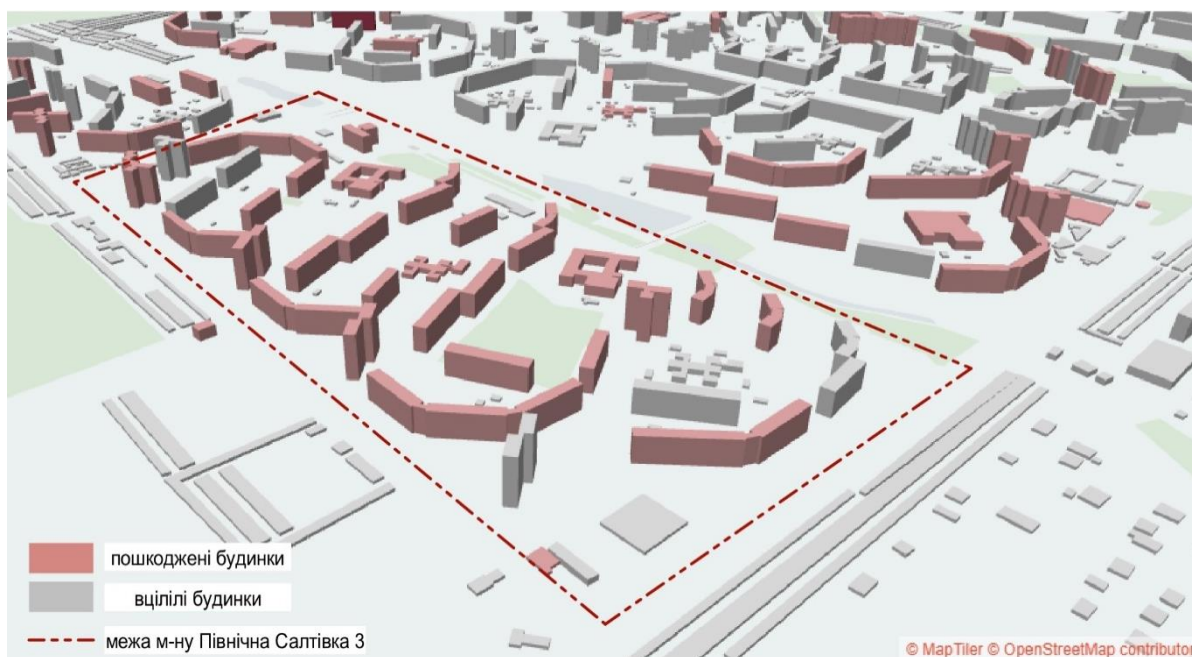


Рис. 2. Схема пошкоджених будинків Північної Салтівки 3

Щодо конструктивного рішення житлових будинків мікрорайону, то всі вони зведені за типовими серіями зі збірних залізобетонних елементів заводського виготовлення – панелей. Це переважно 9-,

12- і 16-поверхові будинки, розроблені в різний час у Харкові, що несуттєво відрізняються модульними блоками. Разом із тим принципи загальної будівельної структури однакові для всіх типологій.

Внутрішні і зовнішні стіни будівель – несучі, висотою 3.0 м, довжина ж змінюється від 3.0 до 6.0 м (залежно від серії будівлі). Одиночні збірні панелі формують підлогу, навантажуючи стіни, і з'єднані горизонтально за допомогою так званого платформного стику для утворення єдиних дисків перекриттів. Таке стикування передбачає передавання вертикальних стискальних навантажень через опорні ділянки плит перекриттів і два горизонтальні шви з цементно-піщаного розчину. Додаткові елементи формують блоки балконів і сходів. Розглядаючи

будинки Північної Салтівки 3, можна виокремити будівлі, виконані за 162 і 163 типовими серіями та серією II-57 (рис. 3).

Ступінь пошкодження згаданих будинків відрізняється. Лише на декількох будинках можна помітити вибиті вибуховою хвилею вікна або посічені осколками фасади, більшість же будівель зазнали прямих влучань об'єктів ураження, у результаті чого зруйновані окремі поверхи, під'їзди та цілі секції, як було раніше показано на рис. 1. Отже, і ступінь пошкодження панелей перекриттів також варіюється.



Рис. 3. Типологія будинків Північної Салтівки 3 за типовими серіями [16]

Ступінь пошкодження будівель визначено шляхом детального обстеження на місці. Оцінювання потреби в ремонті або підсиленні будівельних конструкцій з метою відновлення або підвищення їхньої несучої здатності та експлуатаційної придатності базовано на даних, зібраних під час інспекції їх відповідно до вимог ДСТУ-Н Б В.1.2-18 [13], а також результатів перевірочних розрахунків, проведених відповідно до вимог нормативних документів [17]. Стан придатності об'єкта до подальшої експлуатації визначено на основі технічного стану окремих конструкцій:

«нормальний», «задовільний», «непридатний для нормальної експлуатації», «аварійний». У випадку, коли технічний стан конструкцій виявлено непридатним для нормальної експлуатації, передбачено виконання ремонту або підсилення у звичайному порядку. За аварійного стану вживають заходи для того, щоб уникнути перебування людей у зоні ризику, ремонтують або підсилюють конструкції з попереднім запобіганням їхньому раптовому руйнуванню; як варіант, розглядають заміну аварійних конструкцій або демонтаж об'єкта в цілому (залежно від

ступеня пошкоджень і безпеки проведення ремонтних робіт).

Якщо проаналізувати ступені пошкодження панелей перекриттів будинків на Північній Салтівці 3, то можна виділити таку градацію.

Перший ступінь (рис. 4) – слабкі пошкодження, зниження несучої здатності

до 15 %. Міцність бетону відповідає проєктній. Зміна кольору за впливу пожежі незначна – сажа та кіптява на поверхнях. При простукуванні молотком захисний шар відколюється по кутах на глибину трохи більше 10 мм. Волосяні тріщини на поверхні бетону вздовж робочої арматури. Локальні пошкодження захисного шару арматури.



Рис. 4. Фотофіксація панелей перекриттів зі ступенем пошкодження 1

Другий ступінь (рис. 5) – середні пошкодження, зниження здатності до 35 %. Міцність бетону відповідає проєктній. Зміна кольору за дії пожежі незначна – до рожевого відтінку. При простукуванні молотком захисний шар відколюється по

кутах на глибину трохи більше 20 мм. На поверхні розтягнутої зони бетону видно сітку неглибоких температурно-збіжних тріщин шириною розкриття до 1 мм. Прогин плити не перевищує нормативний.



Рис. 5. Фотофіксація панелей перекриттів зі ступенем пошкодження 2

Третій ступінь (рис. 6) – сильні пошкодження, зниження здатності до 50 %. Міцність бетону відповідає проєктній. Зміна кольору за дії пожежі незначна – від рожевого до світло-жовтого. При простукуванні молотком захисний шар відколюється по кутах на глибину трохи більше 20 мм. На поверхні бетону видно глибокі тріщини шириною розкриття до

2 мм. Конструкція отримала прогин близький до допустимого або трохи вищий за допустимий.

Четвертий ступінь (рис. 7) – аварійний стан конструкції. Тріщини шириною розкриття 3-5 мм, оголення робочої арматури, тріщини в стиснутій та опорній зоні. Прогини перевищують 1/50 прольоту, що спричинено плинністю арматури.



Рис. 6. Фотофіксація панелей перекриттів зі ступенем пошкодження 3



Рис. 7. Фотофіксація панелей перекриттів зі ступенем пошкодження 4

П'ятий ступінь (рис. 8) – повна втрата несучої здатності, обумовлена втратою стійкості, роздавлюванням бетону, порушенням анкерування, оголенням і розривом робочої арматури.

Узагальнена наведена вище інформація подана в таблиці, де наведені найпоширеніші деструкції панелей

перекриттів і позначено допустимість наявності тих чи інших пошкоджень для різних ступенів. У таблиці не враховано допустимі межі деструкцій, вказано лише факт їхньої наявності або відсутності (де х означає, що наявність деструкції не допускають, \checkmark – допускають).



Рис. 8. Фотофіксація панелей перекриттів зі ступенем пошкодження 5

Таблиця

Відповідність характерних деструкцій різним ступеням пошкодження панелей

Характерні деструкції	Ступені пошкодження панелей				
	Ступінь 1	Ступінь 2	Ступінь 3	Ступінь 4	Ступінь 5
Сколювання бетону	√	√	√	√	√
Зниження несучої здатності	√	√	√	√	√
Волосяні тріщини	√	√	√	√	√
Зміна кольору бетону	x	√	√	√	√
Тріщини з розкриттям > 1 мм	x	x	√	√	√
Ненормативні прогини	x	x	√	√	√
Непроектна марка бетону	x	x	x	√	√
Оголення робочої арматури	x	x	x	√	√
Розрив робочої арматури	x	x	x	x	√

Як видно з наведених світлин руйнувань, опису пошкоджень, що характеризують кожен зі ступенів, і узагальненої таблиці, виконувати роботи з підсилення допустимо тільки в тому випадку, якщо пошкодження панелей перекриттів відповідають ступеням 1-3.

У випадку, коли технічний стан конструкції аварійний (ступені 4-5), можливим є тільки повний демонтаж конструкції з її наступною заміною.

Підсилення залізобетонних плит перекриттів рекомендовано виконувати нарощуванням перерізів або влаштуванням розвантажувальних елементів у верхній або нижній зонах плити. Зокрема, підсилення плит перекриттів нарощуванням перерізів здійснювано:

- влаштуванням залізобетонного нарощування плити знизу з застосуванням сталевих смуг або арматурних сіток, прикріплених на анкерних болтах крізь

просвердлені в плиті отвори чи іншим способом з наступним торкретуванням;

- улаштуванням залізобетонного нарощування плити згори з анкерами або шпонками для зчеплення нового бетону зі старим.

Підсилення плит перекриттів встановленням розвантажувальних елементів здійснюють:

- встановленням напружених розвантажувальних шпренгелів зі стрижневої арматури в поздовжніх і похилих борознах із анкерними пристроями і натяжними гайками;

- підведенням розвантажувальних металевих балок із підвіскою на опорні ділянки за допомогою стяжних болтів і підклинювання.

З метою більш повного включення в сумісну роботу елементів підсилення з наявними плитами, рекомендовано на період виконання робіт плити піддомкращувати або забезпечувати їхнє розвантаження.

Вибір методів підсилення визначають не лише на основі технічного стану конструкції, але і з урахуванням техніко-економічних показників та естетичності того чи іншого рішення. Адже наявність виступаючих елементів, наприклад на стелях, потребує додаткових витрат на декорування та зменшує чистову висоту приміщення, яка в панельній забудові і так обмежена. Проаналізувавши пошкодження панельної забудови та власне перекриттів, найбільш актуальним методом підсилення ми вважаємо нарощування верхньої стиснутої зони плити, але в такий спосіб, щоб за допомогою тимчасового розвантажувального нижнього армування було забезпечено проектне положення перекриття і улаштування бетонного елемента нарощування. Після набрання бетоном плити нарощування допустимо виконати демонтаж нижнього тимчасового армування. Подібне рішення було реалізоване за реконструкції будівлі Регіонального центру надання адміністративних послуг в

м. Харкові в 2017 р. Проектом було передбачено виконання монолітної плити нарощування з використанням самоущільнюваного бетону [18] поверх наявних збірних круглопустотних плит перекриттів. Забезпечення сумісної роботи реалізовано шляхом установаження каркасів між поздовжніми ребрами плит і з'єднання їх із верхньою сіткою, а також засвердлювання збірних ригелів і з'єднання їх із армуванням плити нарощування за допомогою хімічних анкерів (рис. 9).

Таке рішення дало змогу збільшити корисне навантаження на плити каркаса до 1000 кг/м². Це підсилення продемонструвало свою ефективність, адже на сьогодні будівлю після реконструкції успішно експлуатують уже сім років. Крім того, матеріаломісткість реалізованого підсилення дуже низька, зокрема витрати арматури склали 2,5 кг/м², а бетону – 0,06 м³/м². Отже, пріоритетним напрямом для подальшого дослідження є розроблення конструктивного рішення підсилення саме у вигляді монолітної плити нарощування в стиснутій зоні панелей перекриттів.

Висновки. На сьогодні в Україні існує великий запит на швидке відновлення будівель, зруйнованих і пошкоджених внаслідок збройної агресії РФ, адже більшість людей, незважаючи на активні обстріли міст (особливо близько розташованих до зон бойових дій) і, як наслідок, постійну небезпеку, бажають повернутися у власні домівки. Через нинішню ситуацію серед вітчизняних наукових досліджень почали з'являтися роботи, присвячені питанням обстеження та відновлення пошкодженого житлового фонду. Разом із тим більшість мають оглядовий характер і відображують лише результати оцінювання технічного стану будівель, пошкоджених внаслідок військової агресії.

У статті автори зосередили свою увагу на панельній забудові міста Харкова, оскільки найбільше руйнувань серед житлового фонду припадає саме на такі

будинки. На основі численних обстежень панельних будівель, у яких брали безпосередньо участь автори статті, удалося виділити градацію ступенів пошкодження панелей перекриттів багатоповерхових будівель. У результаті узагальнення отриманої інформації виділено три категорії панелей із пошкодженнями, які допустимо відновлювати. Аналіз сучасних методів

підсилення таких конструкцій дав змогу обрати прототип для детального розроблення конструктивного рішення з відновлення несучої здатності таких панелей. У подальшому автори статті більше розглядатимуть питання вдосконалення описаного в статті конструктивного рішення та розроблення покрової технології його реалізації.

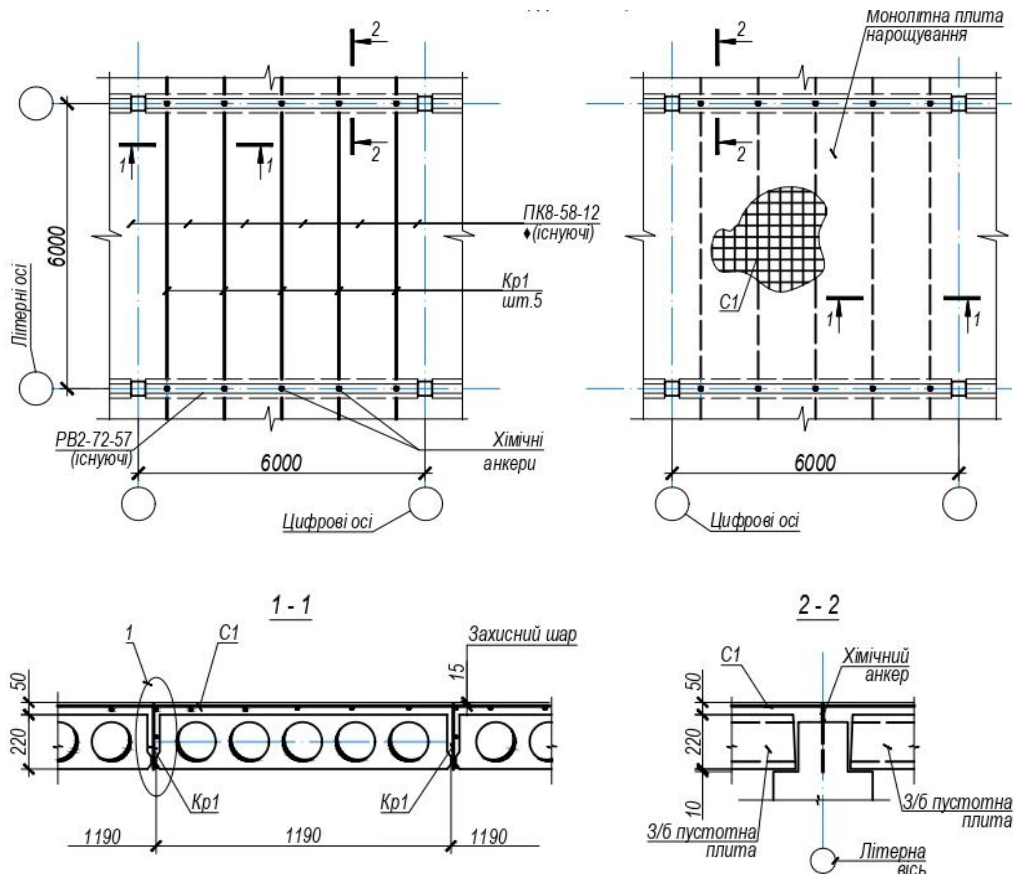


Рис. 9. Проєктне рішення підсилення збірних залізобетонних плит каркаса РЦНАП у м. Харкові

Список використаних джерел

1. Статистика бази даних воєнних злочинів Т4Р. URL: <https://t4pua.org/stats> (дата звернення 24.04.2024).
2. Гриневич Е., Гаєвой Ю., Вяткін В., Каржинерова Т. І. Проблеми реконструкції житлових будинків, що побудовані у 60-70 рр. ХХ сторіччя у місті Харкові. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Т. 104, № 2. С. 140-147.
3. Андрухов В., Колесник А., Мартинова, Л., Матвійчук В. (2010). Оцінка технічного стану житлових будинків перших масових серій індустріального зведення та варіанти їх

перспективи у майбутньому. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 8(1). 103–111. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/101> (дата звернення 24.04.2024).

4. Kanoniczak M., Knyziak P. (2022). Uszkodzenia i zniszczenia wewnętrznych elementów budynków wykonanych w technologii wielkiej płyty oraz sposoby ich naprawy w ramach prawidłowej działalności remontowo-eksploatacyjnej. *Builder*. 294(1). 4-8. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.5798>.

5. Szulc J. Techniczne możliwości modernizacji budynków z wielkiej płyty. *Izolacje*. 2018. 23 (2). P. 14–23.

6. Nowakowski P. Functional and Aesthetic Aspects of Modernization of Large Panel Residential Buildings. (2020). 10.1007/978-3-030-20151-7_32.

7. Wardach M., Pawłowicz J. A., Kosior-Kazberuk M., Krentowski J. R. The Diagnostics of the Condition and Management of Large-Panel Buildings Using Point Clouds and Building Information Modelling (BIM). *Buildings*. 2023. 13. 2089. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13082089>.

8. Knyziak P., Estimating the Technical Deterioration of Large-panel Residential Buildings Using Artificial Neural Networks. *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 91. P. 394-399. ISSN 1877-7058. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.082>.

9. Molodid O., Kovalchuk O., Skochko V., Plokhuta R., Molodid O., Musiiaka I. Inspection of war-damaged buildings and structures by the example of urban settlement Borodianka. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2023. P. 328-343. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.328-343>.

10. Табаркевич О., Сергійчук В., Табаркевич Н. (2023). Відновлення Пошкоджених обстрілами житлових будинків чернігівщини. *Наука та будівництво*. 37(3). URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-7>.

11. Нужний В. (2022). Перші дослідження ушкоджень будівель і споруд внаслідок бойових дій. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. (11). 104–114. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.104-114>.

12. Мелашенко Ю., Слюсаренко Ю., ІщенкоЮ., Павлюк, Є. (2023). Досвід обстеження панельних будинків, пошкоджених внаслідок бойових дій. *Наука та будівництво*. 36(2). URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-5>.

13. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Чинний від 01-04-2017. URL: http://pdf.sop.zp.ua/standart_dstu-n_b_v_1_2-18_2016.pdf (дата звернення 24.04.2024).

14. Менейлюк О., Менейлюк І., Русский В. Дослідження стану будівель та споруд пошкоджених внаслідок воєнних дій. *Будівельне виробництво*. № 75 (2023). С. 17-26. URL: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.75.17-26>.

15. Розстріляна, але жива: Північна Салтівка. URL: <https://texty.org.ua/d/2023/saltivka/> (дата звернення 15.05.2024).

16. Kharkiv housing challenge: Upgrading concrete panel housing and residential neighbourhoods in Ukraine's second largest city. URL: https://architecturecompetitions.com/kharkivhousingchallenge/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_term=2024-05-06&utm_campaign=Norman+Foster+invites+Kharkiv+Housing+Challenge (дата звернення 15.05.2024).

17. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Чинний від 01-06-2011. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-792> (дата звернення 24.04.2024).

18. Bugayevskiy S., Voronova Y., Shtefan O. Use of self-compacting concrete during reconstruction of the building for the administration service Centre. *Автомобільний транспорт*. Вип. 39 (2016). С. 21-27.

Бінкевич Костянтин Олександрович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380667315616. ORCID ID: <https://orcid.org/000-0002-5112-9870>. E-mail: kostiantyn.binkevich@kname.edu.ua.

Володимиров Антон Валерійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380505881321. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-8416-535X>. E-mail: anton.volodymyrov@kname.edu.ua.

Колчанов Андрій Володимирович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: +380504009060. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7813-2965>. E-mail: andrii.kolchanov@kname.edu.ua.

Binkevych Kostiantyn, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: <https://orcid.org/000-0002-5112-9870>.

E-mail: kostiantyn.binkevich@kname.edu.ua.

Volodymyrov Anton, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-8416-535X>.

E-mail: anton.volodymyrov@kname.edu.ua.

Kolchanov Andrii, postgraduate student, department of building structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7813-2965>.

E-mail: andrii.kolchanov@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 05.06.2024 р.

УДК 691.32

ОСОБЛИВО ДРІБНОЗЕРНИСТИЙ БЕТОН ІЗ ВІДХОДІВ ГЗК ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ

Д-р техн. наук А. А. Пługін, інж. В. М. Чайка,
аспіранти С. М. Мусяєнко, Е. Ф. Наджафов

EXTRA FINE-GRAINED CONCRETE FROM WASTE OF MINING CONCENTRATION PLANT FOR CONSTRUCTION PRODUCTS

Dr.Sc. (Tech.) A. A. Plugin, engineer V. M. Chaika,
graduate students S. M. Musienko, E. F. Najafov

Анотація. Виконано теоретичне обґрунтування отримання особливо дрібнозернистого бетону (ОДБ) із хвостів Полтавського гірничо-збагачувального комбінату як дрібнозернистого заповнювача. Обґрунтовано його структуру з урахуванням контактів між зернами заповнювача кутастої форми, доведено можливість підвищення міцності введенням мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів із частинками розміром, меншим у п'ять разів, ніж зерна заповнювача і частинки цементу відповідно. Обґрунтовано визначення складу ОДБ із хвостів Полтавського ГЗК шляхом визначення і забезпечення оптимальної величини коефіцієнта розсунення зерен заповнювача цементним тістом із включенням до нього

пилуватих фракцій заповнювача. Визначено та експериментально підтверджено оптимальний склад ОДБ з обов'язковим застосуванням добавки суперпластифікатора – полікарбоксилату або сульфонафталінформальдегіду. Експериментально досліджено залежності міцності на стиск і розтяг ОДБ від виду і вмісту добавок-суперпластифікаторів, відношення вмісту заповнювача до вмісту цементу, вмісту мікрокремнезему, тиску пресування. Встановлено, що за однакового вмісту заповнювача та В/Ц міцність ОДБ на хвостах ГЗК перевищує міцність дрібнозернистого бетону на природному особливо дрібнозернистому піску у два рази і досягає у віці 28 діб 35 МПа. Уведення мікрокремнезему дає змогу ще підвищити міцність на стиск на 44 %. Вироби з ОДБ запропоновано формувати пошаровим пресуванням за тиску пресування 12 МПа.

Ключові слова: відходи гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК), особливо дрібнозернистий бетон (ОДБ), гранулометричний склад заповнювачів, мікронаповнювач, мікрокремнезем, суперпластифікатор.

Abstract. The theoretical substantiation of the production of especially fine-grained concrete (EFC) from the waste of the Poltava Mining Concentration Plant as a fine-grained aggregate has been performed. Its structure is substantiated taking into account the contacts between the angular aggregate grains, the possibility of increasing strength by introducing mineral fillers and microfillers with particles 5 times smaller than the aggregate grains and cement particles, respectively, is proved. The determination of the composition of EFC from the waste of the Poltava MCP was substantiated by determining and ensuring the optimal value of the coefficient of displacement of aggregate grains by cement paste $\mu_{opt} = 1.89$ with the inclusion of dusty fractions of the aggregate. The optimal composition of EFC Aggregate : Cement : Water = (3–3.15):1:0.5 with mandatory use of superplasticizer additive to ensure W/C = 0.5 was determined and experimentally confirmed. The dependences of compressive and tensile strength of EFC on: type and content of superplasticizer additives were experimentally investigated; ratio of aggregate content to cement content; microsilica content; pressing pressure. It was established that the maximum strength of EFC is achieved in the case of the use of superplasticizers: polycarboxylate 1.5 % or sulfonaphthalin formaldehyde 1 % by weight of cement. It was also established that with the same A:C = 3:1 and W/C = 0.5, the strength of EFC on the waste of Poltava MCP exceeds the strength of fine-grained concrete on natural, especially fine-grained sand: in compression - by 2 times, in tension - by 1.9 times and reaches 35 MPa at the age of 28 days. The addition of microsilica in the amount of up to 15 % of the mass of cement allows to further increase the compressive strength by 44 %, and the tensile strength by 20 %. It is proposed to form EFC products by layer-by-layer pressing with a layer thickness of 5 mm. It was experimentally established that the maximum strength is achieved at a pressing pressure of 12 MPa.

Keywords: waste from mining concentration plants, extra fine-grained concrete, particle size distribution of aggregates, microfiller, microsilica, superplasticizer.

Вступ. У шламонакопичувачах гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) накопичена велика кількість відходів збагачення руд – хвостів, пустої породи, що видобувається разом із рудою та відділяється від неї. На території тільки Полтавського ГЗК таких відходів близько 450 млн м³. Їх використання для виробництва будівельних матеріалів і виробів є

привабливим через безкоштовність, а також можливість звільнення великих площ сільськогосподарських земель, на яких вони накопичені.

Відходи ГЗК за дисперсністю відповідають заповнювачам для дрібнозернистих бетонів. Порівняно зі звичайними бетонами дрібнозернисті бетони мають низку особливостей і переваг,

які можуть визначити галузі їх застосування, недосяжні для звичайних бетонів. За відсутності крупного заповнювача вони мають більш однорідні структуру та властивості [1], краще модифіковані дисперсним армуванням, можуть бути армовані сітками з дуже дрібними комірками, що даватиме змогу виробляти тонкостінні полегшені конструкції для складних архітектурно-конструктивних рішень –багатошарових, ребристих, просторових [2].

Проте дрібнозернисті бетони мають і недоліки, основним із яких є висока водопотреба, яка потребує збільшених витрат цементу [3]. У свою чергу відходи ГЗК неоднорідні, що ускладнює створення уніфікованих підходів до розроблення складів дрібнозернистого бетону [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на зазначений недолік, дрібнозернисті бетони дуже популярні в сучасних дослідників. Долаючи цей недолік, деякі автори намагаються знижувати витрати клінкера, використовуючи малоклінкерні шлакопортландцемент [5], композиційний цемент [6], замінюючи частину дрібного заповнювача пуцоланово активними золою [7], туфом [8], іншими неорганічними дисперсними відходами [9]. У роботі [3] витрати води та В/Ц знижені за рахунок уведення добавок-суперпластифікаторів, а в роботах [2, 3, 8, 10] міцність підвищено за рахунок додавання фібри. Більшість зазначених робіт виключно емпіричні. Лише автори робіт [5, 6] намагаються підвищувати фізико-механічні властивості дрібнозернистого бетону на основі аналізу взаємодій у ньому як у дисперсній системі, проте залучають для цього незрозумілі явища гідрофобної та гідрофільної гідратації. У роботі [11] для цього ж використовують побудови щільних упаковок куль і пропонують раціональні співвідношення розмірів зерен і витрат дрібних заповнювачів. У роботах [12, 13] показано,

що фізико-механічні властивості дрібнозернистих бетонів визначені переважно електроповерхневими властивостями високодисперсних продуктів гідратації та кількістю електрогетерогенних контактів між ними [14]. Зокрема в роботі [13] встановлено, що максимальних показників міцності можна досягти в разі балансу між сумарними площами поверхонь дисперсних фаз із позитивним і негативним поверхневими зарядами та відповідними їм активними центрами поверхонь.

Мета досліджень – теоретичні та експериментальні основи отримання дрібнозернистого бетону із хвостів Полтавського ГЗК з покращеними фізико-механічними характеристиками для будівельних виробів.

Матеріали і методи досліджень. Досліджено відходи рудозбагачення (хвости) Полтавського гірничо-збагачувального комбінату. Відходи гірничо-збагачувальних комбінатів складаються з неокатаних частинок неправильної форми розміром від 0,05 до 1 мм [4]. Їхній хімічний склад і щільність залежать від мінерального складу породи, яка містить корисні копалини. У складі хвостів звичайно переважають кварц, польовий шпат, кальцит, вміст глинистих мінералів незначний. За фізичними властивостями хвости є незв'язними матеріалами з незначним внутрішнім зчепленням, не мають пластичності, не набухають, малогіроскопічні.

Мінеральний склад хвостів Полтавського ГЗК [15, 16]: кварц – 65 %, карбонати – 14 %, магнетит – 3,5 %, інші мінерали. Рівноважний електроповерхневий потенціал кварцу SiO_2 у середовищі порового електроліту цементного каменю з $pH = 12$ складає $\psi_{ep}^p = -1,26$ В, ψ_{ep}^p карбонату кальцію – кальциту $CaCO_3$ у власному середовищі з $pH = 7$ складає $+0,2$ В [14]. Для магнетиту абсолютний $\psi_{epFe_3O_4}^0$ і рівноважний $\psi_{epFe_3O_4}^0$ електроповерхневі потенціали визначимо розрахунком [14]:

$$\psi_{enFe_3O_4}^0 = -\frac{3\psi_{enFe}^0 + 4\psi_{enO}^0}{3+4} = -\frac{3 \times (-1,77) + 4 \times 1,44}{7} = -0,064 \text{ В} , \quad (1)$$

$$\psi_{enFe_3O_4}^{pH12} = \psi_{enFe_3O_4}^0 - 0,059 \text{ pH} = -0,064 - 0,059 \times 12 = -0,77 \text{ В} . \quad (2)$$

Отже, у середовищі цементного каменю не менше 68,5 % за масою зерен заповнювача (кварц, магнетит) мають негативний поверхневий заряд, не менше 14 % (карбонати) – позитивний поверхневий заряд.

Фракційний склад хвостів – залишки на ситах: 0,63 мм – 1 %; 0,35 мм – 14 %; 0,16 мм – 34 %; 0,08 мм – 25 %; прохід через сито 0,08 мм (пилувата фракція) – 26 %. На рис. 1 подано гістограму розподілу зерен за

фракціями, що відповідають інтервалам розмірів комірок суміжних сит набору, із якої видно, що визначальною є фракція 0,16–0,35 мм із середнім розміром 0,24 мм, а середньозважений розмір зерна дорівнює $0,04 \times 0,26 + 0,12 \times 0,25 + 0,24 \times 0,34 + 0,475 \times 0,14 + 0,94 \times 0,01 = 0,2$ мм.

Істинна щільність – $\rho_n = 2800 \text{ кг/м}^3$, насипна щільність – $\rho_n^H = 1700 \text{ кг/м}^3$, отже, пустотність – $\text{Пус}^H = (2800 - 1700) / 2800 = 0,41$. Питома поверхня – $\gamma = 2700 \text{ см}^2/\text{г}$.

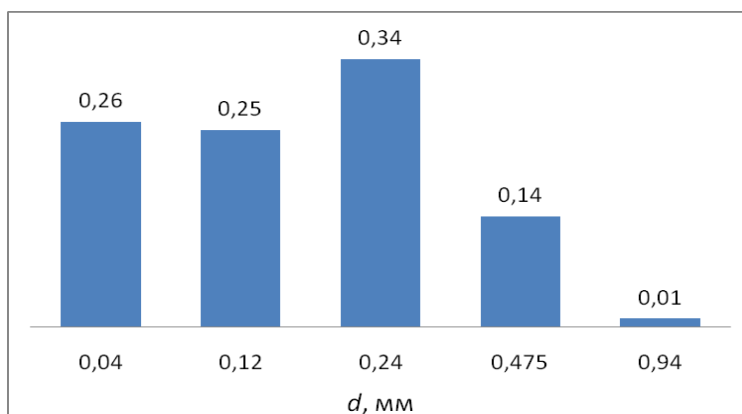


Рис. 1. Гістограма розподілу розмірів зерен хвостів Полтавського ГЗК: d – середній розмір фракцій

Отже, відходи ГЗК мають дисперсність природних дуже дрібних пилуватих пісків, полімінеральний склад із зернами неправильної кутастої форми, з яких не менше 68,5 % за масою мають негативний поверхневий заряд, не менше 14 % – позитивний, більш розвинену порівняно з природними пісками поверхню.

Для виготовлення зразків дрібнозернистого бетону застосовано шлакопортландцемент ПЦ Ш/А-400. Для виготовлення контрольних зразків для

порівняння замість хвостів ГЗК застосовували пісок природний кварцовий Безлюдівського родовища з модулем крупності 1,1.

Як мінеральну добавку використовували мікрокремнезем із вмістом SiO_2 93–95 %, питоною поверхнею $8500 \text{ см}^2/\text{г}$.

Фізико-механічні властивості дрібнозернистого бетону визначали на зразках-балочках $160 \times 40 \times 40$ мм з відношенням дрібний заповнювач: цемент = 3:1, В/Ц = 0,5. Зразки виготовляли з рівнорухомих сумішей

з осадкою конуса 1 см. Без добавок зазначена рухомість досягнута на природному піску за В/Ц = 0,5, на хвостах ГЗК – за В/Ц = 0,95. Для забезпечення рухомості 1 см суміші на хвостах ГЗК за В/Ц = 0,5 застосовано такі добавки-суперпластифікатори: полікарбоксилати Sica ViscoCrete 2508, Sika ViscoCrete 20NE, Релаксол-Супер ПК, сульфонафталінформальдегід С-3. Зразки ущільнювали пошаровим пресуванням товщиною шарів 5 мм тиском 12 МПа, піддавали природному твердінню і випробували стандартними методами у віці 3, 7 і 28 діб із визначенням границі міцності на розтяг при згині f_{ct} і міцності на стиск f_c .

Теоретичне обґрунтування отримання дрібнозернистого бетону із

хвостів ГЗК. У роботі [14] для важкого бетону найвищих показники міцності, водонепроникності та мінімальних деформативності досягають шляхом формування щільних пакувань прошарків зерен дрібного заповнювача – між зернами крупного заповнювача, цементу – між зернами дрібного заповнювача, продуктів гідратації цементу – між частинками цементу (клінкерними реліктами). Інструментарієм для цього запропоновано визначення і забезпечення оптимальних значень коефіцієнтів розсунення зерен заповнювачів. Для дрібнозернистого бетону із хвостів ГЗК оптимальний коефіцієнт розсунення заповнювача μ_{opt} і його витрати на 1 м³ бетону дорівнюватимуть

$$\mu_{opt} = 2,1 \times (1 + d_u/d_3)^3 - 1,1 = 2,1 \times (1 + 0,03/0,24)^3 - 1,1 = 1,89, \quad (3)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{\mu_{opt} \rho_{пс}}{\rho_3} + \frac{1}{\rho_3}} = \frac{1}{\frac{1,89 \times 0,41}{1700} + \frac{1}{2800}} = 1230 \text{ кг}, \quad (4)$$

де d_u і d_3 – середній розмір визначальних фракцій цементу і заповнювача відповідно 0,03 і 0,24 мм.

Якщо враховувати, що пилювата фракція заповнювача в кількості 24 % відповідає за розмірами частинкам цементу і разом з

ними бере участь у формуванні прошарків між зернами визначальної фракції заповнювача, загальні витрати заповнювача мають складати $Z = 1230/0,76 = 1618 \text{ кг/м}^3$.

Якщо прийняти В/Ц = 0,5, витрати цементу Ц та води В складатимуть

$$Ц = \frac{1 - \frac{Z}{\rho_3}}{\frac{1}{\rho_u} + \frac{В/Ц}{\rho_b}} = \frac{1 - \frac{1618}{2800}}{\frac{1}{3100} + \frac{0,5}{1000}} = 513 \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

$$В = Ц \times В/Ц = 513 \times 0,5 = 257 \text{ кг/м}^3. \quad (6)$$

Принцип абсолютних об'ємів забезпечено так:

$$Z/\rho_3 + Ц/\rho_u + В/\rho_b = 1618/2800 + 513/3100 + 257/1000 = 1 \text{ м}^3. \quad (7)$$

Оптимальний склад бетону в масовому співвідношенні дорівнюватиме

$$3 : \text{Ц} : \text{В} = 1618/513 : 1 : 0,5 = 3,15 : 1 : 0,5. \quad (8)$$

Бетон під навантаженням руйнується від розтягувальних напружень, які виникають від поперечної деформації в стиснутих виробках і зонах конструкцій, що згинаються, розтягнутих зонах конструкцій, що згинаються, розтягнутих елементах [14]. Від розтягувальних напружень бетон руйнується також через поперемінне заморожування – танення, сольову корозію. Багато дослідників висували і доводили припущення, що дрібнозернисті бетони за порівняною міцністю на стиск характеризуються більшою міцністю на розтяг, ніж бетони з крупним заповнювачем [11]. Висували і доводили також припущення, що міцність бетону більшою мірою визначена прошарками цементного каменю в місцях максимального наближення зерен заповнювачів одне до одного, оскільки цементний камінь і структура продуктів гідратації в міжзернових порожнинах між ними менш щільні [11, 14].

Виходячи з другого припущення міцність дрібнозернистого бетону, P_a , на розтяг f_{ct} можна подати за аналогією з рівнянням міцності дисперсних систем Ребіндера–Щукіна [14] як

$$f_{ct} = nF_t, \quad (9)$$

де n – кількість одиничних контактів в одиниці площі поперечного перерізу розтягнутого виробу або зони, $1/\text{м}^2$;

F_t – сила, необхідна на розрив одиничного контакту між зернами дрібного заповнювача, Н (рис. 2, *a*),

$$F_t = f_{cpt}S, \quad (10)$$

де f_{cpt} – міцність на розтяг цементного каменю в контактних зонах між зернами дрібного заповнювача, P_a ;

S – площа контактної зони в одиничному контакті.

Враховуючи кутасту форму зерен хвостів ГЗК, припустимо, що між ними переважають контакти між кутом і плоскою ділянкою поверхні (рис. 2, *б*). У цьому випадку S мало залежить від розміру зерен.

Підставляючи вираз (10) у вираз (9) отримаємо, P_a ,

$$f_{ct} = f_{cpt}nS. \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що підвищення f_{ct} можна досягнути за рахунок збільшення величини будь-якого з трьох множників, а саме міцності цементного каменю f_{cpt} (зниженням В/Ц тощо), кількості одиничних контактів в одиниці площі поперечного перерізу n , а також площі одиничного контакту S . Отже, у випадку однакового цементного каменю, тобто однакового f_{cpt} , дрібнозернистий бетон із меншими зернами заповнювача забезпечить більшу кількість контактів $n_2 > n_1$ (рис. 2, *в*, *г*) і відповідно більшу міцність $f_{ct2} > f_{ct1}$ (рис. 2, *д*, *е*).

Як було зазначено, S мало залежить від розміру зерен заповнювача кутастої форми. Проте в контактах, схема яких наведена на рис. 2, *б*, їхня площа S буде збільшуватись у разі вбудовування в них дрібних частинок пилюватих фракцій і/або частинок штучно уведених мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів (рис. 3, *a*). Структуру дрібнозернистого бетону як щільну упаковку зерен заповнювача у вигляді куль із плівками продуктів гідратації на їхній поверхні з оптимальним вмістом його пилюватих фракцій, мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів (рис. 3, *б*) О. Г. Вандаловський умовно назвав ідеальною, а сам бетон – особливо дрібнозернистим ОДБ [11].

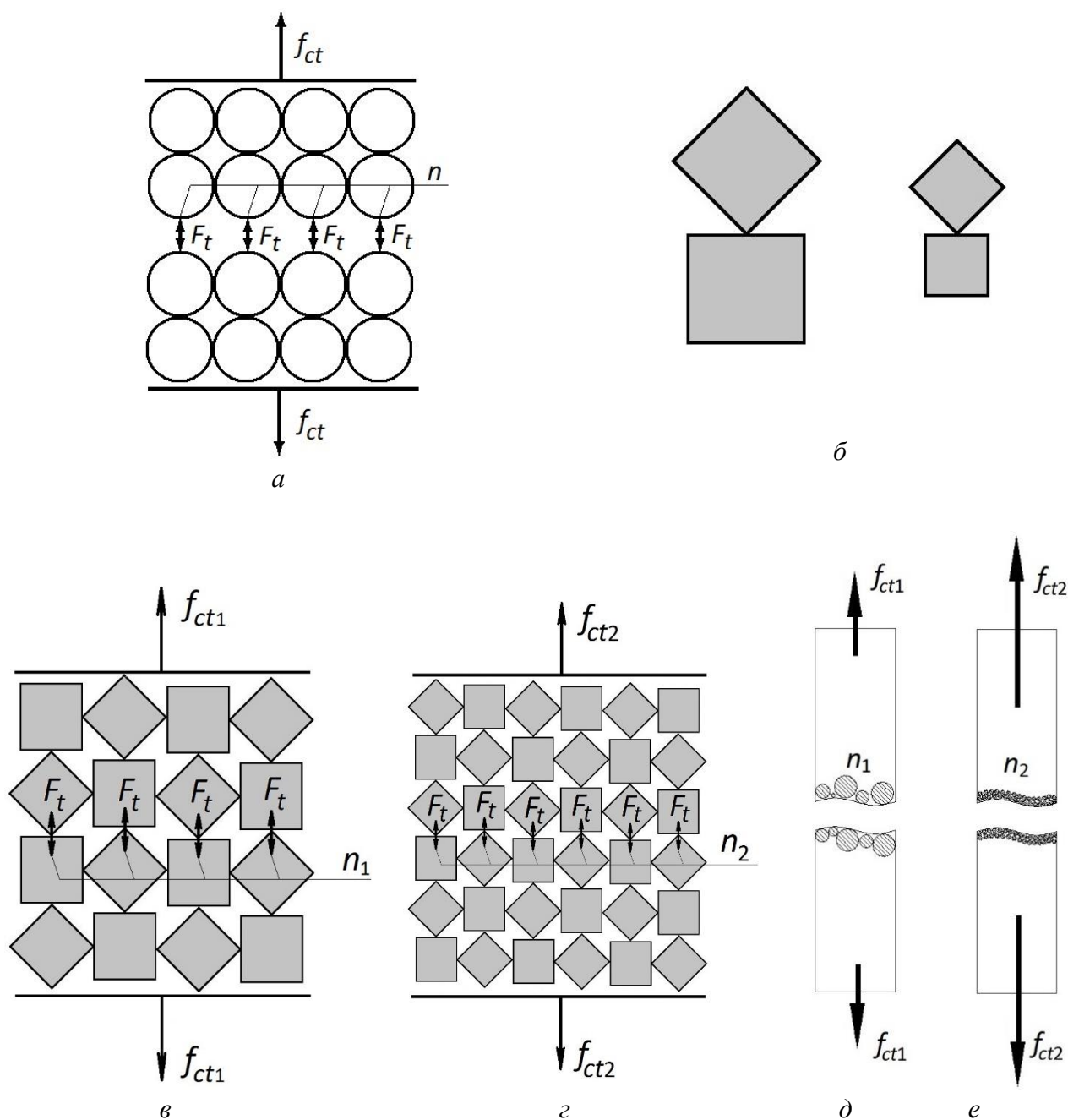


Рис. 2. Схеми контактів:

a – між частинками дисперсної фази в дисперсній системі; *б* – між окремими частинками кутастої форми різного розміру; *в, з* – між зернами заповнювача кутастої форми в структурі дрібнозернистого бетону з більшими (*в*) і меншими (*з*) зернами; *д, е* – між поверхнями розриву дрібнозернистого бетону з більшими (*д*) і меншими (*е*) зернами

Розрахуємо оптимальне співвідношення розмірів фракцій, які забезпечать ідеальну структуру ОДБ із хвостів

Полтавського ГЗК, користуючись схемою рис. 3, б.

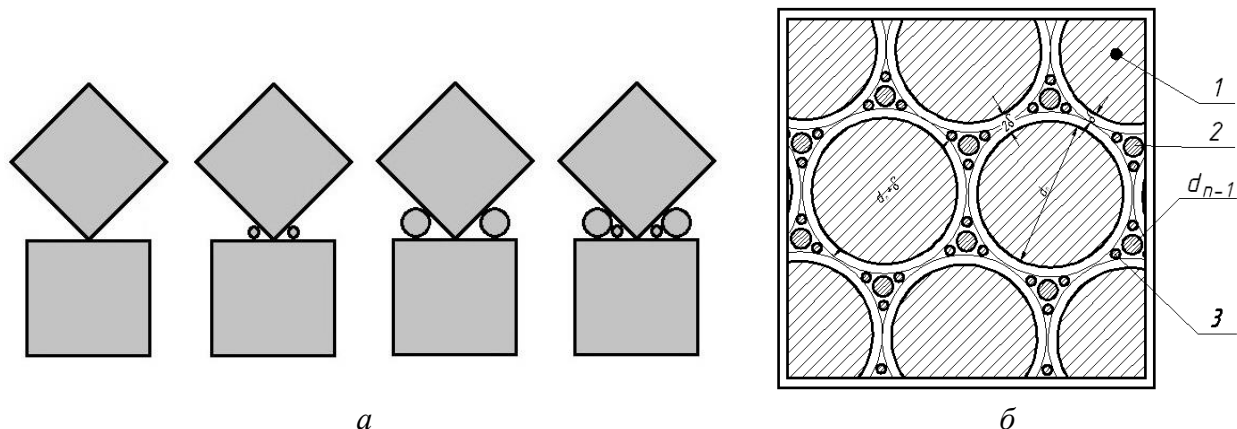


Рис. 3. Структура особливо дрібнозернистого бетону:

a – схема збільшення площі контакту між зернами кутастої форми за допомогою пилюватих фракцій, мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів; *б* – схема ідеальної структури ОДБ; 1 – зерна заповнювача; 2 – частинки цементу (клинкерних реліктів), пилюватих фракцій заповнювача, мінерального наповнювача; 3 – частинки мінерального мікронаповнювача

За Й. М. Ахвердовим [17], у міжзернових порожнинах упаковки сферичних зерен діаметром d_n , показаної на рис. 3, *б*, містяться частинки діаметром

$$d_{n-1} = 0,156d_n. \quad (12)$$

З урахуванням плівок продуктів гідратації на зернах заповнювача товщиною δ (12) набуде вигляду

$$d_{n-1} + \delta = 0,156(d_n + \delta). \quad (13)$$

Із виразу (13) отримаємо вираз для визначення потрібного розміру частинок пилюватих фракцій заповнювача і/або частинок мінерального наповнювача, мм,

$$d_{n-1} = 0,156d_n + 0,844\delta. \quad (14)$$

Товщина плівки продуктів гідратації δ , за роботою [17], залежить від розміру зерен заповнювача: за $d = 1$ мм $\delta = 47$ мкм = $0,0047$ мм, $d = 0,1$ мм – $\delta = 4,7$ мкм, $d = 0,01$ мм – $\delta = 0,47$ мкм. Ця залежність із коефіцієнтом кореляції 1 апроксимується лінійним рівнянням, мм,

$$\delta = 0,047d. \quad (15)$$

Підставляючи вираз (15) у вираз (14), отримаємо, мм,

$$d_{n-1} = 0,156d_n + 0,844 \times 0,047d_n = 0,2d_n. \quad (16)$$

Аналогічний вигляд матиме вираз для визначення потрібного розміру частинок мікронаповнювача:

$$d_{n-2} = 0,2d_{n-1}. \quad (17)$$

Отже, для середньозваженого розміру зерен хвостів ГЗК $d_n = 0,2$ мм потрібні для формування ідеальної структури ОДБ розміри частинок пилюватих фракцій і/або наповнювача і мікронаповнювача, за формулами (16) і (17) відповідно, складуть, мкм,

$$d_{n-1} = 0,196 \times 0,2 = 0,04 \text{ мм} = 40,$$

$$d_{n-2} = 0,196 \times 0,04 = 0,008 \text{ мм} = 8.$$

Із розрахунків видно, що для утворення максимальної площі контактів у структурі ОДБ розмір кожної меншої фракції має бути у п'ять разів менший за розмір попередньої більшої фракції.

Експериментальні дослідження з розроблення дрібнозернистого бетону із

хвостів ГЗК для будівельних виробів. Виконано експериментальні дослідження зі створення виробів із дрібнозернистого бетону із хвостів ГЗК із покращеними фізико-механічними властивостями. За однакових В/Ц = 0,5 міцність на розтяг ОДБ на хвостах ГЗК виявилася в 1,5 раза вищою за міцність на розтяг дрібнозернистого бетону на природному піску.

Досліджено залежність міцності ОДБ на хвостах ГЗК з В/Ц = 0,5 від вмісту добавок-суперпластифікаторів: полікарбоксилатів Sika ViscoCrete 2508, Sika ViscoCrete 20HE, Релаксол-Супер ПК,

сульфонафталінформальдегіду С-3. Результати дослідження наведено на рис. 4, з якого видно, що з підвищенням вмісту добавок міцність ОДБ збільшується. Усі залежності мають перелами, після яких подальше зростання міцності стає несуттєвим. Це можна спостерігати за вмістом добавки: Sika ViscoCrete 2508 – 2 %, Sika ViscoCrete 20HE – 1,5 %, Релаксол-Супер ПК – 2 %, С-3 – 1 %. Максимальна міцність ОДБ може бути досягнена за застосування добавки 1,5 % SikaViscoCrete 20HE – 35 МПа і 1 % С-3 – 33,5 МПа.

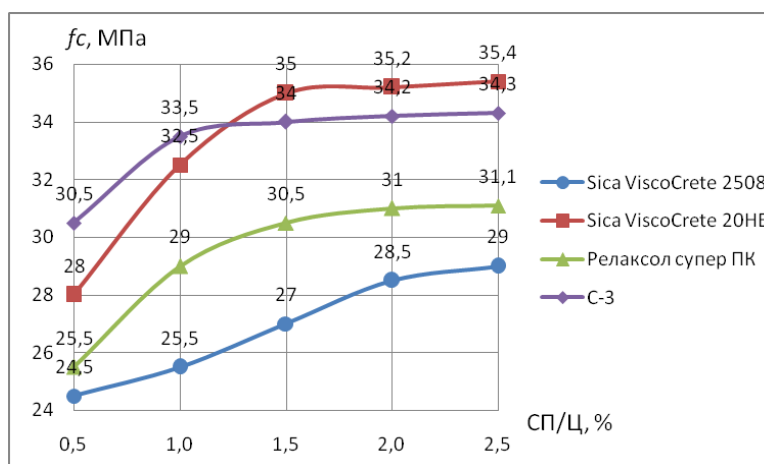


Рис. 4. Залежність міцності на стиск f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від вмісту добавок-суперпластифікаторів СП/Ц

Досліджено залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від його складу – масового відношення витрат заповнювача та цементу 3:Ц. Результати дослідження наведено на рис. 5, із якого видно, що зі збільшенням вмісту заповнювача від 3:Ц = 1:1 до 3:1 міцність на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c майже не змінюється, після чого з подальшим збільшенням 3:Ц міцність f_c і f_{ct} різко знижується, проте відношення f_{ct}/f_c зростає. Це відповідає отриманому

теоретичним розрахунком оптимальному складу бетону 3:Ц = 3,15:1 і підтверджує застосовність методики розрахунку [14] для ОДБ на хвостах ГЗК.

Із рис. 5 видно також, що за однакових 3:Ц = 3:1 і В/Ц = 0,5 міцність ОДБ на хвостах ГЗК виявилася вищою за міцність дрібнозернистого бетону на природному піску: на стиск f_c – у $27/13,1 = 2$ рази, на розтяг f_{ct} – у $9,7/5,1 = 1,9$ рази. Відношення f_{ct}/f_c у ОДБ на хвостах ГЗК виявилось нижчим і склало 0,92 такого для дрібнозернистого бетону на природному піску.

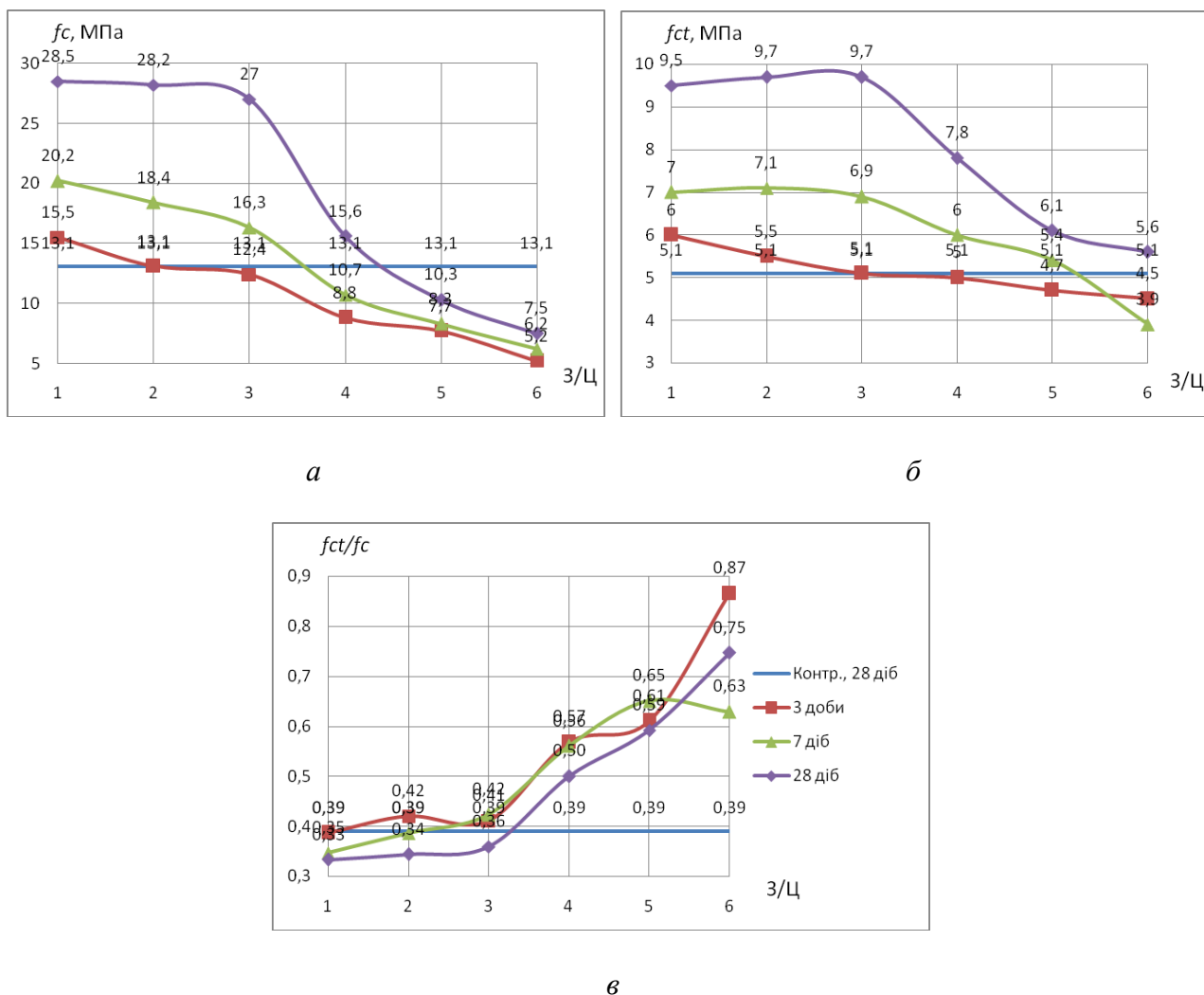


Рис. 5. Залежність міцності на стиск f_c (а) і розтяг f_{ct} (б) і відношення f_{ct}/f_c (в) ОДБ із хвостів Полтавського ГЗК у віці 3, 7 і 28 діб і дрібнозернистого бетону на природному піску (контрольних зразків) у віці 28 діб від відносного вмісту заповнювача З/Ц

Досліджено залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від масового відношення вмісту мікрокремнезему до вмісту цементу МК:Ц. Результати дослідження наведено на рис. 6, із якого видно, що зі збільшенням вмісту кремнезему до 15 % міцність збільшується: стиск – на 44 % від 27 до 39 МПа, розтяг – на 20 % від 9,7 до 11,6 МПа. Подальше збільшення вмісту мікрокремнезему зростання міцності майже не забезпечує.

Відношення f_{ct}/f_c зі збільшенням вмісту мікрокремнезему знижується.

Досліджено залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} і співвідношення між ними f_{ct}/f_c ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від тиску пресування Р. Результати дослідження наведено на рис. 7, із якого видно, що зі збільшення тиску з 2 до 12 МПа як міцність на стиск f_c і розтяг f_{ct} , так і співвідношення між ними f_{ct}/f_c збільшуються. Подальше підвищення тиску пресування майже не підвищує ці показники.

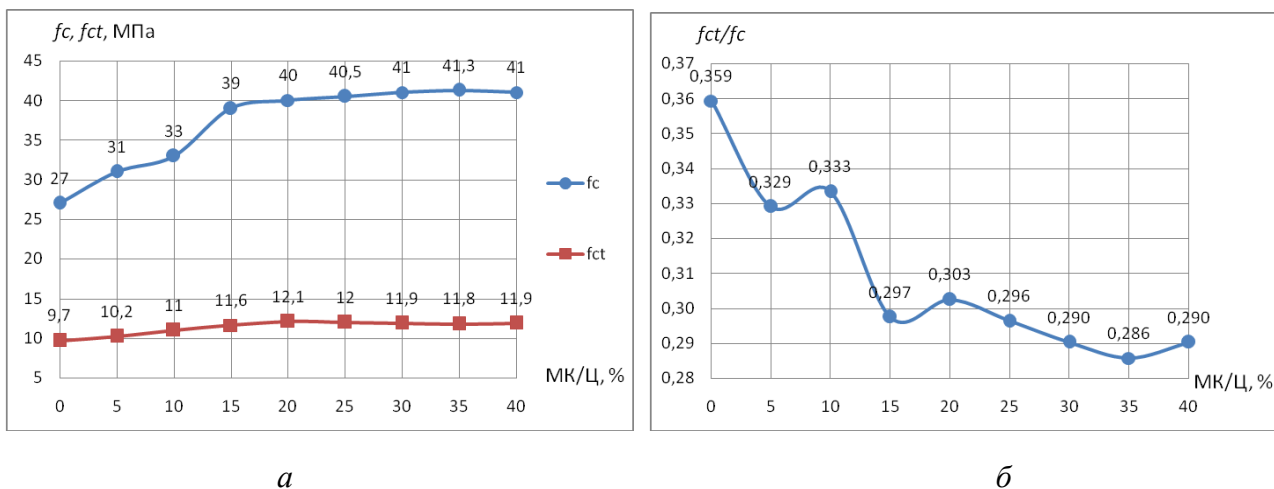


Рис. 6. Залежність міцності на стиск f_c і розтяг f_{ct} (а) і відношення f_{ct}/f_c (б) ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК від вмісту мікрокремнезему МК/Ц у віці 28 діб

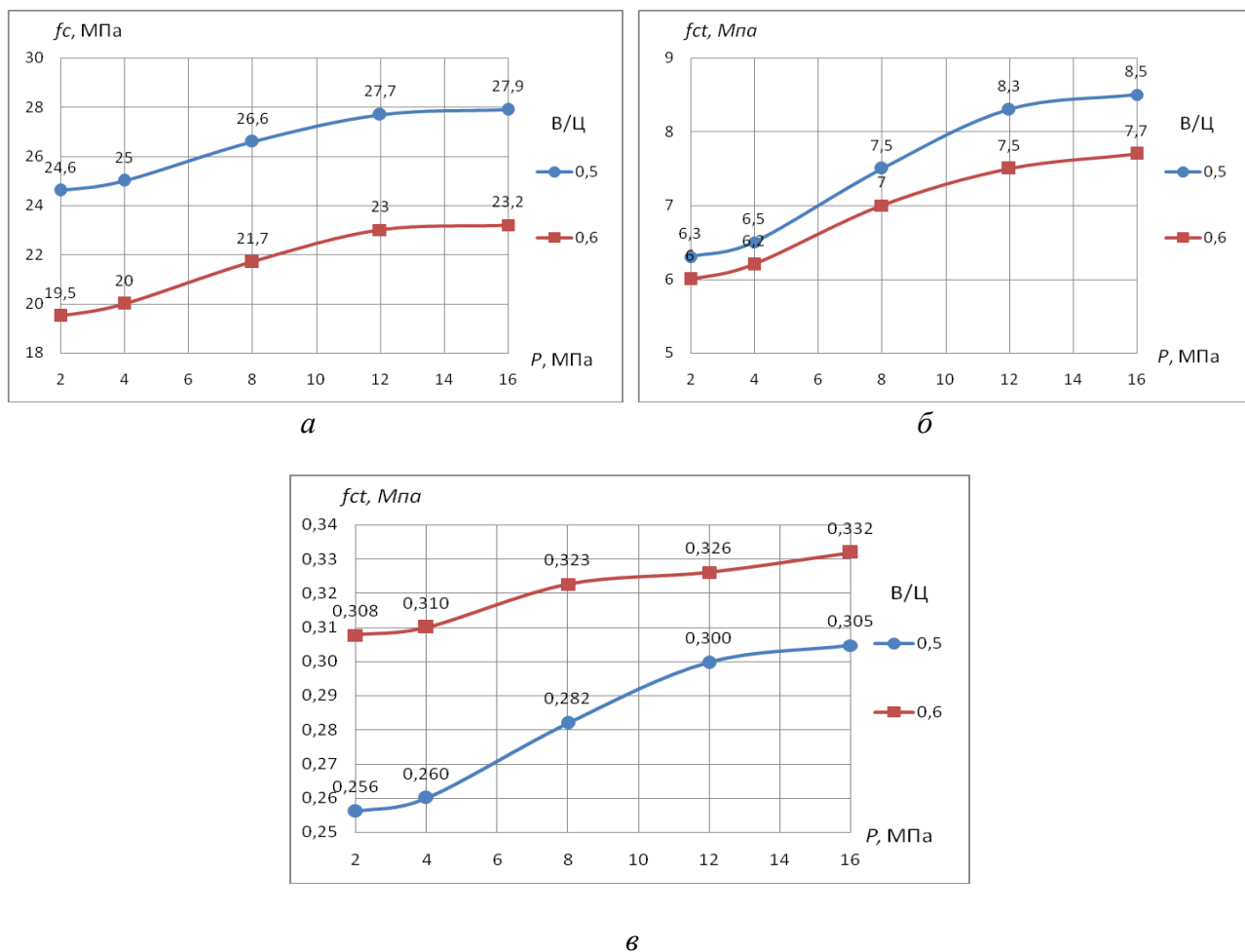


Рис. 7. Залежність міцності на стиск f_c (а) і розтяг f_{ct} (б) і відношення f_{ct}/f_c (в) ОДБ на хвостах Полтавського ГЗК у віці 28 діб від тиску пресування P

Висновки та рекомендації

Виконано теоретичне обґрунтування отримання особливо дрібнозернистого бетону (ОДБ) із хвостів Полтавського ГЗК як дрібнозернистого заповнювача. Обґрунтовано його структуру з урахуванням контактів між зернами заповнювача кутастої форми, доведено можливість підвищення міцності уведенням мінеральних наповнювачів і мікронаповнювачів із частинками розміром, меншим у п'ять разів, ніж зерна заповнювача та частинки цементу відповідно. Обґрунтовано визначення складу ОДБ із хвостів Полтавського ГЗК шляхом визначення і забезпечення оптимальної величини коефіцієнта розсунення зерен заповнювача цементним тістом $\mu_{opt} = 1,89$ з включенням до нього пилюватих фракцій заповнювача.

Визначено та експериментально підтверджено оптимальний склад ОДБ заповнювач: цемент : вода = (3–3,15):1:0,5 з обов'язковим застосуванням добавки супер-

пластифікатора для забезпечення В/Ц = 0,5. Експериментально встановлено, що максимальної міцності ОДБ можна досягти за застосування суперпластифікаторів: полікарбоксилату 1,5 % або сульфонафтальніформальдегіду 1 % від маси цементу.

Встановлено, що за однакових З:Ц = 3:1 і В/Ц = 0,5 міцність ОДБ на хвостах ГЗК перевищує міцність дрібнозернистого бетону на природному особливо дрібнозернистому піску: на стиск – у 2 рази, на розтяг – 1,9 рази і досягає у віці 28 діб 35 МПа. Уведення мікрокремнезему в кількості до 15 % маси цементу дає змогу ще підвищити міцність на стиск на 44 %, на розтяг – 20 %. Зазначено, що зі збільшенням міцності ОДБ будь-якими заходами співвідношення між міцністю на розтяг і стиск f_{ct}/f_c знижується.

Вироби з ОДБ запропоновано формувати пошаровим пресуванням товщиною шару 5 мм. Експериментально встановлено, що максимальної міцності можна досягти за тиску пресування 12 МПа.

Список використаних джерел

1. Peter Betz, Verena Curoşu, Stefan Loehnert, Steffen Marx, Manfred Curbach. Classification of Multiaxial Behaviour of Fine-Grained Concrete for the Calibration of a Microplane Plasticity Model. *Buildings*. 13(11). (2023). 2704. DOI: 10.3390/buildings13112704.
2. Alein Js, Bhuvaneshwari Muthusubramanian. Influence of Basalt Fiber and Slag on the Moduli of Elasticity of Fine-Grained Concrete. In book: Sustainable Innovations in Construction Management (2023). DOI: 10.1007/978-981-99-6233-4_43.
3. Vorokhaiev Anatolii, Barabash Ivan, Ksionshkevich Lyubov, Zeljko Kos, Grynyova I. I. Fine-grained Fiber Concrete on Mechanoactivated Portlandcement. *Croatian Regional Development Journal*. 2(1). (2021). 41-49. DOI: 10.2478/crdj-2021-0007.
4. Федоров И. С., Добровинская О. Х. Свойства и расчетные характеристики рекультивируемых хвостов обогатительных фабрик. Москва: Недра, 1970. 152 с.
5. Shishkina Aleksandra, Piskun Illia. Formation of the strength of fine-grained concrete based on modified slag Portland cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5 (6(125)). (2023.) 74-81. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289929.
6. Shishkina Alexandra, Domnichev Andriy. Ensuring uniformity of strength of fine-grained concrete based on modified composite cement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1(6 (127)). (2024). 47-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.296898.
7. Nguyen S., Thia Q., Ho L. Properties of fine-grained concrete containing fly ash and bottom ash. *Magazine of Civil Engineering*. 107(7) (2021). 10711. DOI: 10.34910/MCE.107.11.
8. Ravi Sagar Poudel. Fine-Grained Concrete on Modified Binder. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo*. 3. (2022). 31-36. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.31-36.

9. Matýsková Kateřina, Bílek Vlastimil, Procházka Lukáš, Hédlová Radka, Hornáková Marie. Replacement of Fine Aggregates in Fine-Grained Concrete by Waste Material from Cetrus Boards Production. *Defect and Diffusion Forum*. 432:31-38. (2024). DOI: 10.4028/p-sMCI67.

10. Nurbayeva M., Aruova L., Kalym S., Toleubayeva Sh., Urkinbayeva Zh., Aukazhieva Zh., Ospanova Zh., Budikova A., Zhakanov A. Influence of Fiber on the Strength Characteristics of Fine-Grained Concrete. In book: *Proceedings of 2021 4th International Conference on Civil Engineering and Architecture*. (2022). DOI: 10.1007/978-981-16-6932-3_13.

11. Вандаловський А. Г., Казімагомедов І. Е., Чайка В. М. Оптимізація структури мікробетону. *Науковий вісник будівництва*. 65. (2011). 153–160.

12. Бабушкин В. И., Плугин А. А., Костюк Т. А. Особенности подбора состава формовочной смеси для цементно-песчаных стеновых материалов заданной плотности. *Науковий вісник будівництва*. 4. (1998). 61-63.

13. Бабушкин В. И., Плугин А. А., Костюк Т. А., Матвиенко В. А. Влияние активных поверхностных центров на прочность свежесформованных мелкозернистых бетонов. *Науковий вісник будівництва*. 5. (1999). 85-88.

14. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; под ред. А. Н. Плугина. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с.

15. Вандаловський А. Г., Чайка В. М. Особливості технології бетонів на дрібнозернистих відходах. *Науковий вісник будівництва*. 63. (2011). 215–219.

16. Вандаловський О. Г., Казімагомедов І. Е., Чайка В. М. Міцнісні властивості бетону на відходах гірничозбагачувальних комбінатів як заповнювача. *Науковий вісник будівництва*. 64. (2011). 98–101.

17. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. Москва: Стройиздат, 1981. 463 с.

Плу́гин Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Чайка Віталій Миколайович, інженер-конструктор, ТОВ «АрХаус». ORCID iD: 0009-0006-9949-4371. Тел.: +38 (097) 527-79-42. E-mail: chayki.vn@gmail.com.

Мусієнко Сергій Миколайович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Тел.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb_86@ukr.net.

Наджафов Ельшад Фаїд огли, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6143-8183. E-mail: najafov@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Chaika V.M., design engineer TOB «АрХаус». ORCID iD: 0009-0006-9949-4371. Tel.: +38 (097) 527-79-42. E-mail: chayki.vn@gmail.com.

Musienko S.M., postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-5418-6886. Tel.: +38 (095) 060-70-06. E-mail: serb_86@ukr.net.

Najafov El'shad Faih Ohly, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>. E-mail: najafov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 14.06.2024 р.

ГЕОДЕЗИЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 378:528

ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНІ ВИШУКУВАННЯ. ГЕОМЕТРИЧНЕ НІВЕЛЮВАННЯ ТРАСИ

Д-р техн. наук Є. Б. Угненко, д-р екон. наук Г. І. Шарій,
кандидати техн. наук О. М. Ужвієва, Є. М. Коростельов, асист. Н. І. Сорочук,
кандидати техн. наук А. О. Шевченко, А. О. Белікова

ENGINEERING-GEODETIC SURVEYING. GEOMETRIC LEVELING OF THE ROUTE

Dr. Sc. (Tech.) Ye. Ugnenko, Dr. Sc. (Econ.) G. Shariy,
PhD (Tech.) O. Uzhviieva, PhD (Tech.) Ye. Korostelov, Assistant N. Sorochuk,
PhD (Tech.) A. Shevchenko, PhD (Tech.) N. Bielikova

Анотація. У роботі визначено основний принцип і способи нівелювання, взяття нівеліром відліків на рейках, прив'язка траси дороги до реперів, нівелювання сполучних і проміжних точок, зрівнювання перевищень і обчислення сполучних і проміжних точок, контроль нівелювання траси, нанесення на поздовжній профіль проекційної лінії. Інженерно-геодезичні вишукування, а саме геометричне нівелювання траси, є важливою складовою навчальної геодезичної практики. Геодезична практика здобувачів вищої освіти проводиться відповідно до навчального плану і є продовженням навчального процесу в польових умовах. Вона завершує теоретичний курс і проводиться згідно з навчальним планом.

Ключові слова: інженерно-геодезичні вишукування, геометричне нівелювання траси, план траси, поздовжній профіль, поперечний профіль.

Abstract. The purpose of leveling the route is to determine the elevations of all the control points, including the beginning, middle, and end of curves, plus points, and points on transverse profiles. Longitudinal and transverse leveling is carried out after the route has been set out. The results of leveling (elevation measurements) are subsequently used for constructing the longitudinal profile of the route and the transverse profiles.

The paper outlines the main principles and methods of leveling, taking leveling readings on rods, referencing the road route to benchmarks, leveling junction and intermediate points, balancing elevation differences, and calculating junction and intermediate points. The paper also describes the control of route leveling and plotting the projected line on the longitudinal profile.

Engineering-geodetic surveying, specifically geometric leveling of the route, is an important component of educational geodetic practice. Geodetic practice for students is conducted according to the academic curriculum and serves as a continuation of the learning process in the field. It completes the theoretical course and is conducted according to the academic plan. During practical training, students acquire skills in working with geodetic instruments and processing the results of field measurements, becoming familiar with the main types of engineering-geodetic work during surveys and construction of engineering structures. Students are required to participate in all types of work, conduct the necessary measurements, and process them in the office.

Practical training in geodetic practices provides students with hands-on experience in applying theoretical knowledge to real-world scenarios. Through fieldwork, students gain proficiency in using a variety of geodetic instruments such as levels, total stations, and GPS receivers. They learn how to set up and operate these instruments accurately to collect precise measurements of elevation and distance. Furthermore, students learn the importance of teamwork and collaboration during field surveys. Working together with peers, they divide tasks, communicate effectively, and problem-solve on-site challenges that may arise. These collaborative experiences not only enhance their technical skills but also cultivate essential soft skills such as leadership, communication, and adaptability.

Keywords: *engineering-geodetic surveying, geometric leveling of the route, route plan, longitudinal profile, transverse profile.*

Вступ. Інженерно-геодезичні роботи є складовою комплексу вишукувальних робіт при проектуванні та будівництві шляхів сполучення.

Навчальна геодезична практика базується на основних принципах закріплення та поглиблення теоретичних знань під час вивчення курсу топографії, геодезії та інженерної геодезії.

Завдання навчальної геодезичної практики:

– засвоїти способи всіх необхідних польових перевірок геодезичних інструментів, використовуваних у процесі практики;

– набути навичок правильного користування вимірювальними приладами і геодезичними інструментами, грамотного використання їх при вимірюваннях;

– навчитися самостійно виконувати всі польові геодезичні роботи, передбачені програмою практики, вести необхідні записи у відповідних польових журналах;

– вивчити процес вирішення на місцевості різних інженерно- геодезичних задач, включаючи розбивку траси автомобільної дороги;

– навчитися виконувати розрахунково-графічні роботи в заданій послідовності та з необхідною точністю.

Внаслідок проходження практики здобувач повинен:

– знати будову геодезичних інструментів, способи їхньої перевірки, зміст і послідовність виконання різних інженерно-геодезичних завдань;

– вміти самостійно перевіряти, налаштовувати геодезичні інструменти, правильно використовувати їх на місцевості при виконанні кутових і лінійних вимірювань, виконувати обробку результатів таких вимірювань;

– набути навичок вимірювань на місцевості та розбивочних робіт за допомогою геодезичних інструментів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій базується на основних положеннях топографічного знімання, побудові планового та висотного знімального обґрунтування, тахеометричного знімання [2].

Детально проаналізовано інженерно-геодезичні роботи при вишукуванні шляхів сполучення [3] та інженерно-розбивочних роботах [4, 5].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою нівелювання траси є визначення позначок усіх пікетних точок, початку, середини і кінця кривих, плюсових точок і точок поперечних профілів. Поздовжнє та поперечне нівелювання здійснюють після розбивки пікетажу. Результати нівелювання (позначки точок) у подальшому використовують для побудови поздовжнього профілю траси та поперечних профілів.

Обсяг роботи визначено довжиною траси і складністю рельєфу. Кожен здобувач повинен пронівелювати частину траси. Розподіл працівників на станції:

– один спостерігач, працює з нівеліром, бере відліки на рейках;

— два реєчники;

— два працівники, які по черзі олівцем роблять записи в журналі нівелювання;

– один дублер спостерігача за інструментом із метою контролю;

– один (за наявності в бригаді) відповідальний за перенесення та збереження майна і різних інструментів бригади. Через дві-три станції здобувачі повинні змінювати вид робіт.

Перед виконанням робіт обов’язково перевіряють нівеліри і рейки на справність, чіткість шкали та однаковість п’яткового числа [1].

Основна частина дослідження.

Принципи і способи нівелювання.

Геометричне нівелювання — це нівелювання горизонтальним променем візування [4]. Трасу нівелюють способом із середини, тобто нівелір встановлюють на всіх станціях приблизно посередині між сусідніми сполучними точками. Трасу нівелюють двічі: у прямому напрямку за всіма точками траси і поперечниками і зворотному (контрольному) — тільки за сполучними точками. Як сполучні бажано обирати суміжні пікети з плечем нівелювання 50 м. Починати нівелювання необхідно з прив’язки точки початку траси до репера.

Взяття нівеліром відліків на рейках.

Перед взяттям відліків нівелір

налаштовують на робоче положення — стійко встановлюють на станції штатив так, щоб верхня площина головки штатива була горизонтальна, а всі гвинти — закріплені.

Після цього горизонтують сам нівелір. Для цього трубу встановлюють по лінії двох будь-яких підйомних гвинтів підставки та обертають їх у різні боки, поки бульбашка рівня стане по лінії нуль-пункт рівня — третій підйомний гвинт. Потім обертають третій гвинт, спрямовуючи бульбашку до нуль-пункту. Гвинтами працюють, поки бульбашка круглого рівня не опиниться в нуль-пункті [5].

Після приведення за допомогою круглого рівня візирного променя нівеліра типу Н-3 в попереднє горизонтальне положення трубу наводять на рейку, фокусують зображення і в полі зору труби нівеліра шукають прямокутну рамку, поділену навпіл вертикальною лінією. Ліворуч і праворуч цієї лінії розташовано зображення двох половинок бульбашки циліндричного рівня.

Необхідно, працюючи елеваційним гвинтом нівеліра, пересунути їх до суміщення в єдину фігуру (ефект контакту (рис. 1, а)). У момент, коли візирний промінь буде знаходитися в горизонтальному положенні, необхідно брати відлік на рейці (рис. 1, б).

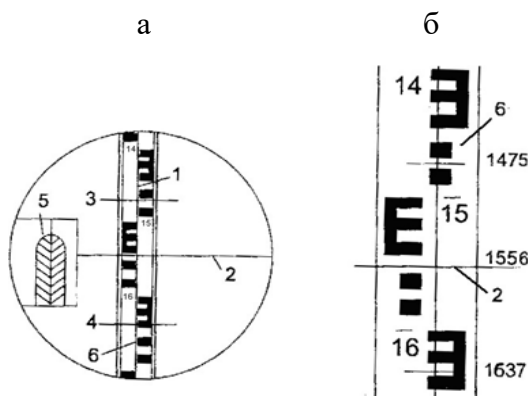


Рис. 1. Поле зору труби нівеліра Н-3:

1 – вертикальна нитка сітки зорової труби; 2 – горизонтальна середня нитка сітки, яка вказує відлік на рейці 1556; 3, 4 – короткі горизонтальні нитки; 5 – зображення двох половинок бульбашки циліндричного рівня в момент контакту; 6 – рейка з сантиметровими поділками

За роботи з нівеліром типу Н-3К (з компенсатором) достатньо відгоризонтувати його за допомогою круглого рівня і одразу брати відліки.

Контроль вимірювань на станції, мм:

$$b_{чв} - b_{ч} = M \pm 2, \quad (1)$$

де $b_{чв}$ – відлік на червоній стороні рейки (мм);

$b_{ч}$ – відлік на чорній стороні рейки (мм);

M – п'яткове число рейки (найменший відлік на червоній стороні рейки, мм);

± 2 – допустима різниця при вимірюванні.

За невиконання умови вимірювань повторити і виправити.

Прив'язка траси дороги до реперів.

Репер — це жорстка, зафіксована на місцевості точка з визначеною позначкою. Обидва реperi — початковий і кінцевий — задає керівник. Для контролю вимірювань зручно задавати однакові реperi для всіх бригад групи. Позначку початкового репера $HRp1$, як і всі інші, беруть до міліметрів (наприклад, $HRp1 = 100,000$ м). Прив'язку точки ПК0 на станції 1 (рис. 2) використовують для нагадування здобувачам основних правил нівелювання та запису його результатів [6].

Результати прив'язки надають у вигляді схеми (рис. 2) та окремого журналу нівелювання (табл. 1). Після цього записи повторюють у журналі геометричного нівелювання траси.

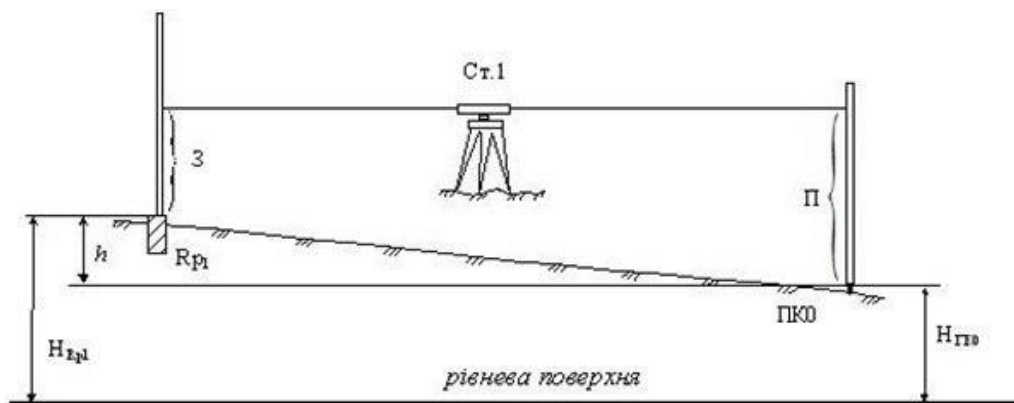


Рис. 2. Висотна прив'язка траси (геометричне нівелювання)

Таблиця 1

Журнал нівелювання

Станція	Точка спостереження	Відліки за рейкою		Перевищення, мм		Позначки точок Н
		задні (З)	передні (П)	підраховане h	середнє $h_{сер}$	
1	Rр1	1964		- 935	- 933	100,000
		6746		- 931		
	ПК0		2899			99,067
			7677			

Примітки: $H_{Rр1} = 100,000$ м;

$H_{ПК0} = H_{Rр1} + h_{сер} = 100,000 + (- 0,933) = 99,067$ м.

Нівелювання сполучних і проміжних точок. Після прив'язки траси до початкового репера розпочинають її нівелювання в прямому напрямку. Точки нівелювання (підмети і плюсові точки) зафіксовані на місцевості кілками, а в підметажному журналі — схемами [7].

Нівелір, встановлений посередині між сусідніми підметами (сполучними точками), горизонтують за круглим рівнем. Рейки встановлюють на обидва підмети, чорною

стороною до приладу. Якщо видимість рейок забезпечена, спочатку беруть відліки на задній рейці, по чорній та червоній сторонах (табл. 2, графа 3) із перевіркою п'яткового числа.

Потім, поки задній ресчик пересувається по точках свого поперечника, нівелюють передню сполучну точку (табл. 2, графа 4), так само і з контролем п'яткового числа.

Таблиця 2

Журнал геометричного нівелювання

Станції	Точки спостереження	Відліки по рейці			Перевищення						Горизонт приладу	Позначки точок	
		задній	передній	проміжний	підраховані		середні		виправлені				
					+	-	+	-	+	-			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	ПК0	1985			976		974						
		6767			972								
	ПК1		1009										
			5795										
2	ПК1	1438				537		535					
		6226				533							
	ПК2		1975										
			6759										
	+84			2534									
3	ПК2	0906				1410		1411					
		5590				1412							
	ПК3		2316										
			7002										

$$\Sigma = 22912. \quad 24856$$

$$\Sigma = -972$$

$$\frac{\Sigma 3 - \Sigma \Pi}{2} = \frac{22912 - 24856}{2} = -972 = h_{\text{ср}}.$$

Обчислення результатів вимірювань здійснюють у журналі геометричного нівелювання. За наявності репера і в кінці траси достатньо виконати нівелювання тільки в прямому напрямку з подальшим визначенням висотної нев'язки f_h .

Журнал геометричного нівелювання. Позначки сполучних точок підраховують через перевищення, позначки проміжних

точок — через горизонт приладу. Як приклад виконано обробку результатів нівелювання на станції 3, (табл. 2) і подано схему нівелювання (рис. 3).

У журналі нівелювання наведені задні відліки по рейці — чорні ($З_ч$) і червоні ($З_{чв}$), відліки передні — чорні ($\Pi_ч$) і червоні ($\Pi_{чв}$) відповідно в графах 3 і 4. Послідовність підрахунків така [8].

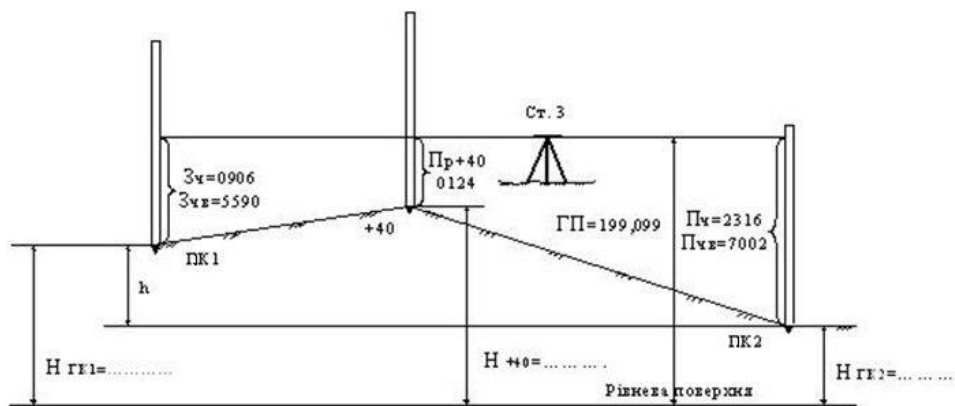


Рис. 3. Схема геометричного нівелювання на станції 3

1. Підраховують перевищення між сполучними точками на кожній станції. Для кожного перевищення знаходять два його значення — по чорному і червоному боках рейки:

$$h_{ч} = Z_{ч} - П_{ч}; \quad h_{чв} = Z_{чв} - П_{чв}. \quad (2)$$

Розходження між ними допускається не більше 4 мм. Підраховані перевищення разом із їхнім знаком записують у графу 6 табл. 2.

Приклад: на станції 3:

$$h_{ч} = 0906 - 2316 = -1410;$$

$$h_{чв} = 5590 - 7002 = -1412.$$

2. Підраховують середнє перевищення з двох визначених і зберігають їхній знак:

$$h_{сер} = \frac{h_{ч} + h_{чв}}{2}; \quad (3)$$

$$h_{сер} = \frac{-1410 + (-1412)}{2} = -1411.$$

Одержане перевищення округляють до цілої кількості міліметрів і записують у графу 7 табл. 2.

Так само підраховують $h_{сер}$ на всіх станціях ходу.

Для перевірки правильності підрахунків у журналі виконують

посторінковий контроль. Для цього на кожній сторінці підсумовують окремо всі задні (З) і передні (П) відліки, а також усі середні перевищення $h_{сер}$ з урахуванням їхніх знаків [9].

Знайдені суми записують під підсумковою рискою, проведеною в нижній частині сторінки.

Перевіряють дотримання рівняння:

$$\frac{\sum Z - \sum П}{2} = \sum h_{сер}. \quad (4)$$

Для станцій 1–3 на першій сторінці журналу (табл. 2)

$$\frac{22912 - 24856}{2} = -972,$$

що підтверджує правильність підрахунків на цій сторінці.

У кінці журналу так само виконують загальний контроль по всьому ходу.

Контроль нівелювання траси. Під час нівелювання траси відбувається накопичення похибок при визначенні позначок точок. Тому для контролю здійснених робіт визначають так звану висотну нев'язку f_h .

За подвійного нівелювання в прямому та зворотному напрямках цю нев'язку обчислюють за формулою

$$fh = \Sigma h_{\text{пр}} + \Sigma h_{\text{зв}}, \quad (5)$$

де $\Sigma h_{\text{пр}}$, $\Sigma h_{\text{зв}}$ — суми середніх перевищень прямого і зворотного ходів відповідно.

Потім перевіряють умову:

$$|f_h| \leq f_{\text{доп}} = \pm 50\sqrt{2L}, \quad (6)$$

де L — довжина нівелірного ходу, км.

Якщо умова не виконана, складають журнал перевищень (табл. 3). За різницею перевищень знаходять станції з очевидними похибками вимірювань, коли $|\Delta h| = |h_{\text{пр}} - h_{\text{зв}}| > 4$ мм. На цих станціях нівелювання повторюють, похибки виправляють.

Таблиця 3

Журнал перевищень точок траси

Сполучені точки траси	Перевищення, м		Різниця перевищень $\Delta h = h_{\text{пр}} + h_{\text{зв}}$
	пряме $h_{\text{пр}}$	зворотнє $h_{\text{зв}}$	
Рр1	-0,300	0,301	0,001
ПК0	-0,230	0,226	-0,004
ПК1	0,017	-0,016	0,001
ПК2	0,206	-0,202	0,004
ПК3+26	0,486	-0,485	0,001
ПК4	-1,055	1,051	-0,004
ПК5	-0,672	0,675	0,003
ПК6	-0,740	0,744	0,004
ПК7	-0,069	0,065	-0,004
ПК8	-0,598	0,598	0,000
ПК9	-0,303	0,304	0,001
ПК10	-0,183	0,183	0,000
ПК11	0,158	-0,160	-0,002
К.Тр.	-3,283	3,284	0,001

За наявності реперів на початку (R_{p1}) і в кінці траси (R_{pn}) нев'язку визначають як

$$|f_h| = \Sigma h_{\text{сер}} - (H_{R_{pn}} - H_{R_{p1}}), \quad (7)$$

і перевіряють виконання умови

$$|f_h| \leq f_{h\text{доп}} = \pm 50\sqrt{L}. \quad (8)$$

Зрівнювання перевищень і обчислення сполучних і проміжних точок. Якщо нев'язка f_h є допустимою, то її розподіляють порівну на всі середні перевищення між сполучними точками з протилежним знаком [10].

Поправка на кожне середнє перевищення дорівнюватиме

$$\delta_h = \frac{-f_h}{n}, \quad (9)$$

де f_h – висотна нев'язка ходу, мм;
 n – кількість станцій ходу.

Підраховують виправлені перевищення (графа 8 табл. 2):

$$h_{\text{випр}} = h_{\text{сер}} + \delta_n, \quad (10)$$

де $h_{\text{сер}}$ – середнє перевищення;
 δ_n – поправка зі своїм знаком.

Після цього обчислюють позначки сполучних точок (графа 10 табл. 2):

$$H_{i+1} = H_i + h_{\text{випр}}, \quad (11)$$

де H_{i+1} , H_i – позначки наступної і попередньої сполучних точок відповідно;

$h_{\text{випр}}$ – виправлене перевищення між цими точками.

Потім на станціях із проміжними точками підраховують горизонт приладу (графа 9 табл. 2):

$$\text{ГП} = H_3 + Z_{\text{ч}}, \quad (12)$$

де H_3 – позначка задньої на станції сполучної точки;

$Z_{\text{ч}}$ – відлік по чорній шкалі задньої рейки.

Визначають позначки проміжних точок (графа 10 табл. 2):

$$H_{\text{пр}} = \text{ГП} - \text{Пр}, \quad (13)$$

де Пр – відлік по чорній шкалі рейки на проміжній точці.

Усі ці підрахунки виконують у журналі геометричного нівелювання.

Побудова поздовжнього профілю землі по осі дороги. Поздовжній профіль землі по осі дороги (чорну лінію) будують за даними пікетажного журналу і журналу геометричного нівелювання [11].

Для побудови беруть аркуш міліметрового паперу 297 мм за висотою. Спочатку профіль складають олівцем, виконуючи всі необхідні побудови тонкими лініями.

Побудову виконують у такій послідовності:

1. Аркуш міліметрового паперу беруть у рамку. У нижній лівій частині аркуша розташовують скорочену профільну сітку – сукупність горизонтальних граф, розміри і назву надано.

Верхню лінію профільної сітки називають лінією умовного горизонту. Для спрощення побудови рекомендовано цю лінію, а також ординату нульового пікету (початок траси) розташовувати на потовщених лініях міліметрового паперу, що створюють п'ятисантиметрові квадрати.

2. За даними пікетажного і нівелірного журналів до графи 5 «відстані» заносять положення пікетів, плюсових точок і кінця

траси вертикальними відрізками, відклавши в ній горизонтальні відстані в масштабі 1:2000. Вертикальні відрізки, що фіксують пікети, розташовують через 5 см на потовщених лініях міліметрівки. У верхній частині графі 6 підписують номери пікетів. Якщо між суміжними пікетами є плюсові точки (див. пікетажний журнал), то в графі 5 записують відстань між ними. Аркуш міліметрового паперу обрізати, відступивши по довжині від точки К.тр на 2 см праворуч.

3. З графі 10 нівелірного журналу в графу 4 профілю записують позначки пронівельованих точок поверхні землі по осі дороги. Позначки при цьому округляють до сантиметрів.

4. Призначають позначку умовного горизонту залежно від позначок землі за умови, що найнижча точка профілю має знаходитися не ближче 4 см до лінії умовного горизонту. Це відповідає (за вертикального масштабу профілю 1:2000) перевищенню на місцевості 8 м.

5. Відповідно до позначки умовного горизонту біля початку траси, ПК0 будують вгору шкалу висот – допоміжній вертикальній масштаб із підписаними через кожний сантиметр значеннями позначок, кратними 2 м.

Навпроти кожного пікету і плюсових точок відповідно до їхніх позначок за допомогою шкали висот фіксують олівцем положення за висотою кожної точки і з'єднують їх прямими лініями. Одержана лінія є профілем землі по осі дороги – чорним профілем.

6. Графи 1 і 6÷8 заповнюють за даними пікетажного журналу і відомості прямих, кривих та кутів повороту. Посередині графі 1 проводять горизонтальну лінію – вісь дороги, умовно розгорнуту в пряму лінію, на якій стрілками ліворуч або праворуч вказують повороти траси. Початок стрілок має відповідати пікетажному положенню вершини кута і бути позначений номером вершини. Графу 1 заповнюють на всю її ширину умовними знаками ситуації, знятої в притрасовій смузі і зафіксованої в

пікетажному журналі, або відповідними назвами: «вигін», «рілля» тощо. Короткими стрілками вказують напрямок основних скатів місцевості.

У графі 7, нижче лінії пікетажу, на відстані 15 мм від неї проводять горизонтальну лінію, що відображує вісь дороги. На цій лінії показують перпендикулярами від графі 5 положення точок початку та кінця кривих. Уздовж перпендикулярів записують відстані від початку або кінця кривої до найближчого заднього і переднього пікетів. Між цими точками показують умовними знаками (витягнутими дугами) криві, увігнуті в бік повороту траси. Усередині дуги кожної кривої записують значення всіх шістьох її параметрів. Над серединою кожної лінії між кривими (прямої вставки) записують дирекційний кут цієї лінії, а під нею – її довжину.

Положення реперів над лінією профілю, кілометрові покажчики в графі 8, будь-які підписи на профілі виконують за зразком.

Побудова поперечних профілів.

Поперечні профілі оформлюють на окремих аркушах міліметрового паперу формату А4. Обидва масштаби – горизонтальний і вертикальний – приймають однаковими – 1:500 (рис. 4).

Основні правила побудови [13]:

1. Для поперечного профілю готують і заповнюють лише дві графі: «Позначки поверхні землі» і «Відстані».

Усі горизонтальні відстані в поперечнику та позначки точок беруть із журналу нівелювання траси. На поперечному профілі відстані слід відкладати праворуч і ліворуч від вертикального відрізка, що позначає в графі відстані положення осі (ПК2). Пікет підписують симетрично відносно цього відрізка під нижньою лінією графі відстаней. Відстань між сусідніми точками поперечного профілю записують у графу 2, а позначки їхніх точок – у графу 1.

2. За позначками поверхні землі будують лінію поперечного профілю. Позначка лінії умовного горизонту може бути така сама, як і на поздовжньому профілі.

3. Над поперечним профілем підписують назву «Поперечний профіль на ПК 6 + 37» і вказують масштаби його побудови.



Рис. 4. Зразок оформлення поперечного профілю

Нанесення на поздовжній профіль проектної лінії. Проектну лінію, тобто поздовжній профіль споруди, що проектується (автомобільної дороги) будують на основі чорного поздовжнього профілю [14].

Проектну (червону) лінію наносять відповідно до чинних правил проектування. Заповнюють графу 2 ухилів і довжин, накресливши в ній у місцях переломів (зміни ухилів) проектної лінії вертикальні перегородки. Біля кожної перегородки, ліворуч і праворуч від неї, записують відстані в метрах від місця цієї зміни ухилу до найближчого заднього і переднього пікетів. Якщо ця точка співпадає з пікетом, то з обох боків не пишуть нічого.

У середині кожного прямокутника в графі 2 ухилів і довжин проводять діагональ: із верхнього лівого кута в нижній правий, якщо лінія йде на пониження (ухил є від'ємний), або з нижнього лівого у

верхній правий, якщо лінія йде на підвищення (ухил є додатним). На горизонтальних ділянках траси посередині графі проводять горизонтальну лінію. Зверху діагоналі або горизонтальної лінії вказують значення проектного ухилу в тисячних, а знизу — довжину закладення в метрах, на яке цей ухил поширюється [15].

4. Підраховують проектні позначки точок, у яких запроєктовані переломи проектної лінії. На початку траси на ПК0, записують проектну позначку, яка дорівнює фактичній позначці поверхні землі на ПК0. У прикладі вона дорівнює 57,09 м. Позначки всіх інших точок розраховують за формулою

$$H_n = H_{n-1} + i \cdot d, \quad (14)$$

де H_n — проектна позначка точки, яка визначається;

H_{n-1} – відома проектна позначка попередньої точки;
 i – проектний ухил;
 d – горизонтальна відстань (закладення) між точкою, у якій визначено позначку, і попередньою точкою.

Підраховані проектні позначки округляють до сотих часток метра, після чого записують у графу 3 проектних позначок.

У прикладі на першій проектній ділянці

$$H_{ПК0+91} = H_{ПК0} + i \cdot d = 57,09 + (0,018 \cdot 91) = 58,73 \text{ м.}$$

5. За підрахованими проектними позначками точок переломів проектну (червону) лінію наносять на профіль.

6. Підраховують проектні позначки всіх інших пікетів і плюсових точок профілю так само за формулою (14). Для запобігання зайвим помилкам у підрахунках рекомендовано за попередню точку з позначкою H_{n-1} завжди брати початок певного елемента проектної лінії, враховуючи відстань від цієї початкової точки до точки, позначку якої визначають. Підраховані позначки записують у графу 3 профілю.

Для контролю необхідно постійно перевіряти співпадіння проектної позначки точки з її графічним розташуванням на профілі.

7. Обчислюють позначку поверхні землі в точці ПК 1+55, яка нівелюванням на місцевості не визначена. Для цього

визначають ухил скату місцевості на ділянці від ПК 1+12 до ПК 1+60 як

$$i = \frac{h}{d}, \quad (15)$$

де h – різниця фактичних позначок поверхні землі в найближчих до ПК 1+55 точок профілю, тобто на ПК 1+12 і в плюсовій точці ПК 1+60;

d – горизонтальна відстань між цими точками.

$$i = \frac{58,48 - 58,02}{48} = 0,009.$$

За визначеним ухилом скату (0,009) і горизонтальною відстанню d до точки ПК 1+55 від ближньої задньої точки профілю знаходять шукану позначку:

$$H_{ПК1+55} = H_{ПК1+60} + i \cdot d = 58,02 + 0,009 \cdot 5 = 58,07 \text{ м.}$$

Знайдену розрахунково позначку точки ПК 1+55 записують у дужках у графі 4 профілю. Так само визначають позначку землі на ПК 0+91 і ПК 2+28.

8. На всіх пікетах і плюсових точках профілю підраховують робочі позначки (висоти насипів або глибини виїмок) як різницю проектної позначки земляного полотна і фактичної позначки поверхні землі. На виїмках робочі позначки записують під червоною лінією, а на насипах – над нею. Над точками перетину

чорної лінії профілю поверхні землі з проектною (червоною) лінією профілю земляного полотна, так званими точками нульових робіт, записують робочі позначки 0,00.

9. З точки нульових робіт опускають перпендикуляр (ординату) на лінію умовного горизонту і підраховують відстані до цієї точки від найближчих пікетів або плюсових точок профілю. Для прикладу візьмемо нульову точку біля ПК6 (рис. 5).

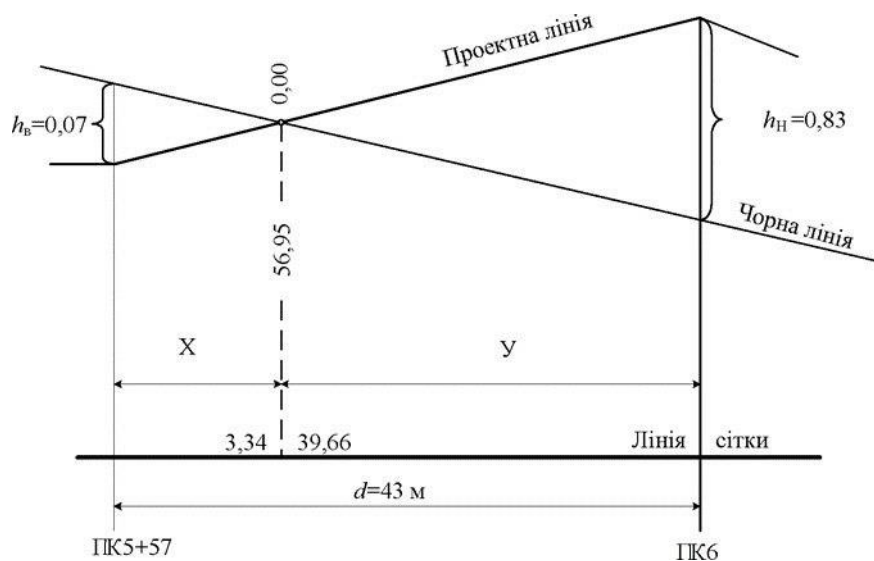


Рис. 5. Визначення відстаней до точки нульових робіт

Підрахунки виконують за формулами

$$x = \frac{h_{\text{в}} \cdot d}{h_{\text{н}} + h_{\text{в}}}; \quad y = \frac{h_{\text{н}} \cdot d}{h_{\text{н}} + h_{\text{в}}}, \quad (16)$$

де x , y – горизонтальні відстані до точки нульових робіт від найближчих до неї задньої (ПК5 + 57) і передньої (ПК6) точок профілю;

$h_{\text{в}}$, $h_{\text{н}}$ – робочі позначки (глибина виїмки і висота насипу відповідно) на задній (ПК 5 + 57) і передній (ПК6) точках профілю;

d – горизонтальна відстань між цими точками.

У прикладі

$$x = \frac{0,07 \cdot 43}{0,07 + 0,83} = 3,34 \text{ м};$$

$$y = \frac{0,83 \cdot 43}{0,07 + 0,83} = 39,66 \text{ м};$$

Перевіряємо умову

$$x + y = d. \quad (17)$$

У прикладі

$$3,34 + 39,66 = 43 \text{ м}.$$

Позначку Н точки нульових робіт підраховують за формулою для визначення проектних позначок, округляють її до сотих часток метра і записують її вздовж ординати точки нульових робіт: $H = 56,95$ м.

Ліворуч і праворуч від цієї ординати над лінією умовного горизонту записують відстані X і Y до точки нульових робіт від ближніх задньої (ПК 5+57) і передньої (ПК 6+00) точок. Так само підраховують інші точки нульових робіт.

Оформлення профілів. Усі надписи і побудови виконують тушшю тонкими лініями.

Червоним кольором оформляють проектну лінію, робочі позначки на ділянках насипів, вісь дороги в графі 1, усі лінії і цифри в графі 2 ухилів, проектні позначки в графі 3, роздільну лінію між графами 2 і 3, назву цих граф, а також прями і криві в плані (графа 7) з усіма цифрами.

Синім кольором показують перпендикуляри з точок нульових робіт до лінії умовного горизонту, робочі позначки 0,00, позначки (висоти) точок нульових робіт, горизонтальні відстані x і y .

Усі інші лінії, надписи і цифри виконують чорним кольором.

Висновки. Під час виконання інженерно-геодезичних робіт визначено:

- зміст рекогностування і трасування;
- послідовність розбивки пікетажу;
- послідовність і зміст обчислення відомості прямих, кривих і кутів повороту;
- послідовність обрахування координат у плані вершин кутів траси дороги;
- основні правила геометричного нівелювання;

- послідовність прив'язки траси дороги до реперів;
- особливості нівелювання сполучних і проміжних точок;
- послідовність обрахування проектних і робочих позначок поздовжнього профілю і точок нульових робіт;
- обчислення та врахування висотної нев'язки нівелірного ходу.

Список використаних джерел

1. Навчальна геодезична практика: навч. посіб. / В. М. Глущенко, Є. Б. Угненко, Н. В. Павленко та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018. 196 с.
2. Ващенко В., Літинський В., Перій С. Геодезичні прилади та приладдя: навч. посіб. Вид. 3-тє. Львів: Євросвіт, 2009. 208 с.
3. Кузьмін В. І., Білятинський О. А. Інженерна геодезія в дорожньому будівництві: навч. посіб. Київ: Вища шк., 2006. 278 с.
4. Геодезія: навч. посіб. Ч. 1. Топографія / А. Л. Островський, О. І. Мороз, З. Р. Тартачинська, І. Ф. Гарасимчук. Львів: Львівська політехніка, 2011. 440 с
5. Геодезія: підручник / А. Л. Островський, О. І. Мороз, В. Л. Тарнавський. Вид. 2-ге, випр. Львів: Львівська політехніка, 2012. Ч. 2. 564 с.
6. Ратушняк Г. С. Топографія з основами картографії: навч. посіб. Київ: Центр навчальної літератури, 2003. 208 с.
7. Шевченко Т. Г., Мороз О. І., Тревого І. С. Геодезичні прилади: навч. посіб. Львів: Львівська політехніка, 2009. 484 с.
8. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Лялюк О. Г. Інженерні вишукування: навч. посіб. Вінниця, 2009. 150 с.
9. Білокриницький С. М. Геодезія: навч. посіб. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2011. 576 с.
10. Метешкін К. О., Шаульський Д. В. Математична обробка геодезичних вимірів: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2012. 176 с.
11. Геодезичні дослідження при визначенні зсувних процесів на ділянках шляхів сполучення у гірській місцевості: навч. посіб. / Є. Б. Угненко, О. М. Тимченко, О. М. Ужвієва та ін. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2019. 184 с.
12. Хом'як А. Я. Інженерні вишукування у транспортному будівництві: навч. посіб. Київ: Знання, 2007. 348 с.
13. Геодезія /за ред. С. Г. Могильного і С. П. Войтенка. Чернігів: Чернігівські обереги, 2002. Ч. 1. 408 с.
14. Геодезія /за ред. С. Г. Могильного і С. П. Войтенка. Чернігів: Чернігівські обереги, 2002. Ч. 2. 410 с.
15. Войтенко С. П. Інженерна геодезія : підручник. Київ: Знання, 2009. 557 с.

Угненко Євгенія Борисівна, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. Тел.: +38 (067) 5713565. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

Шарий Григорій Іванович, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID iD: 0000-0001-5098-2661. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Ужвієва Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-3399-0472. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Коростельов Євген Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. E-mail: kostya_90@ukr.net.

Сорочук Наталія Ігорівна, асистент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681. E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Шевченко Анна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-6276-9761. E-mail: annshevc@gmail.com.

Белікова Наталія Віталіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0003-3286-3532. E-mail: nvbel19@gmail.com.

Ugnenko Yevgeniia, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. Tel.: +38(067)5713565. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

Shariy Grygoriy, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Head of the Department of Highways, Geodesy and Land Management, the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. ORCID iD: 0000-0001-5098-2661.

E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Uzhviieva Olena, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0002-3399-0472. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Korostelov Yevhen Mykolaiovych, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. E-mail: kostya_90_@ukr.net.

Sorochuk Nataliia, Assistant of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681.

E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Shevchenko Anna, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0001-6276-9761. E-mail: annshevc@gmail.com.

Bielikova Nataliia, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: 0000-0003-3286-3532. E-mail: nvbel19@gmail.com.

Статтю прийнято 07.05.2024 р.

УДК 332.2:332.36

**МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНУ
ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ**

Канд. техн. наук О. М. Клюка, д-р техн. наук В. С. Бахарєв,
канд. біол. наук Н. П. Гальченко, канд. техн. наук І. М. Шелковська,
асп. М. А. Васильєв

**METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE DEVELOPMENT
OF A COMPREHENSIVE PLAN FOR THE SPATIAL DEVELOPMENT OF THE
TERRITORY OF THE TERRITORIAL COMMUNITY**

PhD (Tech.) L. Kliuka, Dr. Sc. (Tech.) V. Bakhariev, PhD (Biol.) N. Halchenko,
PhD (Tech.) I. Shelkovska, postgraduate M. Vasilyev

Анотація. У статті викладені результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень, розглянуто актуальну проблематику і проаналізовано правові аспекти сфери комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад. За результатами запропоновано методику створення моделі стану фактичного використання земель умовної територіальної громади комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади.

Ключові слова: використання земель, землеустрій, комплексний план, простір, просторовий розвиток, територія, територіальна громада.

Abstract. The presented article presents the results of the conducted theoretical and experimental research, considers current issues, and analyzes the legal aspects of the complex planning of the spatial development of the territories of territorial communities.

Comprehensive spatial planning of the territories of territorial communities must be considered as a set of actions regarding the determination of areas for resettlement, places of employment, recreation and rehabilitation of the population, engineering and transport infrastructure through the development and further approval of documentation on spatial planning and compliance with its decisions in the long term. The comprehensive plan for the spatial development of the territory of the territorial community, which is both documentation with land management and urban planning documentation at the local level, is basically aimed at solving urban planning needs, but it only partially solves the issue of spatial development of land use.

Spatial planning of community territories lays a solid foundation for the integration of urban planning and land management design solutions and at the same time creates challenges related to the need to create conditions for the relationship between management objects in both branches, information system structures, scope of works, integration of documentation.

One of the most important strategic directions of integrated spatial planning of the territories of territorial communities is the development of ecologically safe, rational land use, as well as the introduction of functional territories of land use development, the formation of land use resistance to excessive anthropogenic influence during the implementation of agricultural activities aimed at greening and capitalization of land use, regulation of boundaries between urban and rural areas.

According to the results of the research, a method of creating a model of the actual use of the land of the conditional territorial community of the comprehensive spatial development plan of the territory of the territorial community is proposed.

Keywords: *land use, land management, comprehensive plan, space, spatial development, territory, territorial community.*

Вступ. Перебуваючи під впливом механіки реформи децентралізації сфера регулювання земельних відносин в Україні також цілеспрямовано зазнає прогресивних змін. Особливо революційним зрушенням можна вважати запровадження механізмів комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад, які дають змогу досягнути фундаментальних цілей, передбачених Європейською хартією регіонального/просторового планування: збалансованого соціально-економічного розвитку регіонів, покращення якості життя, відповідального менеджменту природних ресурсів і захисту навколишнього середовища, раціонального землекористування.

Проте через деякі причини на сьогодні комплексне планування просторового розвитку територій територіальних громад ще не набуло ознак усталеної практики, а його методичні основи – перевірки в реальних виробничих умовах. Тому доцільною є підготовка і детальне наукове обґрунтування пропозицій і рекомендацій щодо практичних засад комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад і розроблення відповідної документації, що має містити результати такого планування, зокрема в земельпорядній частині, які б у подальшому отримали загальне визнання професійної спільноти.

Беручи до уваги складність, мультикомпонентність та інтегральний характер комплексного плану, важливим завданням є більш глибоке осмислення окремих аспектів технічного боку процесу. Для реалізації поставленої мети нами проведено дослідження, що репрезентує авторське бачення методичних підходів до вирішення питань одного з таких аспектів, а

саме створення моделі стану фактичного використання земель – базового компонента земельпорядної частини комплексного плану.

Враховуючи зазначене, у ході реалізації дослідження встановлено правову основу комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад; визначено загальний склад земельпорядної частини комплексного плану; окреслено етапи розроблення тематичного підрозділу земельпорядної частини комплексного плану, що містить модель стану фактичного використання земель, характеризувано його зміст; запропоновано методіку створення моделі стану фактичного використання земель.

З 2014 р. в Україні здійснюється реформа місцевого самоврядування та територіальної організації влади (децентралізація), що є однією з наймасштабніших у її новітній історії. Логіка цієї реформи спрямована на підвищення інституційної спроможності органів місцевого самоврядування шляхом передавання на місцевий рівень певної частини державних функцій із метою утвердження матеріальної основи діяльності місцевого самоврядування для створення належних умов сталого розвитку територіальних громад.

Враховуючи діапазон соціально-економічних процесів, а також обсяг ресурсів, охоплених полем реформи, закономірною є багатовекторність, що, однак, укладається в рамки її місії, кінцевим призначенням якої є створення надійного інструментарію, здатного забезпечити більш ефективно вирішення муніципальною владою питань, пов'язаних із задоволенням життєво важливих потреб мешканців територіальних громад.

Проте успішне застосування цього інструментарію залежить від багатьох факторів, зокрема фінансових можливостей місцевих бюджетів, на які впливає продуктивність використання комунального майна. До такого майна належать землі державної власності, нещодавно передані в комунальну власність територіальних громад на підставі Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення системи управління та дерегуляції у сфері земельних відносин» [1].

Факт земельної децентралізації можна вважати провідним індикатором прогресу в реалізації принципу повсюдності місцевого самоврядування, задекларованого в цьому та інших законодавчих актах. Навіть незважаючи на те, що принцип повсюдності місцевого самоврядування ще не набув свого закріплення на рівні Конституції України, у правове поле вже введено новий механізм, що дасть змогу досягнути його виконання на практиці – комплексне просторове планування територій територіальних громад.

З оглядом на наявність надзвичайних обставин, спричинених бойовими діями, застосування такого механізму ще не набуло поширення, втім це не применшує науковий інтерес до проблематики комплексного просторового планування, зокрема в питанні формування методичних підходів до розроблення його землевпорядної частини.

Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій. Зважаючи на цілковиту новизну проблематики комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад, коло актуальних питань ще залишаються недослідженими. Наявні у вільному доступі опубліковані праці здебільшого фокусують увагу на нагальних організаційних і правових аспектах.

Найбільший інтерес у змістовій теоретичній наближеності до вибраної нами теми дослідження мають колективна монографія

за загальною редакцією А. М. Третяка «Територіально-просторове планування: базові засади теорії, методології, практики» [2], а також стаття «Стан та проблеми розроблення комплексних планів просторового розвитку землекористування території територіальних громад», опублікована А. М. Третяком, В. М. Третяк, Т. М. Прядкою, Р. А. Третяком, Н. В. Комаровою [3].

На окрему увагу заслуговують методичні рекомендації, посібники, навчальні посібники та практичні інструментарії, розраховані на виконавців робіт із землеустрою та посадових осіб місцевого самоврядування [4-6].

Визначення мети та завдання дослідження. Грунтуючись на наявних вихідних даних, необхідно визначити концептуальні засади управління земельними ресурсами територіальних громад в умовах децентралізації; проаналізувати правові аспекти сфери комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад; встановити особливості процедури підготовки завдання на розроблення комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади; надати характеристику вихідним даним і вимогам щодо картографічної основи комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади відповідно до положень чинних нормативно-правових актів, які регулюють порядок здійснення комплексного планування просторового розвитку територій територіальних громад.

Основна частина дослідження. У 2020 р. відбулося завершення процесу об'єднання територіальних громад. Відповідно до п. 7-1 Прикінцевих та перехідних положень Закону України від 21.05.1997 р. № 280/97-ВР «Про місцеве самоврядування в Україні» [7] на підставі рішень Кабінету Міністрів України здійснено визначення адміністративних центрів і затверджено території 1469 територіальних громад в усіх областях України [8].

До кінця 2020 р. у надзвичайно стислі строки виконано інвентаризацію земель сільськогосподарського призначення державної власності, що перебували в розпорядженні Держгеокадастру, і забезпечено їх передавання в комунальну власність територіальних громад, що мало наслідком фактичне завершення земельної децентралізації, започаткованої урядом ще у 2018 р. [9].

Остаточне закріплення на законодавчому рівні здобутків земельної децентралізації мало місце у зв'язку з набранням чинності Законом України від 28.04.2021 р. № 1423-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення системи управління та дерегуляції у сфері земельних відносин». В силу зазначеного закону з 27.05.2021 р. всі землі державної власності (з деякими винятками), розташовані за межами населених пунктів у межах територіальних громад були звернені у комунальну власність таких територіальних громад. Ці обставини створили необхідні передумови у становленні територіальних громад як первинних (базових) одиниць у системі адміністративно-територіального устрою України.

Однак у часовій площині між цією знаковою датою і моментом заключного, безповоротного оформлення конституційно-правового статусу територіальних громад майорить перспектива роботи великих масштабів, пов'язаної з реалізацією тісно взаємообумовлених механізмів встановлення їхніх меж і комплексного просторового планування територій територіальних громад. Без перебільшення, загальний результат цієї праці матиме стратегічне значення для функціонування місцевих спільнот, оскільки через забезпечення стійкого балансу між економічними пріоритетами та вимогами екологічної безпеки буде мати безпосередній кумулятивний ефект на майбутній стан життєвого середовища в довгостроковій перспективі. По суті

йдеться про методи використання земель, інших природних ресурсів, спрямованих на планування та управління колективними діями щодо подальшого розвитку землекористування в межах відповідних територій, часі та просторі [2], формалізованих у проєктних рішеннях, прийнятих суб'єктами землеустрою у ході проведення робіт із землеустрою, викладених у текстових і графічних матеріалах особливого виду документації із землеустрою, яка одночасно є містобудівною документацією на місцевому рівні – комплексному плані просторового розвитку території територіальної громади.

Комплексний план просторового розвитку території територіальної громади являє собою цілком новий вид документації з очевидною нестандартністю свого складу і змісту, де передбачено органічне синтезування елементів землевпорядного і містобудівного проєктування. Разом із тим, доки не подолана певна теоретична суперечливість такого поєднання, ще доволі складно стверджувати, наскільки дійсно воно буде органічним, що наразі пояснюється відсутністю практик успішної реалізації механізму комплексного планування в Україні, оскільки недостатньо розвинена методична основа такого механізму.

Правовою основою комплексного просторового планування території територіальної громади є законодавчі акти, які встановлюють порядок розроблення, склад і зміст комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади, а саме Закони України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10] і «Про землеустрій» [11] із змінами, внесеними на підставі Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель» [12], і перелік підзаконних нормативно-правових актів [13-17].

Загальний склад землевпорядної частини комплексного плану просторового

розвитку території територіальної громади відповідно до Порядку розроблення, оновлення, внесення змін і затвердження містобудівної документації містить тематичний розділ 2 «Землеустрій та землекористування» [16], який визначає питання сучасного використання земель і пропозиції щодо їх перспективного

використання та включає тематичні підрозділи (табл. 1).

За ч. 11 ст. 16-1 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10], землевпорядна частина комплексного плану також має містити відомості, викладені в текстових і графічних матеріалах, передбачених ст. 45-1 Закону України «Про землеустрій» (табл. 2) [11].

Таблиця 1

Складові елементи (тематичні підрозділи) розділу «Землеустрій та землекористування» комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади

Підрозділ 2.1 «Сучасне використання земель» <i>наведено інформацію щодо фактичного використання земель у межах територіальної громади, яка характеризується за формами власності в розрізі:</i>		
I	категорії та види цільового призначення земель	
II	угіддя	
III	земельні ділянки, у тому числі:	
	земельні ділянки, надані у власність чи користування або не надані у власність чи користування	виявлення земельних ділянок, використовуваних без зареєстрованого на них речового права
		земельні ділянки із земель запасу, резерву та загального користування, які не сформовані
Підрозділ 2.2 «Землевпорядні заходи перспективного використання земель» <i>сформовано на основі розроблених проектних рішень, містить таку інформацію:</i>		
IV	<i>перспективний розподіл земель за категоріями, видами цільового призначення земель, власниками і користувачами (формами власності та видами речового права), угіддя з урахуванням наявних обмежень (обтяжень)</i>	
V	землі (території) загального користування	
VI	перелік земельних ділянок, які планують передавати в комунальну власність	
VII	перелік земель (територій) для безоплатного передавання у власність із земель державної та комунальної власності	
VIII	перелік земель (територій) для продажу земельних ділянок із земель державної та комунальної власності або прав на них на земельних торгах	
IX	перелік земель (територій) для продажу або передавання в користування земельних ділянок із земель державної та комунальної власності без проведення земельних торгів	
X	перелік територій, необхідних для розміщення об'єктів, щодо яких відповідно до законодавства може здійснюватися примусове відчуження таких земельних ділянок через суспільну необхідність	

Підрозділ 2.3 «Формування земельних ділянок» наведено інформацію щодо земельних ділянок, сформованих за результатами розроблення планувальних рішень детального плану території територіальної громади			
XI	формування земельних ділянок є обов'язковим, крім випадків, коли зазначені земельні ділянки вже сформовані, якщо на таких земельних ділянках розташовані або передбачені споруди		
за кошти державного або місцевого бюджетів – об'єктів соціальної інфраструктури (житлово-комунального господарства, охорони здоров'я, освіти, культури)	об'єктів, передбачених Генеральною схемою планування території України та/або схемою планування області	об'єктів, для розміщення яких (відповідно до Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності») може здійснюватися примусове відчуження земельних ділянок через суспільну необхідність	інших об'єктів, зазначених замовником у завданні на проектування
відомості про земельні ділянки, які вже сформовані, підлягають внесенню до даних Державного земельного кадастру (у випадку, коли такі відомості ще не внесені до Державного земельного кадастру)			
відомості про обчислення площ земельних ділянок	кадастровий план земельної ділянки	проекти перенесення меж земельної ділянки в натуру (на місцевість)	
перелік обмежень, що є у використанні земельних ділянок	акт приймання-передавання межових знаків земельних ділянок на зберігання	акт перенесення в натуру (на місцевість) зон санітарної охорони, меж охоронних зон, санітарно-захисних зон і зон особливого режиму використання земель (у разі наявності)	
Підрозділ 2.4 «Реєстрація земельних ділянок» наведено інформацію щодо земельних ділянок, право власності на які зареєстровано до 2004 року, і відомості, не внесені до Державного земельного кадастру			
XII	документація із землеустрою, відповідно до якої вказані земельні ділянки були сформовані і яка містить інформацію про їхнє місце розташування та координати поворотних точок їхніх меж	матеріали кадастрової зйомки, точність якої відповідає точності, відповідно до вимог Порядку проведення інвентаризації земель	

Текстові і графічні матеріали комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади [11]

Структурний елемент статті закону, що визначає складову	Назва документа
а)	матеріали топографо-геодезичних вишукувань
б)	матеріали погодження відповідно до Земельного кодексу України
в)	експлікація земельних угідь за власниками та користувачами земельних ділянок
г)	переліки обмежень у використанні земель і переліки земельних ділянок, щодо яких встановлено обмеження у використанні земель
г)	збірний план земельних ділянок, наданих у власність чи користування, і земельних ділянок, не наданих у власність чи користування
д)	план розподілу земель за категоріями, власниками і користувачами (форма власності, вид речового права), угіддями з відображенням наявних обмежень (обтяжень)

Дотримуючись таких обов'язкових методологічних засад землевпорядного проєктування, як стабільність і наукова обґрунтованість землевпорядних дій, з урахуванням досвіду, набутого за виконання експериментальної складової цього дослідження, авторами запропоновано схему операційної черговості створення моделі стану фактичного використання земель.

Етап 1. Геопросторовий аналіз території для збирання вихідних даних.

Для створення умов з належного обґрунтування проєктних землевпорядних рішень, що будуть сформульовані у процесі розроблення наступних тематичних підрозділів землевпорядної частини комплексного плану, на цьому етапі забезпечено збір вихідних даних, перелік яких окреслено в ч. 8 ст. 16-1 Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» [10], що серед іншого мають містити відомості:

- про фізичні (географічні) особливості території: висоти, ухили, топографічну специфіку земної поверхні;

- топонімічні особливості території: орографічні, гідрографічні, адміністративно-територіальні, соціально-економічні, природно-заповідні та інші географічні об'єкти;

- особливості агроєкосистем території: структуру, площу земельних угідь;

- особливості ґрунтового покриву території: розподіл за агропромисловими групами ґрунтів, площею контурів агропромислових груп ґрунтів;

- функціональні особливості землекористування: розподіл земель за категоріями, видами цільового призначення земельних ділянок, видами використання земельних ділянок;

- геодезичну характеристику території: астрономо-геодезичні пункти, пункти опорної геодезичної мережі тощо;

- об'єкти Державного земельного кадастру: сформовані земельні ділянки, відомості про які внесені до Державного земельного кадастру, ступінь їхньої топологічної єдності, обмеження у використанні, кадастрове зонування;

- об'єкти землеустрою: несформовані земельні ділянки, сформовані земельні ділянки, відомості про які не внесені до Державного земельного кадастру;

- речові права на нерухоме майно: розподіл за формами власності, видами речових прав, похідних від права власності.

Отримана в результаті геопросторового аналізу маса «сирої» інформації, яка містить ще не пов'язані між собою елементи вихідних даних, підлягає ретельній систематизації на наступному етапі.

Етап 2. Систематизація вихідних даних. Має ряд послідовних, взаємопов'язаних дій, спрямованих на структурування певної сукупності не пов'язаних між собою елементів вихідних даних про об'єкти реального світу для їх перетворення в чітко впорядкований масив інформаційних компонентів, поєднаних

внутрішніми логічними класифікаційно-координаційними зв'язками і придатних до операційного використання за моделювання об'єктів, процесів, явищ і їхньої візуалізації.

Етап 3. Моделювання та візуалізація стану фактичного використання земель на основі отриманих вихідних даних. На основі операційного використання систематизованих вихідних даних безпосередньо формують абстрактну модель, призначену для узагальнення та відображення як графічного образу характеристик поточного стану реальної системи землекористування. Результати моделювання візуалізують за допомогою спеціалізованих програмних засобів, що забезпечують можливість їх подання у формі графічних матеріалів, призначених для вирішення подальших проектних завдань (табл. 3).

Таблиця 3

Перелік графічних матеріалів, створюваних за результатами моделювання стану фактичного використання земель на території територіальної громади

Номер з/п	Документ, поданий у формі графічного матеріалу		
1	Картограма висот земної поверхні на території територіальної громади		
2	Картограма ухилів земної поверхні на території територіальної громади		
3	Оглядова топографічна карта території територіальної громади		
4	Довідковий план агровиробничих груп ґрунтів		
5	План фактичного використання (розподілу) земель територіальної громади		
	за формами власності	за категоріями земель і видами цільового призначення земельних ділянок	за видами земельних угідь
6	Збірний план земельних ділянок		
	наданих у власність чи користування та не наданих увласність чи користування	що використовують без зареєстрованого речового правана них	земель запасу, резерву та загального користування, не сформованих у земельні ділянки

Етап 4. Фінальне документальне оформлення тематичного підрозділу «Сучасне використання земель». Кінцевим кроком у процесі створення моделі стану фактичного використання земель є

оформлення складених текстових і графічних матеріалів відповідно до державних стандартів, норм і правил, а саме стисла просторова характеристика території територіальної громади та розроблення

моделі стану фактичного використання земель з урахуванням особливостей території територіальної громади.

За реалізації дослідження відповідно до названих нами етапів операційної черговості, беручи до уваги можливість доступу до джерел інформації, що містять вихідні дані в поточних умовах, авторами

розроблено модель стану фактичного використання земель з урахуванням особливостей території територіальної громади.

Для досягнення поставленої мети проведено такі технічні операції:

- визначено основні джерела інформації, що можуть містити вихідні дані (табл. 4);

Таблиця 4

Основні джерела інформації, що містять вихідні дані, необхідні для розроблення моделі стану фактичного використання земель на території територіальної громади

Вихідні дані		
1	2	3
Відомості про фізичні (географічні) особливості території	Відомості про топонімічні особливості території	Відомості про особливості агроєкосистем території
Матеріали зйомки	Державний реєстр географічних назв	Схема землеустрою
	Топографічна карта на територію адміністративного району	Матеріали дистанційного зондування Землі
	Спеціалізовані топонімічні довідники та наукова література	Вебкартографічні ресурси (OSM, Bing, Google Map, Map Tiler)
4	5	6
Відомості про особливості ґрунтового покриву території	Відомості про функціональні особливості землекористування	Відомості про геодезичну характеристику території
Картограми агропромислових груп ґрунтів	Державний земельний кадастр	Геопортал Державної геодезичної мережі
Інформаційний шар Публічної кадастрової карти України	Державний фонд документації з землеустрою та оцінювання земель	Державний картографо-геодезичний фонд України
7	8	9
об'єкти Державного земельного кадастру	об'єкти землеустрою	речові права на нерухоме майно
Державний земельний кадастр	Державний земельний кадастр	Архів територіального органу Держгеокадастру
	Державний фонд документації з землеустрою та оцінювання земель	Державний реєстр речових прав на нерухоме майно

- встановлено рівень доступу до джерел інформації за критеріями: повний

доступ, частковий доступ, доступ заблоковано;

- перевірено фактичну наявність необхідних вихідних даних у кожного конкретного джерела інформації;

- отримано вихідні дані з урахуванням рівня доступу до джерел інформації;

- перевірено допустимість, достовірність і достатність отриманих вихідних даних;

- відсортовано отримані вихідні дані за ступенем їхньої важливості, вагомості, актуальності;

- упорядковано (систематизовано) інформаційні компоненти вихідних даних.

Запропонований метод створення моделі стану фактичного використання земель територіальної громади за допомогою програмних засобів може бути поданий у такій формі:

1) картограми висот земної поверхні на території територіальної громади,

отримані шляхом полігонізації (векторизації) растрового зображення ЦМР у форматі GeoTIFF (5x5°), що містить інформацію про позначки висот земної поверхні (рис. 1, 2), частина якого вилучена безпосередньо на територію умовної територіальної громади за шаром її умовних меж із наступною трансформацією векторного файлу у формат KML;

2) картограми ухилів земної поверхні на території територіальної громади, шляхом полігонізації (векторизації у формат SHP) растрового зображення ЦМР у форматі GeoTIFF (5x5°), що містить інформацію про позначки кутів ухилів земної поверхні, частина якого вилучена безпосередньо на територію пілотної територіальної громади за шаром її умовних меж (рис. 3);

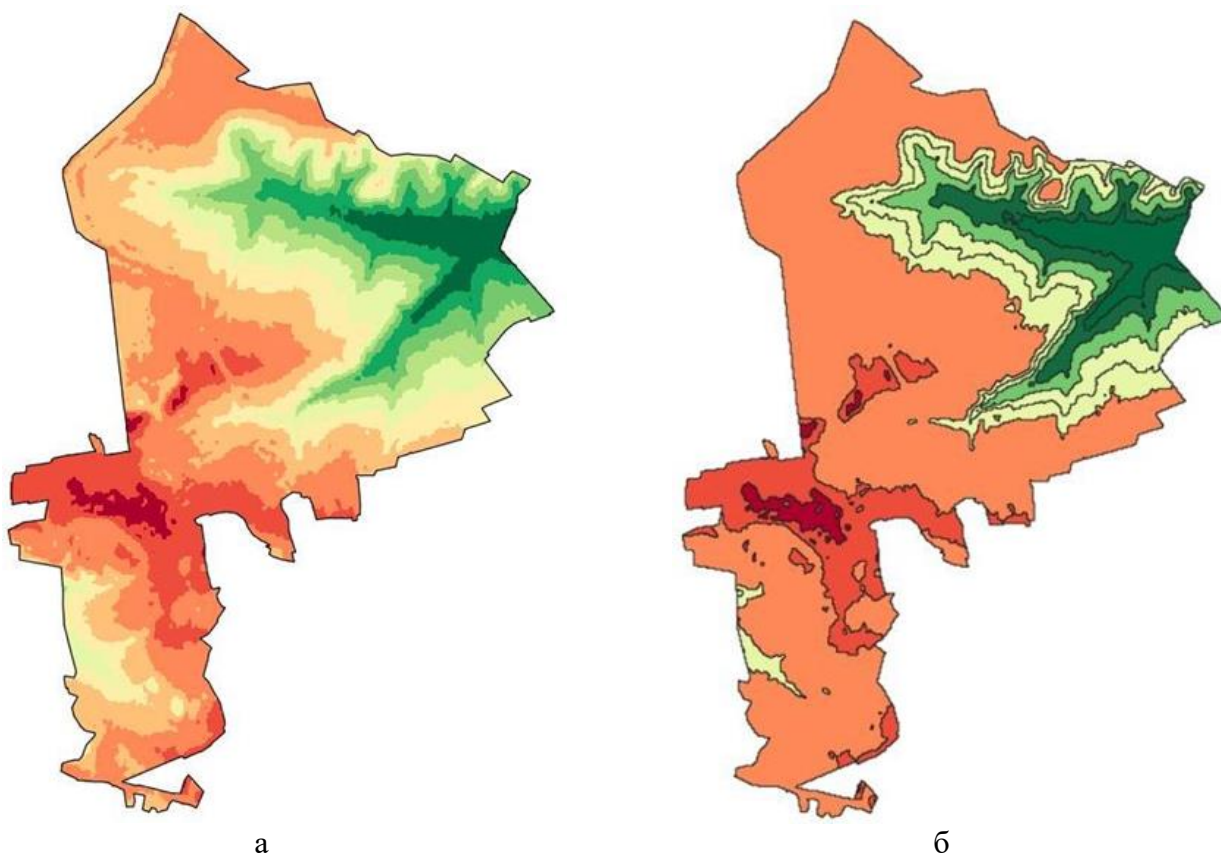


Рис. 1. Картограма висот земної поверхні на території територіальної громади (растрове зображення (а); полігонізоване (векторне) зображення (б))



Рис. 2. Візуалізація полігонізованого (векторного) зображення картограми висот земної поверхні на території територіальної громади за допомогою геоінформаційної системи Google Earth

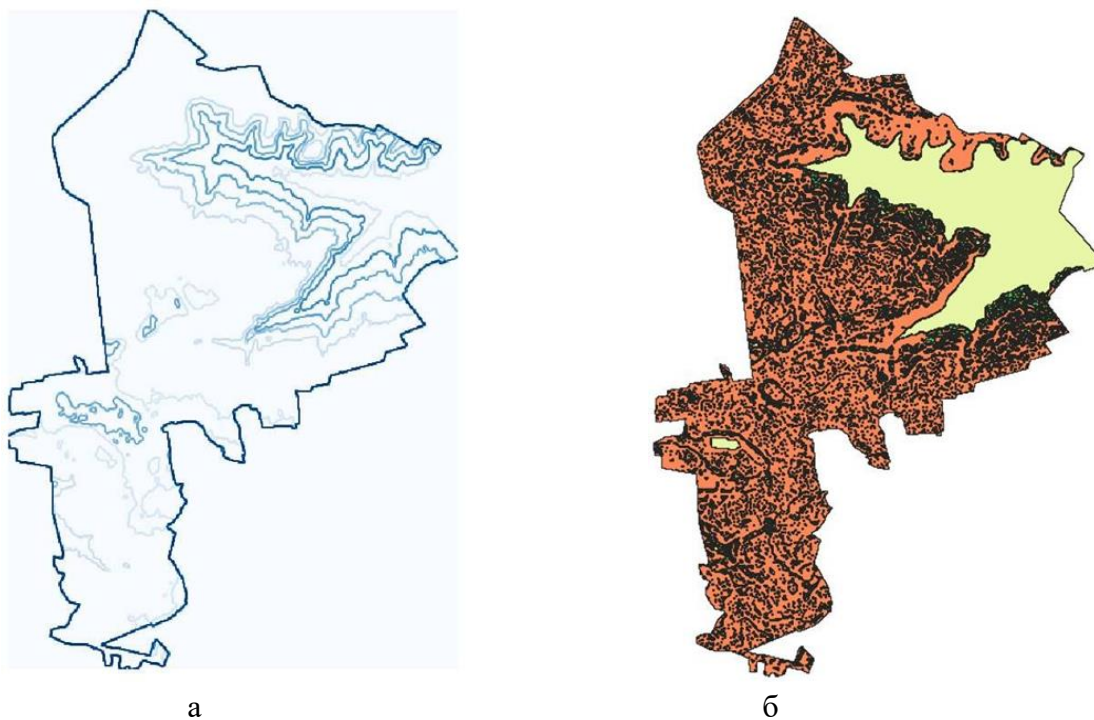


Рис. 3. Картограма ухилів земної поверхні на території територіальної громади (растрове зображення (а); полігонізоване (векторне) зображення (б))

3) оглядової топографічної карти території територіальної громади шляхом часткової векторизації растрового зображення ЦМР у форматі GeoTIFF (5x5°),

частина якого вилучена безпосередньо на територію пілотної територіальної громади за шаром її умовних меж, а також сканованих матеріалів топографічної

зйомки попередніх років на територію адміністративного району з подальшим створенням векторного шару горизонталей,

що мають висоту перерізу рельєфу 1,0 м, нанесення топонімічних позначень, топографічних умовних знаків (рис. 4);

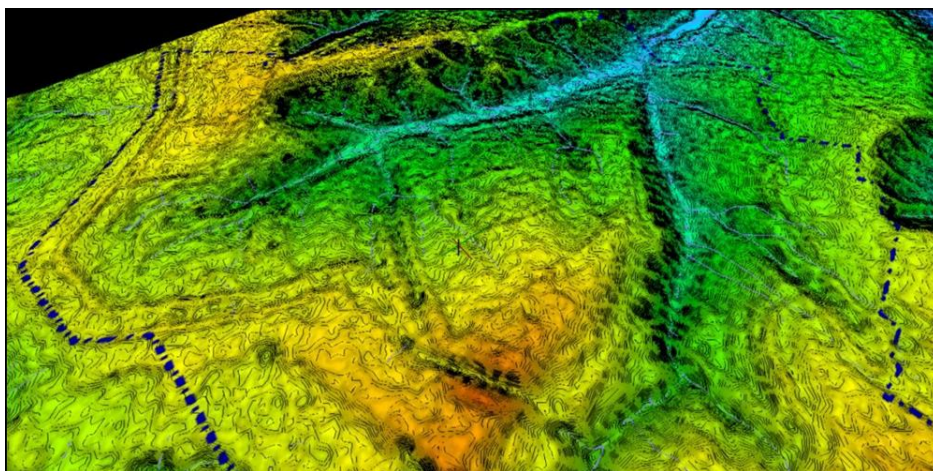


Рис. 4. Тривимірна візуалізація частини оглядової топографічної карти території територіальної громади

4) довідкового плану агровиробничих груп ґрунтів на території територіальної громади шляхом векторизації сканованих растрових зображень відповідних архівних планово-картографічних матеріалів із подальшим створенням векторної моделі, що відображує орієнтовний розподіл контурів агровиробничих груп ґрунтів;

5) плану фактичного використання (розподілу) земель територіальної громади:

- за формами власності (рис. 5);
- категоріями земель і видами цільового призначення земельних ділянок (рис. 6);
- видами земельних угідь (рис. 7);



Рис. 5. План фактичного використання (розподілу) земель територіальної громади за формами власності, додаткова візуалізація (фрагмент)



Рис. 6. План фактичного використання (розподілу) земель територіальної громади за категоріями земель і видами цільового призначення земельних ділянок, додаткова візуалізація (фрагмент)



Рис. 7. План фактичного використання (розподілу) земель територіальної громади за видами земельних угідь, додаткова візуалізація (фрагмент)

б) збірного плану земельних ділянок:
- наданих у власність чи користування та не наданих у власність чи користування;
- використовуваних без зареєстрованого речового права на них;
- земель запасу, резерву та загального користування, не сформованих у земельні ділянки;

7) фінального документального оформлення тематичного підрозділу «Сучасне використання земель».

Картографічна основа і математичний апарат геоінформаційної системи Google Earth, використовувана у процесі створення моделі стану фактичного використання земель умовної територіальної громади, дає змогу проводити низку досить точних,

реалістичних вимірювань координат, відстаней, кутів, протяжності шляхів тощо, недоліком безкоштовної версії є відсутність функції обчислення площ. Програма Google має також потужну базу показників абсолютних висот над рівнем моря, яка охоплює практично всю територію суходолу країни.

Висновки. За результатами виконаних досліджень було запропоновано методику створення моделі стану фактичного використання земель територіальної громади, який можуть запроваджувати органи місцевого самоврядування при

розробленні документів стратегічного планування на місцевому рівні, що визначають довгострокові просторові та соціально-економічні пріоритети розвитку територій територіальних громад, зокрема концепцій інтегрованого розвитку територій територіальних громад, а також суб'єкти, які відповідно до вимог законодавства можуть бути розробниками документації з землеустрою при формуванні та обґрунтуванні проектних рішень, розробленні ними комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад.

Список використаних джерел

1. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення системи управління та дерегуляції у сфері земельних відносин: Закон України від 01.01.2024 р. № 1423-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1423-20#Text> (дата звернення 01.02.2024).
2. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Третяк Н. А. Територіально-просторове планування: базові засади теорії, методології, практики. Біла Церква: ТОВ «Білоцерківдрук», 2021. 142 с.
3. Стан та проблеми розроблення комплексних планів просторового розвитку землекористування території територіальних громад / А. М. Третяк, В. М. Третяк, Т. М. Прядка та ін. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2022. № 1. С. 57-68.
4. Методичні рекомендації щодо розроблення комплексних планів просторового розвитку території територіальної громади та інших видів містобудівної документації на місцевому рівні (перша редакція). Київ: Мінрегіон України, 2021. 230 с.
5. Васильченко Г., Парасюк І., Єременко Н. Планування розвитку територіальних громад: навч. посіб. для посадових осіб місцевого самоврядування. Асоціація міст України. Київ: ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ»», 2015. 256 с.
6. Кубах С. Як розробити комплексний план громади: посіб. для професіоналів. Київ, 2022. 134 с.
7. Про місцеве самоврядування в Україні: Закон України від 10.12.2023 р. № 280/97-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 05.02.2024).
8. Про визначення адміністративних центрів та затвердження територій територіальних громад: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 12 червня 2020 р. № 728. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-2020-%D1%80#Text> (дата звернення 05.02.2024).
9. Питання передачі земельних ділянок сільськогосподарського призначення державної власності у комунальну власність об'єднаних територіальних громад: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 31.01.2018 р. № 60-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/60-2018-р#Text> (дата звернення 04.02.2024).

10. Про регулювання містобудівної діяльності: Закон України від 17.02.2011 р. № 3038-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення 03.02.2024).
11. Про землеустрій: Закон України від 22.05.2003 р. № 858-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text> (дата звернення 05.02.2024).
12. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель: Закон України від 17.06.2020 р. № 711-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#Text> (дата звернення 02.02.2024).
13. Про затвердження Класифікації обмежень у використанні земель, що можуть встановлюватися комплексним планом просторового розвитку території територіальної громади, генеральним планом населеного пункту, детальним планом території: Постанова Кабінету Міністрів України від 02.06.2021 р. № 654 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/654-2021-п#Text> (дата звернення 03.02.2024).
14. Про визначення формату електронних документів комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади, генерального плану населеного пункту, детального плану території: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.06.2021 р. № 632. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/632-2021-п#Text> (дата звернення 02.02.2024).
15. Деякі питання надання субвенції з державного бюджету місцевим бюджетам на розроблення комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад: Постанова Кабінету Міністрів України від 28.07.2021 р. № 853. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/853-2021-п#Text> (дата звернення 02.02.2024).
16. Про затвердження Порядку розроблення, оновлення, внесення змін та затвердження містобудівної документації: Постанова Кабінету Міністрів України від 01.09.2021 р. № 926. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-п#Text> (дата звернення 02.02.2024).
17. Про затвердження структури Базиса геоданих містобудівної документації на місцевому рівні: Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 22.02.2022 р. № 56. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0432-22#Text> (дата звернення 02.02.2024).

Клюка Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Тел.: +38(097)557-63-86. E-mail: klyukaolena@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9250-1157.

Бахарев Володимир Сергійович, доктор технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Тел.: +38 (067)733-86-26. E-mail: v.s.baharev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9312-654X.

Гальченко Надія Павлівна, кандидат біологічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Тел.: +38(067)270-42-90. E-mail: nadinGal9@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2659-177X.

Шелковська Інна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Тел.: +38(097)496-66-80. E-mail: selkovskaya291@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0986-381X.

Васильєв Максим Андрійович, аспірант кафедри публічного управління і проектного менеджменту, ДЗВО «Університет менеджменту освіти», Національна академія педагогічних наук України. Тел.: +38(066) 572-80-49. E-mail: max110191@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0602-2759.

Klyuka Olena Mykolayivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Civil Safety, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University. Тел.: +38(097)557-63-86. E-mail: klyukalena@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9250-1157.

Bakhariev Volodymyr Serhiiiovych, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor; Department of Civil Safety, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University. Тел.: +38 (067)733-86-26. E-mail: v.s.baharev@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9312-654X.

Halchenko Nadiia Pavlivna, PhD (Biol.), Associate Professor, Department of Civil Safety, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Тел.: +38(067)270-42-90.

E-mail: nadinGal9@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2659-177X.

Shelkovska Inna Mykolayivna, PhD (Tech.), Associate Professor of Department of Geodesy, Land Management and Cadastre, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Тел.: +38(097)496-66-80.

E-mail: selkovskaya291@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0986-381X.

Vasyliiev Maksym Andriiovych, Postgraduate, Department of Public Administration and Project Management, University of Educational Management, National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine.

Тел.: +38(066) 572-80-49. E-mail: max110191@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0602-2759.

Статтю прийнято 24.06.2024 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 656.073.235(100):355.01

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ В УМОВАХ ВІЙНИ

Кандидати техн. наук І. В. Берестов, А. В. Колісник, В. П. Раківненко, О. М. Кириченко,
магістр Р. Р. Сведюк

WAYS OF INCREASING THE RELIABILITY OF CONTAINER TRANSPORTATION IN INTERNATIONAL COMMUNICATION IN CONDITIONS OF WAR

PhD (Tech.) I. V. Berestov, PhD (Tech.) A. V. Kolisnyk, PhD (Tech.) O. M. Kirichenko,
PhD (Tech.) V. P. Rakivnenko, Master's degree R. R. Sveduk

Анотація. У статті запропонована удосконалена автоматизована технологія транспортування вантажів у контейнерах залізницею в міжнародному сполученні з урахуванням імовірності настання випадків невчасного відправлення судна з морського порту, результатом чого можуть бути додаткові витрати у вигляді штрафних санкцій. Впровадження цієї технології на АРМі оперативних працівників дасть змогу зменшити вплив «людського фактора» на прийняття рішень під час організації контейнерних перевезень залізницею та швидкого реагування за непередбаченої ситуації, що сприятиме підвищенню надійності перевезень і ймовірності їх виконання в запланований час в умовах війни.

Ключові слова: інтермодальні перевезення, контейнеропотік, імовірність виникнення ризику, сортувальна станція, морський порт, термінальна станція, автоматизоване робоче місце.

Abstract. The article proposes an improved automated technology for transporting goods by rail in international traffic, taking into account the likelihood of delays in ship departure from the seaport, resulting in additional costs in the form of penalty sanctions. It is known that the majority of goods arriving at seaports for further transportation are in containers. Therefore, in this work we consider and improve the part of the intermodal transportation route associated with raand seaports. To achieve this, it is necessary to adopt a systematic approach, which will allow describing all events occurring during the organization of such a complex process within one probabilistic framework and also consider the operation of each type of transport, especially in conditions of war where such probabilistic events become increasingly prevalent.

In this research, the objective function of the intermodal transportation system is formed when interacting with railway stations and ports as the total specific costs of container transportation, taking into account the throughput capacity of the transportation infrastructure and considering the probability of the risk of delayed ship departure due to the arrival delay of the necessary batch of containers.

Implementing this technology in automated workplaces of operational personnel will reduce the impact of the «human factor» on decision-making during the organization of rail transportation and enable quick response in an emergency, thereby enhancing the reliability of transportation and

the probability of their execution within the planned time frame, especially in wartime conditions. The implementation of this model has shown that the cost of transporting one container to the port by container train from the terminal will reduce specific expenses by approximately 3 % compared to the existing technology. The optimal accumulation time for containers at terminal stations will be 5 and 5.6 hours respectively.

Keywords: *intermodal transportation, container flow, risk probability, sorting station, sea port, terminal station, automated workplace.*

Вступ. Реалії сьогодення диктують нам нові вимоги щодо організації транспортного процесу доставлення вантажів у міжнародному сполученні. В умовах війни актуально врахувати такі фактори, як зменшення ризиків, диверсифікація, опрацювання альтернатив, які значно впливають на роботу транспортно-логістичного сектору, розосередження вантажних одиниць по декількох терміналах задля безпеки під час воєнного стану. Тому при удосконаленні вже наявних автоматизованих технологій перевізного процесу слід впровадити нові модулі системи підтримки прийняття рішень (СППР), які б ураховували всі вищенаведені особливості, що трапляються з вантажем під час транспортування в умовах війни. Це призведе до зменшення впливу «людського фактора» під час організації перевезень вантажів залізницею та швидкого реагування за непередбаченої ситуації, що сприятиме підвищенню надійності перевезень і ймовірності їх виконання.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових досліджень свідчить про те, що багато уваги науковці приділяють питанням ризиків на транспорті, тобто аналізу ймовірності настання випадків дорожньо-транспортних пригод під час транспортування вантажів або пасажирів. Так, одні автори пропонують напрям розвитку ризик-орієнтованих транспортних технологій при перевезенні вантажів, базований на логічному ланцюзі «фактор ризику – подія – економічні наслідки», фактори ризику поділити на техногенні і технологічні [1]; інші розробили класифікацію, що дає можливість

систематизувати ризики, які виникають під час вантажних перевезень автомобільним транспортом, і побудувати раціональну систему управління ризиками під час логістичної діяльності [2]; проаналізували різноманіття ризиків діяльності залізничного транспорту і запропонували ефективні методи управління ними, провели науково-обґрунтовану класифікацію ризиків, що сприяє чіткій ідентифікації кожного виду ризику в загальній системі [3]. У роботі [7] запропоновано мінімізувати витрати на транспортування контейнерів за рахунок оптимізації технології передислокації порожніх контейнерів. Визначено, вплив на загальну вартість передислокації порожніх контейнерів таких факторів, як вартість зберігання одиниці товару, оренди, репозиціонування та коливання попиту і пропозиції.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є удосконалення технології транспортування вантажів у контейнерах залізницею в міжнародному сполученні з урахуванням імовірності настання випадків невчасного відправлення судна з морського порту, результатом чого можуть бути додаткові витрати у вигляді штрафних санкцій.

Завдання дослідження:

- проаналізувати статистичні показники контейнеропотоків, що надходять у морські порти;
- проаналізувати взаємодію елементів системи інтермодальних перевезень і сформувати математичне подання функціонування системи інтермодальних перевезень;
- визначити залежності між елементами системи інтермодальних перевезень;

- сформувати математичну модель системи інтермодальних перевезень при взаємодії залізничних станцій і портів як сумарні питомі витрати транспортування контейнерів з урахуванням пропускної спроможності транспортної інфраструктури і ймовірності виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів.

Основна частина дослідження. На сьогодні найбільш «вузькими місцями», де накопичується велика кількість вантажів, що прямують у міжнародному сполученні, є залізничні термінальні станції та морські порти. Тому виникає необхідність розроблення математичної моделі технології їхньої взаємодії під час організації транспортування вантажів за кордон для удосконалення цього процесу: обрати системний підхід, який дасть змогу в одному ймовірнісному полі описати всі події, які трапляються під час організації такого складного процесу, і врахувати роботу кожного виду транспорту, причому в

умовах війни таких імовірнісних подій стає все більше.

Відомо, що основна частина вантажів, які надходять до морських портів для подальшого транспортування, знаходиться в контейнерах. Тому в цій задачі розглядаємо та удосконалюємо частину шляху інтермодальних перевезень, пов'язану з залізницею і морськими портами.

На підставі проведеного аналізу статистичних показників виявлено, що найбільший обсяг контейнеропотоків надходить у порти Дунайського регіону. У довоєнний час лідируючі позиції з перевалки контейнерів займали порти Одеського регіону (Одеса, Чорноморськ, Південний). На сьогодні задля безпеки перевезень найбільша частина вантажів проходить через порти Дунайського регіону (рис. 1). За 2023 рік через порти Ізмаїл, Рені та Усть-Дунайськ було перевалено 29,3 млн т вантажів, з них зернові – 14,1 млн т вантажів, олія – 2,6 млн т, нафтопродукти – 1,9 млн т, руда – 1,7 млн т, інші вантажі – 9 млн т [4].

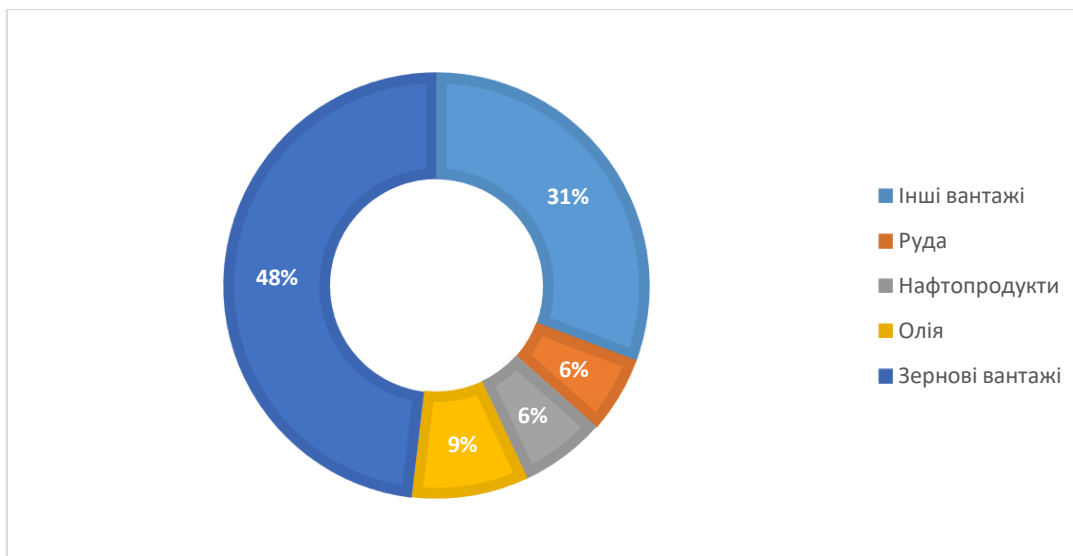


Рис. 1. Розподіл номенклатури вантажів, перевалених у портах Дунайського регіону за 2023 рік

Було проаналізовано обсяг вантажів, перевантажених у портах Дунайського регіону, за останні три роки. Статистичні дані свідчать про тенденцію збільшення обсягів з кожним роком. Так, у 2022 році

порівняно з 2021 роком збільшення на 66,21 %, у 2023 році вантажів, перевантажених у цьому регіоні, – на 51 % порівняно з обсягами 2022 року (рис. 2) [4].

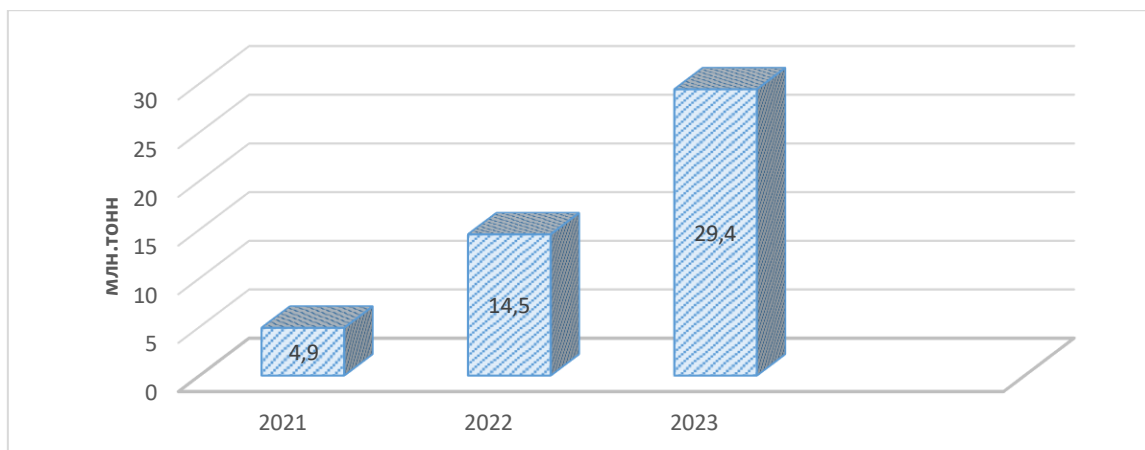


Рис. 2. Динаміка обсягів перевалених вантажів у портах Дунайського регіону за 2021-2023 роки

У цьому дослідженні інтермодальні перевезення розглядають із залученням декількох видів транспорту, а саме морського і залізничного. Тому систему інтермодальних перевезень S за участі залізничного транспорту, враховуючи базові системні принципи, можна ідентифікувати як сукупність елементів від e_1 до e_n , пов'язаних між собою визначеними залежностями, з урахуванням параметрів цих елементів від p_1 до p_n , відношень k_1 до k_n між цими елементами.

Математичне подання функціонування системи інтермодальних перевезень необхідне для досягнення оптимального в часі і просторі потоку контейнерних перевезень між елементами системи з максимально можливою швидкістю проходження ланок. Також при формалізації такого процесу необхідно врахувати зв'язки цієї системи з навколишнім середовищем. Систему інтермодальних перевезень за участі залізничного транспорту можна подати як

$$S = (E, P, R, R^*), \quad (1)$$

де R^* – сукупність залежностей елементів системи E з елементами оточення E' .

У цьому випадку елементами системи є сортувальні станції, припортові станції, що знаходяться неподалік морського порту і обслуговують контейнеропотоки. Схема взаємозв'язку між елементами системи наведена на рис. 3.

До елементів оточення можна віднести вантажовідправників, термінальні станції, автомобільний транспорт, що доставляє вантаж від вантажовідправників до термінальних станцій.

На пропускну спроможність системи інтермодальних перевезень безпосередньо впливає переробна спроможність причалів у портах, на припортових станціях, залізничних термінальних станціях, стан транспортної інфраструктури, яка забезпечує інтермодальні перевезення (залізниці, автошляхи, контейнерні термінали). Ці елементи виступають складовими пропускну спроможності. Виходячи з цього формалізована модель системи інтермодальних перевезень при взаємодії залізничних станцій і морських портів буде виглядати так [5]:

$$S_{spr}^{int} = f(T_{spr}, I_{spr}, S_{spr}, M_{spr}), \quad (2)$$

де T_{spr} , I_{spr} , S_{spr} , M_{spr} – пропускні спроможності таких підсистем, як термінальна станція, транспортна

інфраструктура, сортувальна станція, переробна спроможність морського порту.

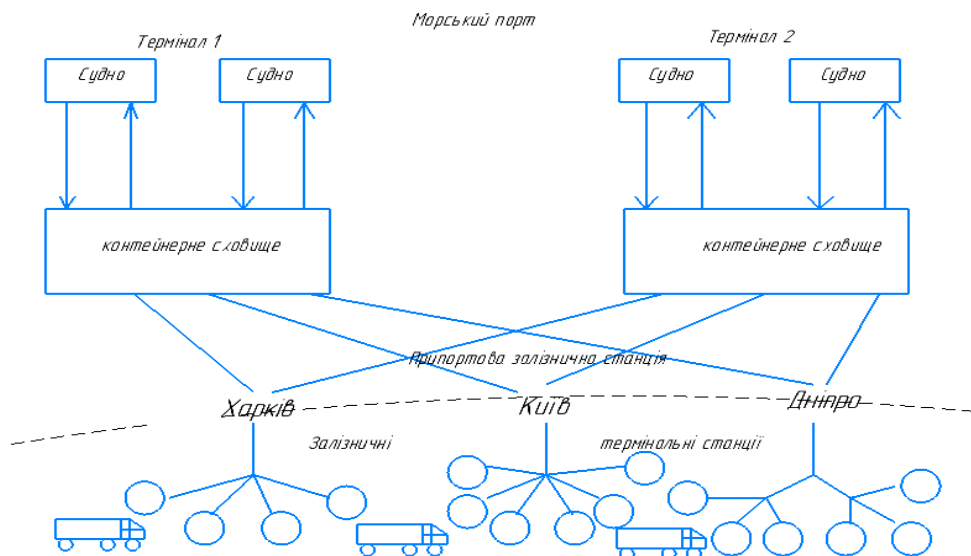


Рис. 3. Схематичне подання взаємодії елементів системи інтермодальних перевезень при моделюванні цього процесу

Ці підсистеми взаємозалежні, що ускладнює процес формалізації та удосконалення інтермодальних перевезень. Кожен із цих елементів має фактори випадковості, які потрібно врахувати під час побудови моделі інтермодальних перевезень. Іншими словами, кожен підсистему можна вважати змінною (Z). Ці змінні залежать одна від одної та від факторів зовнішнього середовища:

$$Z = f(Y, \mu, X), \quad (3)$$

де $\mu = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$ - множина залежних n змінних, таких як витрати на доставлення контейнерних партій, часові характеристики;

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ - множина незалежних m змінних, кількість ресурсів за певних параметрів потоку замовлень;

Y - множина параметрів моделі.

Надходження контейнерів можна вважати випадковим транспортним потоком, який зароджується з потоків вантажовідправників. При формалізації системи інтермодальних перевезень необхідно врахувати певні умови [5]:

$$0 \leq Q \leq \left\{ \begin{array}{l} D, D \leq S_{spr}^{int} \\ S_{spr}^{int}, D > S_{spr}^{int} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

де Q – контейнеропотік;

D – попит на перевезення;

S_{spr}^{int} – пропускна спроможність системи інтермодальних перевезень.

Пропонуємо прийняти, що контейнеропотік, який проходить через систему інтермодальних перевезень, не має перевищувати попит на перевезення. У разі перевищення значення попиту за пропускну

спроможність системи інтермодальних перевезень контейнеропотік не має бути більше пропускної спроможності системи інтермодальних перевезень.

Також, урахуваючи випадковий характер зародження контейнеропотоків, за формалізації системи інтермодальних

перевезень використаємо модель кількісного оцінювання надходження контейнерів до залізничних термінальних станцій із одночасним контролюванням імовірнісних характеристик цього процесу. Отже, із урахуванням отриманих вище моделей, визначимо функціонал [6, 8]:

$$U = U(p, \tau, \{\lambda_1(t), \lambda_2, \dots, \lambda_{n^c}(t)\}, \{q_1, q_2, \dots, q_{n^c}\}), \quad (5)$$

де U – функціонал, який визначає мінімальну кількість контейнерів, що з імовірністю p будуть накопичені на залізничних термінальних станціях протягом часового інтервалу τ із урахуванням множини функцій інтенсивностей $\{\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_{n^c}(t)\}$ і множини величин кратностей $\{q_1, q_2, \dots, q_{n^c}\}$ складових потоків;
 n^c – кількість складових потоків.

Виходячи з вищевказаного цільова функція системи інтермодальних перевезень при взаємодії залізничних станцій і портів буде виглядати як сумарні питомі витрати транспортування контейнерів із урахуванням пропускної спроможності транспортної інфраструктури і ймовірності виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів:

$$V(\tau) = \frac{1}{\sum_{i=1}^z Q} \sum_{i=1}^z (N + \Pi + T + C + P \cdot S) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де Q – контейнеропотік із урахування накопичень контейнерів за декількома напрямками;

z – кількість маршрутів доставлення контейнерів до порту;

τ – змінний вектор часу закінчення накопичення контейнерних партій $\tau = (\tau_1, \tau_2 \dots \tau_z)$ на залізничних термінальних станціях маршрутів;

N – витрати на накопичення контейнерів, пов'язані з контейнеро-годинами,

$$N = e_{\kappa z} \int_{t_0}^{\tau_i} U dt, \quad (7)$$

де $e_{\kappa z}$ – вартість контейнеро-години;

Π – витрати на переміщення контейнерних партій, пов'язані з вагоно-кілометрами,

$$\Pi = e_{\sigma-\kappa M} * l_i(U), \quad (8)$$

де l_i – довжина i -го маршруту від термінальної станції до порту;

$e_{\sigma-\kappa M}$ – вартість вагоно-кілометра;

T – витрати, пов'язані з поїздо-годинами в русі під час транспортування контейнерних партій за певний час у русі t_i ,

$$T = e_{n-z} * t_i; \quad (9)$$

C – витрати, пов’язані з вагоно- та контейнеро-годинами, які виникають під

час руху поїздів по дільницях, під час невиробничого простою вагонів і в процесі їхньої обробки на сортувальних станціях, а також просування поїздів від припортових станцій до порту,

$$C = (e_{k-z} \cdot Q) + e_{s-z} \frac{1}{\rho_i} Q \times (O_{сорт} + K), \quad (10)$$

де ρ_i – місткість фітінгової платформи в контейнерах на i -му маршруті (залежить від типів фітінгових платформ і контейнерів, що використовують);

$O_{сорт}$ – час переробки поїзда на сортувальній станції, який підпорядковується нормальному закону розподілу;

K – час просування поїздів від припортової станції до порту, який підпорядковується розподілу Ерланга;

S – витрати, пов’язані з невиробничим простоем судна і штрафними санкціями, які виникають внаслідок невчасного прибуття контейнерних партій;

P – імовірність виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів.

Оптимізацію моделі слід проводити з урахуванням таких обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \sum_{i=1}^z Q \leq \left\{ \begin{array}{l} D, D \leq S_{spr}^{int} \\ S_{spr}^{int}, D > S_{spr}^{int} \end{array} \right\} \\ \tau_i \geq 0, \forall_j = 1, 2 \dots z \\ Q \leq m_j^{max}, \forall_j = 1, 2 \dots z \end{array} \right. \quad , \quad (11)$$

де m_j^{max} – максимально допустима кількість фітінгових платформ у складі поїзда на i -му маршруті;

S_{spr}^{int} – пропускна спроможність системи інтермодальних перевезень.

Перше обмеження забезпечує контейнеропотік з усіх напрямків, який не перевищує пропускну спроможність системи інтермодальних перевезень. Друге обмеження показує забезпечення умови невід’ємності часу завершення накопичення контейнерних партій. Третє обмеження необхідно для запобігання накопиченню контейнерів у кількості, яка перевищує максимально допустимий склад поїзда.

При розв’язанні цієї задачі було розглянуто дві залізничні термінальні станції, на які надходили контейнери від вантажовідправників. Реалізація такої моделі показала, що вартість транспортування одного контейнера до порту контейнерним потягом з терміналу зменшить питомі витрати приблизно на 3 % порівняно з чинною технологією. Оптимальне закінчення часу накопичення контейнерів на термінальних станціях складе 5 і 5,6 год відповідно.

Запропонована технологія дає змогу зменшити ймовірність виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів, тим самим уникнути витрат, пов’язаних із невиробничим простоем судна і штрафними санкціями, які виникають внаслідок невчасного прибуття контейнерних партій.

Висновки. У роботі проведено аналіз статистичних показників контейнеропотоків, що надходять у морські порти.

Виявлено, що найбільший обсяг контейнеропотоків припадає на порти Дунайського регіону. У довоєнний час лідируючі позиції з перевалки контейнерів займали порти Одеського регіону (Одеса, Чорноморськ, Південний). На сьогодні задля безпеки перевезень найбільша частина вантажів проходять через порти Дунайського регіону. Як полігон досліджень було обрано дві залізничні термінальні станції, розташовані на території України, із яких відправляють контейнерні поїзди в порти Дунайського регіону.

Було проаналізовано взаємодію елементів системи інтермодальних перевезень і сформовано математичне подання функціонування системи інтермодальних перевезень. Сформовано математичну модель системи інтермодальних перевезень при взаємодії

залізничних станцій і портів як сумарні питомі витрати на транспортування контейнерів із урахуванням пропускної спроможності транспортної інфраструктури і ймовірності виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів. Розв'язання цієї задачі показало, що використання запропонованої технології дасть змогу зменшити вартість на транспортування контейнера залізницею в системі інтермодальних перевезень у бік морського порту приблизно на 3%. Впровадження такої автоматизованої технології сприятиме узгодженій роботі між усіма учасниками перевізного процесу та уникненню витрат, пов'язаних із невиробничим простоем судна і штрафними санкціями, які виникають внаслідок невчасного прибуття контейнерних партій до порту.

Список використаних джерел

1. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Артемов Е. М., Лагно О. С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризикорієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38-45.
2. Тарельник Н. В. Класифікація ризиків під час вантажних перевезень автомобільним транспортом. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4. С. 92-98.
3. Віштак І. В., Березюк О. В. Причини виникнення ризиків на автомобільному транспорті. *XV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/36.pdf>.
4. У портах Дунайського кластеру відкрили 23 нових термінали з початку року. URL: <https://forbes.ua/news/v-portakh-dunayskogo-klasteru-vidkrito-23-novikh-terminali-tsogo-roku-13122023-17888>.
5. Алексійчук Н. М. Удосконалення технологічного забезпечення контейнерних перевезень з використанням резервів провізних спроможностей залізничного транспорту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Київ, 2013. 24 с.
6. Колісник А. В. Формування автоматизованої технології транспортування контейнерів залізницею на основі теорії випадкових потоків: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 – транспортні системи; 27–Транспорт. Харків, 2020. 225 с.
7. Research on the Optimization of Empty Container Repositioning of China Railway Express in Cooperation with International Liner Companies. URL: Sustainability | Free Full-Text | Research on the Optimization of Empty Container Repositioning of China Railway Express in Cooperation with International Liner Companies (mdpi.com).

8. Research of process of receipt of container flows at railway terminal stations in the conditions of intermodal transportations / M. Kutsenko, A. Kolisnyk, O. Kameniev та ін. *AIP Conference Proceedings*. 2684, 020006 (2023). 2023. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2684/1/020006/2893741/Research-of-process-of-receipt-of-container-flows?redirectedFrom=fulltext>.

Берестов Ігор В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0002-1209-6885].

E-mail: berestov@kart.edu.ua.

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, завідувач кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].

E-mail: Valeryrakivnenko@gmail.com.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0001-5038-0230].

Tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Сведюк Роман Романович, магістр, Український державний університет залізничного транспорту.

Berestov Igor, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID [0000-0002-1209-6885]. E-mail: berestov@kart.edu.ua.

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.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport., ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Sveduk Roman, master's degree, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 25.04.2024 р.

УДК 656.223

ОГЛЯД І АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ МАСОВИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ

Асп. Д. В. Кудряшов, Н. С. Кудряшова

REVIEW AND ANALYSIS OF THE MAIN DIRECTIONS ON IMPROVING THE EFFICIENCY TRANSPORTATION OF MASS CARGO BY RAIL TRANSPORT

Postgraduate D. V. Kudriashov, N. S. Kudriashova

Анотація. Розглянуто і проаналізовано обсяги вантажних залізничних перевезень за останній період, виділено ключові тенденції та фактори, які їх обумовлюють. Наведено огляд і аналіз наукових досліджень стосовно питань із підвищення ефективності перевезень масових вантажів залізничним транспортом. Розглянуто основні проблеми, пов'язані з перевезенням масових вантажів, і шляхи їх вирішення, переваги та виклики при використанні

технології контейнерних перевезень, ефективність перевезення масових вантажів за допомогою контрейлерних перевезень, їхні переваги та недоліки, математичну модель руху контрейлерного поїзда, доцільність створення структур типу «сухий порт», концепцію вибору раціональних параметрів функціонування виробничо-транспортних систем. Наведено пропозиції щодо удосконалення ефективності перевезень масових вантажів залізничним транспортом.

Ключові слова: вантажопотоки, відправницькі маршрути, контрейлерні перевезення, масові вантажі, оптимізація, «сухий порт».

Abstract. The research found that mass cargo transportation in Ukraine plays a key role in the functioning of the economy, driving the development of many industries and ensuring the country's competitiveness in the global market.

Based on the analysis of freight transportation volumes over the recent period, the main trends and factors affecting them were identified. In particular, the growth in rail freight transportation is largely due to the expansion of the sea corridor through the Danube ports. This has made it possible to export Ukrainian products to Europe and other regions of the world, which has stimulated growth in demand for rail transportation. Due to the expansion of the maritime corridor and the change in the geopolitical situation, the share of export cargo transported by rail has increased significantly. These are primarily grain, oilseeds, metallurgical products and chemicals.

Induced analyzes scientific research related to the issues of improving the efficiency of mass cargo transportation by rail. Such important problems as the problem of timely provision of loading resources, delays in transportation, inefficient use of empty vehicles, loss of cargo during transportation, etc. are considered. Ways to solve these problems, which are considered in the works of scientists, include infrastructure modernization, introduction of new technologies and optimization of logistics processes.

The question was raised the issue of the efficiency of using container and containerized transportation technology. Their advantages, such as reduction of time and costs for transportation, environmental friendliness, are shown, and their disadvantages are considered.

The mathematical model of the movement of a container train is analyzed and the feasibility of creating dry port-type structures for optimizing the transportation of mass cargo is investigated.

These researches point to the need for a systematic approach to improving the efficiency of mass freight transportation by rail, taking into account various aspects, including technological, infrastructural, logistical and organizational aspects. Such an approach will allow achieving a higher level of efficiency and competitiveness of rail transport in the transportation of mass cargo.

Proposed measures for improve the efficiency of mass cargo transportation by rail: optimization of routes, increasing energy efficiency and carrying capacity of railcars, modernization of infrastructure, use of the latest technologies, optimization of loading and unloading, and improvement of safety and quality of service.

Keywords: cargo flows, sender routes, piggyback, mass cargo, optimization, «dry port».

Вступ. Перевезення масових вантажів (МВ) відіграють важливу роль не тільки для залізниці, а й економіки України в цілому. Збройна агресія змінила транспортну систему України. В умовах воєнного стану налагоджені ланцюги поставок перестали функціонувати. Через блокування морських портів України вантажовідправники та

перевізники змушені змінювати логістику експортних перевезень, переправляючи вантажі на західні прикордонні переходи [17].

Проаналізувавши обсяги залізничних вантажних перевезень в Україні за 2022 рік (рис. 1), спостерігаємо значне скорочення на 52,1 % порівняно з 2021 роком. Блокування морських портів, зупинка мариупольського

комбінату ім. Ілліча, ПрАТ «Азовсталь», ПАТ «Запоріжсталь», частково ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», консервація виробництва ключових українських сталеплавильних компаній у Маріуполі, Запоріжжі, Кривому Розі, втрата низки шахт на тимчасово окупованих територіях, заморожування великої кількості об'єктів будівництва, звуження

попиту на зовнішніх ринках, удари по енергетичній і залізничній інфраструктурам, зростання вартості залізничних перевезень, обмеженість пропускної спроможності залізничних переходів на кордоні, складні митні формальності, проблеми щодо різної ширини колій і вагонів – головні причини, які фактично зупинили експорт.

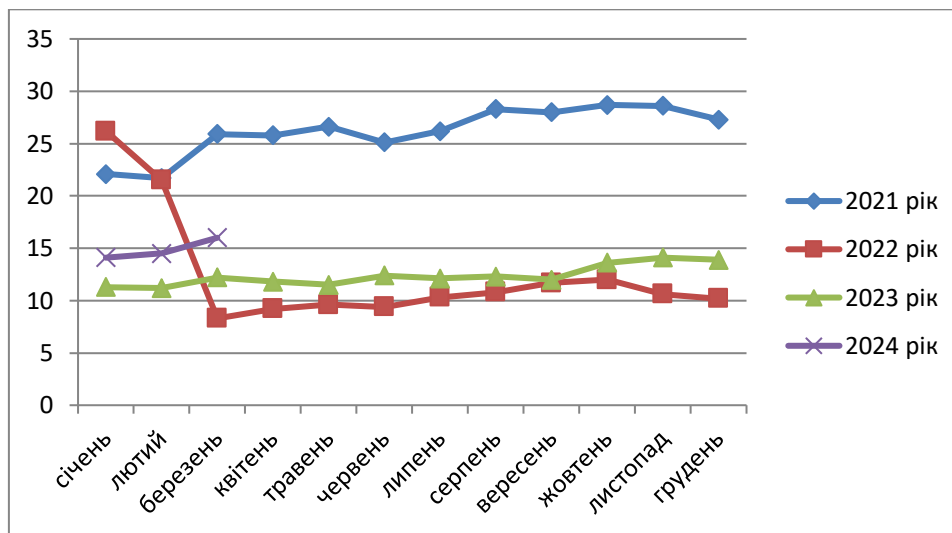


Рис. 1. Перевезення вантажів залізницею за 2021 – березень 2024 роки, млн т

У 2023 році Укрзалізницею було перевезено 148,4 млн т вантажів, що на 1,4 % менше, ніж у 2022 році. Вихід із «зернової угоди», збільшення черг на перевезення товарів залізницею, масовані обстріли інфраструктури портів Одеси та річкових портів Дунаю, протести польських перевізників на кордоні значно ускладнили ситуацію, проте вже в серпні запрацював морський коридор, який відіграв важливу роль у збільшенні вантажних перевезень. Динаміка загальних перевезень вантажів у 2023 році була такою: на 30 % збільшилося перевезення будівельних матеріалів і на 6 % зернових вантажів, зменшилося – на 13 % залізної руди, 11 % вугілля та 11 % чорних металів. У 2023 році через морські порти було перевезено 22,3 млн т вантажів, а через сухопутні переходи – 34,4 млн т [11]. За підсумками 2023 року, у воєнних умовах

портами України перевантажено близько 62 млн т вантажів. Найдинамічніше збільшення перевалки спостерігалось в дунайських портах «Ізмаїл», «Рені» та «Усть-Дунайськ». Значну частину в структурі дунайської перевалки займали зернові вантажі – 62,5 %, перевалка залізної руди склала 1,9 млн т. У листопаді-грудні 2023 року було зафіксовано рекордний місячний обсяг навантаження всіх видів вантажів у напрямку портів – понад 3,5 млн т на місяць.

За даними АТ «Укрзалізниця», у січні 2024 року перевезено 14,13 млн т вантажів. З розширенням роботи морського коридору відбулося збільшення експорту. У структурі експортних вантажів на першому місці зернові вантажі, другому – руда залізна і марганцева, третьому – чорні метали. За лютий перевезено 14,5 млн т вантажів, що є

рекордом з початку повномасштабного вторгнення в Україну. У березні ця цифра склала 16 млн т вантажів у всіх видах сполучень. Вагонопотік із зерновими вантажами переорієнтувався з західних кордонів на морські порти Великої Одеси. Проте постійні повітряні тривоги та удари по енергетичній інфраструктурі заважають збільшенню вивантаження в портах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У різні роки питаннями розвитку перевезень займалися такі науковці: Т. В. Бутько, М. І. Данько, Ю. В. Дьомін, О. В. Лаврухін, Д. В. Ломотько, Г. М. Кірпа, Д. М. Козаченко, Н. А. Нефедов, Н. В. Пономарьова, Б. Н. Стрекалов, Ю. О. Сілантьєва, Т. В. Харченко. Перевезення вантажів із використанням контрейлерних технологій досліджували такі вчені, як Е. М. Воевудський, А. І. Воркут, В. К. Мироненко, Є. В. Нагорний, М. Я. Постаєв, Н. В. Правдін та ін.

Аналіз наукових робіт показав, що організацією та оптимізацією роботи і взаємодії виробничих і транспортних систем, зокрема, було розглянуто Б. Ф. Брагіним, Г. П. Гріневичем, А. О. Сміховим, В. К. Мироненко тощо. Питання удосконалення організації роботи залізничного транспорту знайшли відображення в наукових працях Є. С. Альошинського, В. М. Акулінічева, М. І. Данька, Н. Д. Іловайського, Ю. Н. Кожевникова та інших; управління технологією вантажної та комерційної роботи — В. М. Запари, В. В. Повороженка, А. М. Котенка, А. О. Ковальова, Г. В. Ферапонтова та ін.

Проблемні питання щодо економічної ефективності, якості та удосконалення вантажних перевезень залізничним транспортом розглянуто в роботах П. В. Бежа, М. І. Данька, М. В. Макаренка, Л. О. Позднякової та ін. [3, 9, 16, 20].

Мета дослідження. Метою статті є огляд і аналіз запропонованих вченими підходів для підвищення ефективності перевезень МВ залізничним транспортом.

Основна частина. Важливі проблеми, пов'язані з перевезенням МВ, розглянуто в дослідженні А. Л. Обухової [12].

Основними проблемами під час перевезення навалювальних вантажів є:

- 1) економічна недосконалість маршрутних перевезень;
- 2) неефективне використання порожніх транспортних засобів;
- 3) безпека перевезень сипких вантажів у прямому та міждержавному сполученні;
- 4) затримки залізничного транспорту вантажовідправниками (вантажоодержувачами).

Однією з переваг перевезень навалювальних вантажів є можливість формування маршрутних перевезень. Однак воно має як переваги, так і недоліки. Окремим недоліком маршрутизації при перевезенні МВ є неефективне використання парку порожніх вагонів.

А. В. Кулешов [7] у своїй роботі знаходить вирішення цієї проблеми в переході на інформатизацію порожніх вагонів, завантажуваних із моменту надходження з портів, міждержавних релейних станцій і станцій масового вивантаження, а також вантажних перевезень — це дасть змогу підвищити достовірність опрацювання даних про перевезення транспортних засобів на мережі залізниць.

Також актуальною проблемою в перевезеннях МВ є завдання своєчасного забезпечення перевізників, власників рухомого складу навантажувальними ресурсами. А. В. Кулешов [7] для розв'язання проблеми своєчасного забезпечення навантажувальними ресурсами перевізників-власників рухомого складу подає її у вигляді математичної моделі на прикладі задачі комівояжера. Проблему комівояжера подає у вигляді моделі на графі. Вершини графа — вантажні станції, а ребра між вершинами — сполучення. Кожному ребру відповідає вага (відстань між станціями, тривалість або вартість перевезення). Метою задачі є пошук найкоротшого або економічно

доцільного маршруту. Однак застосування цієї задачі може мати низку недоліків:

- динамічність і невизначеність: ситуація з навантажувальними ресурсами на залізничному транспорті може змінюватися в реальному часі. Задача комівояжера зазвичай розглядає статичний набір точок і не враховує таку динамічність;

- урахування додаткових обмежень: крім найкоротшого маршруту, під час планування перевезень залізничним транспортом можуть існувати й інші обмеження, як-от місткість вагонів, наявність певних типів рухомого складу, вимоги до завантаження і розвантаження тощо. Урахування цих обмежень у задачі комівояжера може бути складним;

- незастосовність для великих обсягів даних: задача комівояжера може стати обчислювально складною за великої кількості точок або навантажувальних ресурсів, що може призвести до неефективності алгоритму.

X. Feng, R. Song, W. Yin, X. Yin, R. Zhang [21] розглянули переваги та виклики за використання технології контейнерних перевезень з точки зору вартості, економії часу, скорочення викидів забруднюючих речовин і вподобань клієнтів. Запропоновано модель лінійного програмування зі змішаним цілим числом

для отримання оптимального плану перевезень, що враховує контейнеризацію.

Проведено чисельні експерименти на основі мультимодальної транспортної мережі річки Янцзи в Китаї, щоб обговорити ефективність мультимодальних перевезень із урахуванням технології контейнеризації. Результати показали, що контейнерні перевезення можуть зменшити загальні транспортні витрати логістичних компаній за певних конфігурацій параметрів.

Г. С. Пащенко та Ю. В. Шульдінер у своїй роботі [14] запропонували підвищити ефективність перевезення МВ за допомогою контейнерних перевезень. Зазначено, що доцільно використовувати саме контрейлери – спеціальні контейнери, встановлені на автомобільні колеса, при організації контейнерних перевезень через кордон.

Нині в Україні та закордоном виконують ряд досліджень, пов'язаних з організацією контрейлерних перевезень: розроблення спеціального рухомого складу і термінальних технологій, проходження митних кордонів [6].

О. І. Петренко та О. І. Горбенко у своїй роботі [15], проаналізувавши значну частину джерел [5, с. 12; 8; 10, с. 140—142; 18], сформували переваги і недоліки контрейлерних перевезень, подані в таблиці.

Таблиця

Переваги і недоліки контрейлерних перевезень

Переваги	Недоліки
Висока швидкість завдяки використанню безвагонної технології.	Відсутність законодавчої бази в секторі контейнерних перевезень.
Менше часу витрачено на митні та прикордонні формальності.	Низька ефективність, маневреність і нижча швидкість порівняно з автомобільним транспортом.
Висока безпека, фіксовані тарифи, короткий час транспортування.	Зменшення використання вагонів для перевезення автомобілів.
Екологічність.	Залучення додаткових інвестицій для розвитку та виробництва перевантажувальних терміналів і спеціалізованих транспортних засобів.
Економія палива.	Відмінності між європейськими та українськими нормами щодо габаритів вантажів.
Доступні транспортні витрати.	Покращення умов перевезень для водіїв
Прийнятність для перевезень у важкодоступні райони.	
Захист вантажів під час транспортування.	
Зниження ймовірності дорожньо-транспортних пригод	

А. М. Котенко, П. С. Шилаєв і А. В. Світлична у своєму дослідженні [5] пропонують розраховувати економічну доцільність контрейлерних перевезень як вартість перевантажувальних операцій на станціях відправлення та прибуття, порівнюючи з вартістю перевезення «власної ваги» (контрейлер у вантажному модулі, два «класи» для проїзду водіїв та іншого персоналу в автомобілях).

Витрати на транспортування власної ваги – це сума таких витрат:

- витрати, пов'язані з паркуванням, обробкою і транспортуванням транспортних засобів;
- витрати, пов'язані з паркуванням та охороною транспортних засобів на терміналі;
- технічне обслуговування спеціальних транспортних засобів;
- безпека контрейлерних поїздів на всіх маршрутах;
- роботи, пов'язані з транспортуванням і обслуговуванням стаціонарного обладнання на залізниці;
- обслуговування контрейлерних поїздів на технічних станціях;
- платежі за експлуатацію поїзних локомотивів.

Для визначення вартості перевезення дедвейту залізницею розраховують відношення дедвейту до загальної ваги в контрейлері, використовуване в наведених вище розрахунках вартості.

Проте методика не враховує всі супутні витрати, пов'язані з контрейлерними перевезеннями, такі як:

- амортизація контрейлерів і вантажних модулів;
- витрати на ремонт та обслуговування контрейлерів;
- оплата за користування терміналами;
- страхування;
- митні збори (якщо є).

Це може призвести до заниження реальної вартості контрейлерних перевезень і зробити їх штучно більш привабливими, ніж вони є насправді.

Математична модель руху контрейлерного поїзда у вигляді графа станів подана на рис. 2. Ця модель у вигляді графа станів і диференціальних рівнянь дає можливість визначити оптимальні режими руху на шляху прямування і терміналах вантажних станцій. На жаль, модель не повністю враховує можливі стани системи, тому може бути застосована тільки для попереднього оцінювання ефективності технології контрейлерних перевезень.

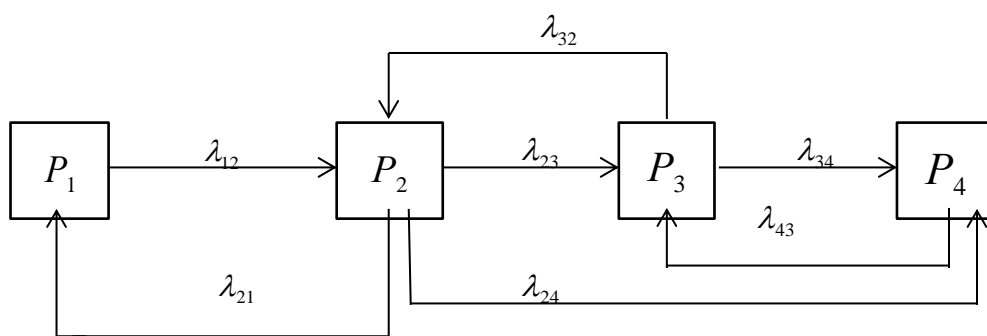


Рис. 2. Граф станів контрейлерного поїзда:

P_1 – під вантажними операціями; P_2 – на шляху прямування;
 P_3 – на технічних станціях; P_4 – на передавальних станціях

Система диференціальних рівнянь Колмогорова для графа (рис. 2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{21}P_2; \\ \frac{dP_2}{dt} &= -\lambda_{23}P_2 - \lambda_{24}P_2 - \lambda_{21}P_2 + \lambda_{32}P_3 + \lambda_{12}P_1; \\ \frac{dP_3}{dt} &= -\lambda_{34}P_3 - \lambda_{32}P_3 + \lambda_{23}P_2 + \lambda_{43}P_4; \\ \frac{dP_4}{dt} &= \lambda_{34}P_3 - \lambda_{43}P_4 \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Ефективності контейнерних перевезень досягають за рахунок скорочення кількості оборотів платформ, порожніх пробігів вагонів і локомотивів, економії експлуатаційних витрат, пов'язаних з організацією руху поїздів, а також підвищення надійності та оперативності транспортних послуг.

Незважаючи на своє унікальне та вигідне транспортно-географічне положення, яке має великий потенціал для розвитку торговельних і транспортних мереж, Україна не повною мірою використовує контейнерні перевезення попри їхні значні переваги. Відсутність відповідних платформ [13, с. 99], низький рівень взаємодії між різними видами транспорту, поганий стан транспортних засобів, відмінності в сервісній інфраструктурі та технічних вимогах в Україні та ЄС, складність митних процедур, відсутність прикордонних пунктів пропуску, нестабільність транспортної митниці, дозвільної системи, системи страхування, квотування та управління є основними причинами цих відмінностей [10, с. 145].

Серед науковців багато років відбувається дискусія з приводу найкращої технології перевезень вантажів за участі залізниць, яку слід використовувати в Україні.

Через повномасштабну війну та блокування традиційних логістичних шляхів, у тому числі морських, з'явилася гостра потреба в новій інфраструктурі, яка могла б підтримувати економіку держави, забезпечуючи експорт та імпорт товарів. Цією альтернативою може стати будівництво нових «сухих портів» на території України.

Сухий порт – це мультимодальний логістичний центр з інфраструктурою, що дає змогу власнику вантажу користуватися всіма перевагами морського порту, але на суші.

Т. Ю. Калашникова, Т. О. Костиркіна у своїй роботі [4] провели аналіз вантажопотоків для вузла Х. Було визначено, що через нього проходить велика кількість вантажів, для яких є доцільним функціонування «сухого порту». Найбільш поширеними МВ є будівельні матеріали, цемент, машини та обладнання, кокс, нафта і нафтопродукти, чорні метали та їхній лом, вантажі в контейнерах.

Зазначено, що для МВ (будівельні вантажі, чорні метали та їхній брухт, цемент, кам'яне вугілля, промисловий сирець) рекомендовано розглянути можливість використання «сухого порту» з розробленням єдиної технології взаємодії з вантажною станцією за допомогою

програмного забезпечення та інформаційної підтримки [4].

З такими терміналами має покращитися логістика та знизитися ціни на вантажні перевезення. Проте для ефективного функціонування мультимодальних логістичних центрів потрібно:

- дати визначення на законодавчому рівні терміна «сухий порт»;

- реформування митної системи України відповідно до європейських стандартів;

- залучення великих інвесторів, у тому числі і державу як основного інвестора для будівництва нових сучасних логістичних комплексів, оскільки вартість інфраструктури дуже велика;

- автоматизація та впровадження цифрових технологій у прийманні, зберіганні та обробці вантажів в «сухих портах»;

- обов'язкове використання сучасних методів транспортної логістики;

- розглянути питання впровадження приватної тяги в мережі УЗ між морськими терміналами і «сухими портами» [2].

У зв'язку з переходом на прямі договірні умови доставлення вантажів постачальники і споживачі змінюють свої вимоги до умов доставлення, їхніх кількісних і часових параметрів, що зумовлює необхідність удосконалення системи організації транспортних потоків.

У своїй дисертації Н. Ю. Шраменко (Черниш) [19] розробила концепцію вибору раціональних параметрів функціонування виробничо-транспортних систем. Розглянуто питання дослідження та розроблення підходів до формування функціональних моделей маршрутів вантажопотоків при перевезенні навалювальних вантажів за маршрутами. Запропоновано критерії встановлення диференційованих тарифів на залізничні перевезення. Проте впровадження та адміністрування диференційованої системи тарифів може бути складним і витратним завданням. Це пов'язано з необхідністю збирати і аналізувати великі обсяги даних

про вантажопотоки, конкурентне середовище та інші фактори, що впливають на ціноутворення.

Також було проаналізовано вплив параметрів маршрутів вантажних перевезень на їхню ефективність та економічну результативність. Подано практичні рекомендації зі зниження сукупних економічних витрат. Удосконалено комплексний підхід до системи організації транспортних потоків від постачальника до споживача та розроблено загальну математичну модель функціонування виробничо-транспортного ланцюга для перевезення навалювальних вантажів на основі критеріїв витрат окремих його ланок [19].

В Україні перевезення МВ здійснюють переважно власними вагонами. Вантажовідправники не дуже зацікавлені в маршрутизації перевезень. Запропоновано використати досвід інших країн у цьому питанні. Цю проблему там вирішують шляхом економічного стимулювання вантажовідправників. Вартість перевезень наближають до собівартості, що призводить в свою чергу до зниження транспортних витрат і залучення нових інвестицій у розвиток інфраструктури, а також закріплення за залізницею вантажовідправників [1].

Без впровадження інновацій і передових комп'ютерних технологій неможливий ефективний розвиток залізничного транспорту. Щоб поліпшити ефективність перевезень масових вантажів залізничним транспортом, можна вжити кілька заходів:

1. Оптимізація маршрутів: використання аналітики і технологій для визначення найефективніших маршрутів доставлення з урахуванням відстаней, часу в дорозі, структури вантажів та інших факторів.

2. Впровадження нових технологій: використання сучасних залізничних технологій, системи автоматизованого управління поїздами, дистанційного моніторингу стану інфраструктури та поїздів, а також системи попередження про можливі проблеми. Автоматизація дає змогу

також збільшити пропускну спроможність інфраструктури.

3. Поліпшення інфраструктури: інвестування в модернізацію і розширення залізничної інфраструктури, включно з будівництвом нових колій, ремонтом і оновленням наявних трас, а також поліпшенням систем сигналізації та безпеки.

4. Додаткові тонни: підвищення вантажопідйомності вагонів, використання зчленованих або багатовісних вагонів, підвищення потужності локомотивів.

5. Енергоефективність: експлуатація акумуляторних або гібридних маневрових локомотивів.

6. Оптимізація завантаження і розвантаження: розроблення ефективних методів і технологій для швидкого завантаження і розвантаження вантажних вагонів, мінімізуючи час простою і збільшуючи продуктивність перевезень.

7. Підвищення стандартів безпеки та якості обслуговування: забезпечення високих стандартів безпеки як для персоналу, так і вантажів, а також підвищення якості обслуговування клієнтів для поліпшення репутації та залучення нових замовників.

Висновки. У роботі проаналізовано основні напрями наукових досліджень стосовно питань підвищення ефективності перевезень МВ залізничним транспортом.

Дослідження наукової літератури дало змогу встановити, що перевезення МВ,

контейнерні та контрейлерні перевезення є важливою частиною в національній економіці та мають значний потенціал розвитку в бік створення автоматизованих систем управління та інтелектуалізації логістичної інфраструктури. Це дасть змогу підняти рівень інвестиційної привабливості інфраструктури, що розвивається, забезпечить статус України як транзитної держави, сприятиме інтеграції національної транспортної системи в міжнародну транспортну систему і реалізації національних стратегічних інтересів.

У процесі дослідження встановлено, що одним із найважливіших напрямів удосконалення системи організації вагонопотоків є відправницька маршрутизація, яка забезпечує прискорення доставлення вантажів споживачам, більш ефективне використання маневрових засобів, скорочення простоїв вагонів на технічних станціях, шляху прямування.

Перспективним, на нашу думку, для перевезення вантажів є створення структур типу «сухий порт». Це дасть ряд переваг, включаючи економічну ефективність, екологічність і підвищення пропускну спроможності. Завдяки використанню цифрових технологій, автоматизації та сучасній інфраструктурі «сухий порт» дасть змогу оптимізувати управління вантажними потоками, скоротити витрати і підвищити ефективність логістичних мереж.

Список використаних джерел

1. Верлан А. И. Совершенствование методов стимулирования отправительской маршрутизации на железнодорожном транспорте. *Наука та прогрес транспорту: Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2013. № 49. С. 75–85.
2. Воронков В. Чому сухі порти не стають локомотивами морської галузі? *Голос України*. URL: <http://www.golos.com.ua/article/341199> (дата звернення 17.02.2024).
3. Данько Н. И., Балака Е. И., Семенцова Е. В. Концепция похода к реформированию железнодорожного транспорта. *Залізничний транспорт України: наук.-практ. журнал*. 2011. № 5. С. 45–50.
4. Калашнікова Т., Костиркіна Т. Тенденції розвитку «сухого порту» у межах вузла Х. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2008. Т. 3, № 3(33). С. 40–42.
5. Котенко А. М. Визначення доцільності та моделювання контрейлерних перевезень. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. Вип. 137. С. 11–17.

6. Котенко А., Шилаєва П., Світлична А. Підвищення ефективності контрейлерних перевезень вантажів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2012. № 33. С. 87–95.
7. Кулешов А. В. Удосконалення інформаційного забезпечення розв'язання задачі моделювання маршрутних перевезень масових вантажів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. Вип. 137. С. 122–129.
8. Курган М. Досвід експлуатації контрейлерних поїздів у внутрішньому та міжнародному сполученні. *Українська залізниця*. 2016. № 12(42). С. 49–53.
9. Макаренко М. В., Цветов Ю. М. Проблеми та основні напрямки реформування залізничного транспорту України. Київ: КУЕТТ, 2007. 222 с.
10. Маров І. Реалізація транзитного потенціалу в системі стратегічного розвитку України: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.03. Донецьк, 2014. 217 с.
11. Місячний економічний моніторинг України. *Інститут економічних досліджень та політичних консультацій*. 2024. № 228. С. 4.
12. Обухова А. Л. Аналіз основних проблем при перевезенні масових вантажів залізничним транспортом. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2015. Вип. 152. С. 45–49.
13. Огороков А. Аналіз перспектив розвитку ринку контрейлерних перевезень в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень: Збірник наукових праць НДУЗТ імені академіка В. Лазаряна*. 2015. № 10. С. 98–104.
14. Пашенко Г. С., Шульдінер Ю. Перевезення вантажів у контейнерах за умов військового стану та блокування морських портів України. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика: матеріали 18-ї науково-практ. міжнар. конф., м. Харків, 2–3 берез. 2022 р.* Харків, 2022. С. 97–98.
15. Петренко О., Горбенко О. Контрейлерні перевезення як інструмент розвитку інтегрованих транспортних систем. *Економіка та держава*. 2017. № 5. С. 73.
16. Позднякова Л. О., Гриценко Н. В. Теоретичне обґрунтування доцільності реструктуризації структури управління залізничним транспортом України. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2008. № 24. С. 34–36.
17. Проект плану відновлення України. *Матеріали робочої групи «Відновлення та розбудова архітектури»*. Київ, 2022. С. 3–6.
18. Репіч Т. Проблеми та перспективи розвитку контрейлерних перевезень в Україні. *Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та переробної галузей АПК: Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 22–23 лист. 2012 р.* Київ: НУХТ, 2012. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/9350>.
19. Черниш Н. Ю. Вибір раціональних параметрів каналів вантажопотоків при удосконаленні маршрутних способів перевезення масових вантажів залізничним транспортом: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Харків, 2001. 21 с.
20. Шляхи підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту в сучасних умовах / П. В. Бех та ін. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2015. № 59. С. 25–36.
21. Multimodal transportation network with cargo containerization technology: Advantages and challenges / X. Feng et al. *Transport Policy*. 2023. Vol. 132. P. 128–143.

Кудряшов Дмитро Вікторович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0562-9681. Тел.: +38 (095) 601-76-18.

E-mail: kudriashov_dmytro@ukr.net.

Кудряшова Наталія Сергіївна, АТ «Укрзалізниця». ORCID iD: 0009-0005-3561-9588. Тел.: +38 (050) 161-61-89.

E-mail: nataliia_kudriashova@ukr.net.

Kudriashov Dmytro, postgraduate student, department of transport systems and logistics Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0562-9681. Тел.: +38 (095) 601-76-18.

E-mail: kudriashov_dmytro@ukr.net.

Kudriashova Nataliia, JSC «Ukrzaliznytsia». ORCID iD: 0009-0005-3561-9588. Тел.: +38 (050) 161-61-89.

E-mail: nataliia_kudriashova@ukr.net.

Статтю прийнято 25.04.2024 р.

УДК 629.4.083.:629.463

ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ФОРМУВАННІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ НА ВАГОНОРЕМОНТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Кандидати техн. наук Д. І. Волошин, Л. В. Волошина,
магістрант, асп. О. І. Плескач

DECISION-MAKING SUPPORT TECHNOLOGIES IN THE FORMATION OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS AT VEHICLE REPAIR ENTERPRISES

PhD (Tech.) D. Voloshyn, PhD (Tech.) L. Voloshyna,
master, postgraduate student O. Pleskach

***Анотація.** Розповсюдження стандарту ISO 9001 базовано на тому, що в ньому містяться узагальнені вимоги до організації контролю якості продукції, які можуть бути використані на підприємствах, що значно відрізняються як за спеціалізацією, так і масштабом виробництва (депо або вагоноремонтні заводи). Для того щоб поставити всіх учасників ринку – операторів залізниць, виробників, ремонтників рухомого складу і постачальників – у взаємовигідні умови, був розроблений єдиний Міжнародний стандарт залізничної промисловості ISO/TS 22163 International Railway Industry Standart. Для ефективного використання інструментів забезпечення якості ремонту вагонів необхідним вважають використання сучасних систем підтримки прийняття управлінських рішень. Вони дають змогу в реальному часі здійснювати моніторинг виробничих процесів. Можливим є використання методу нечітких множин для удосконалення систем управління якістю ремонту вагонів на підставі розроблення окремих алгоритмів управління з таблицями рішень.*

***Ключові слова:** виробнича система, управління якістю, системи підтримки рішень, ремонт вагонів.*

***Abstract.** In recent years, the strategy of creating a safely functioning and efficient transport complex of Ukraine integrated into the world transport network has been fixed. Therefore, the creation of a progressive system of product quality management in the conditions of car repair enterprises is considered an urgent scientific and technical task. The quality management system is a management subsystem of an industrial enterprise. Modern production systems are based on TQM principles and widely use ISO 9001 certification. At the same time, certification is based on independent third-party audits (a conformity assessment organization). The wide spread of the standard is based on the fact that it contains generalized requirements (principles) for the organization of product quality control, which can be used at enterprises that differ significantly both*

in terms of specialization and the scale of production (depots or car repair plants). But this is the «bottleneck» of the standard – the lack of consideration of specialized production conditions makes it impossible to compensate for critical factors affecting the final quality of products. Currently, the accepted approaches to quality assessment do not fully take into account the factors that affect the final quality of products. In order to put all market participants - railway operators, manufacturers, rolling stock repairers and suppliers in mutually beneficial conditions, a single International Railway Industry Standard ISO / TS 22163 International Railway Industry Standard (IRIS) was developed. For the effective use of tools for ensuring the quality of rail car repair, it is considered necessary to use modern management decision support systems. They will allow real-time monitoring of production processes. It is possible to use the method of fuzzy sets to improve the quality management systems of wagon repairs based on the development of separate control algorithms with decision tables. In order to meet the requirements of international quality standards, it is necessary to significantly modernize management approaches based on the creation of progressive decision support systems.

Keywords: *production system, quality management, decision support systems, wagon repair.*

Вступ. Рівень розвитку систем якості продукції на залізничних підприємствах є індикатором загального стану виробничих систем і процесів функціонування на всіх етапах створення готової продукції. Як показує накопичений досвід за попередні роки, за економічного підйому в галузі спостерігають підвищення вимог до якості продукції, за спаду – їх нівелювання та розсіювання. Зрозуміло, що такі постійні коливання порушують еволюцію систем якості в часі та не відповідають потребам залізничного транспорту.

Останніми роками була зафіксована стратегія створення інтегрованого до світової транспортної мережі транспортного комплексу України, що безпечно функціонує і є ефективним [1]. Її втілення потребує змін сучасних процедур оцінювання якості продукції залізничного транспорту і механізмів формування систем якості у виробничих системах. Тому актуальним науково-технічним завданням вважають створення прогресивної системи управління якістю продукції в умовах вагоноремонтних підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки проблемам забезпечення якості продукції були присвячені роботи У. Шухарта, К. Ісікави, Д. Уїллера, Г. Тагуті, Е. В. Білецького, В. Л. Диканя [2, 3], Д. А. Янушкевича,

З. Р. Шайхлісамова, Л. А. Тимофєєвої [4], Н. В. Якименко, І. А. Чекмасової, Н. Є. Калічевої, І. В. Шевченка і багатьох інших [5-8].

Постановка завдання. Розглянути основні підходи до формування сучасної системи якості продукції на вагоноремонтних підприємствах з урахуванням особливостей функціонування виробничих систем.

Викладення основного матеріалу статті. Система менеджменту якості є підсистемою управління промисловим підприємством. Сучасні виробничі системи базуються на принципах TQM і широко застосовують сертифікацію за ISO 9001. При цьому сертифікація заснована на проведенні незалежних аудитів третьою стороною (органом з оцінювання відповідності).

ISO 9001 – це стандарт, що входить до серії міжнародних стандартів ISO 9000 і містить вимоги до систем управління якістю на підприємствах і в організаціях. В Україні прийнято ідентичні стандартові ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) і ДСТУ EN ISO 9001:2018. Системи управління якістю. Вимоги (EN ISO 9001:2015, IDT; ISO 9001:2015, IDT).

Велике розповсюдження стандарту базується на тому, що в ньому містяться

узагальнені вимоги (принципи) до організації контролю якості продукції, які можуть бути використані на підприємствах, що значно відрізняються як за спеціалізацією, так і масштабом виробництва (депо або вагоноремонтні заводи). Але в цьому і «вузьке місце» стандарту – відсутність урахування спеціалізованих виробничих умов не дає можливості компенсації критичних факторів впливу на кінцеву якість продукції.

За останні роки суб'єкти залізничної галузі різних держав висували претензії як щодо якості матеріалів і запчастин, що

поставляють на підприємства, так і прозорості процедур сертифікації продукції. Для того щоб поставити всіх учасників ринку – операторів залізниць, виробників, ремонтників рухомого складу і постачальників – у взаємовигідні умови, був розроблений єдиний міжнародний стандарт – International Railway Industry Standard (IRIS) [9].

Головна відмінність стандарту IRIS від стандартів серії ISO полягає в тому, що IRIS є вузькоспеціалізованим стандартом для підприємств залізничної промисловості (рис. 1).

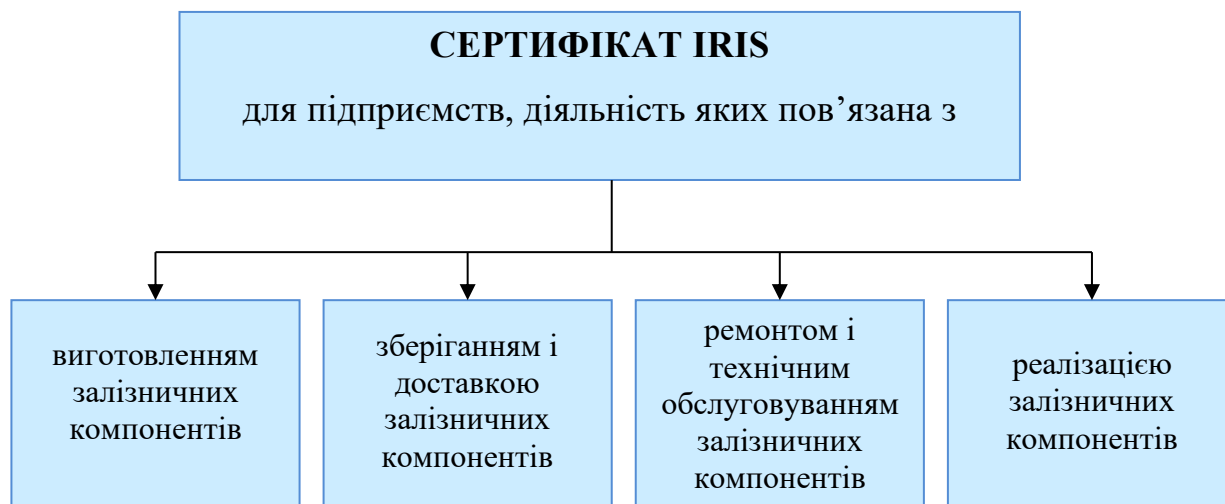


Рис. 1. Сертифікат IRIS для підприємств залізничної галузі

Відомо, що якість готової продукції переважно залежить від рівня організації (управління) виробничих процесів, при цьому такий показник наближається до 90 % загальної кількості факторів впливу. За впровадження стандарту IRIS велику увагу приділяють підготовчим процесам виробничої системи, при яких застосовано окремі методи виробничої логістики. Наприклад, за проведення первинного аудиту виробництва рекомендовано використання системи «5S», яка дає змогу видалити надмірності та забезпечити раціональне використання ресурсів у

технологічних процесах ремонту. Використання системи «TPM» дає змогу оптимізувати роботу ремонтного господарства, підвищити надійність технологічного обладнання та значно знизити матеріальні втрати.

Впровадження та подальше використання зазначених інструментів для підвищення якості потребує наявності прогресивної системи моніторингу та контролю виробничих процесів при ремонті вагонів. Приклад такої моделі управління вагоноремонтним підприємством подано на рис. 2.

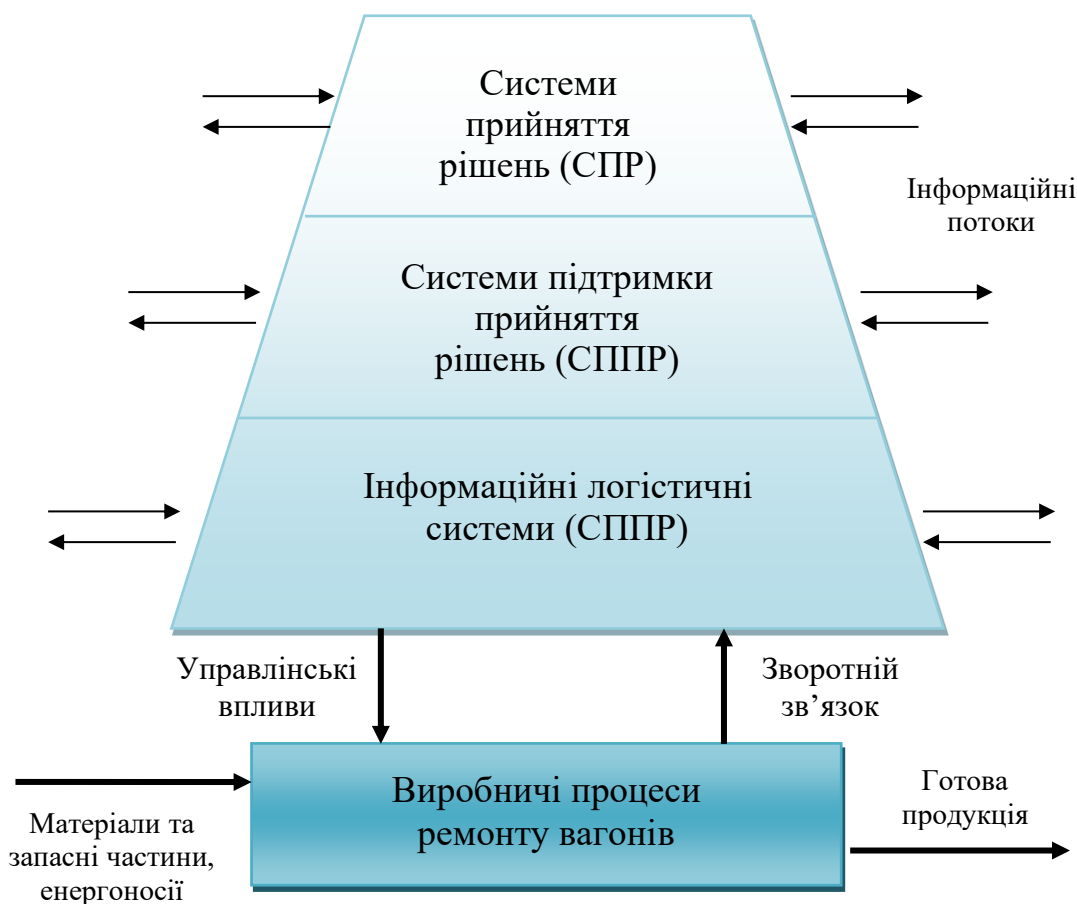


Рис. 2. Теоретична модель управління вагоноремонтним підприємством

На верхньому рівні управління знаходяться керівники підприємства, які об'єднані разом з об'єктом управління в організаційну структуру управління, генерують відповідні управлінські рішення і створюють систему прийняття рішень (СПР).

На середньому рівні знаходиться система підтримки прийняття рішень (СППР). Моделі, закладені в СППР, виконують різні виробничі розрахунки, оцінюють стан системи, генерують варіанти можливих виробничих рішень і прогнозують їхні наслідки.

На нижньому рівні показані системи збору, обробки, збереження, передавання і подання інформації. Ці системи являють собою інформаційну модель підприємства.

Уся система управління функціонує за допомогою інформаційних потоків, які створюють необхідний обмін інформацією між внутрішніми об'єктами одного рівня, а також між внутрішніми і зовнішніми об'єктами [10].

Слід зазначити, що вузьким місцем сучасних підприємств є середній рівень управління. Відповідні системи підтримки прийняття управлінських рішень в експлуатації практично не реалізовані.

За прийняття рішень необхідно використовувати формальні методи оцінювання їхньої оптимальності на підставі математичного апарату.

Фахівець, який приймає рішення, повинен здійснити вибір із кінцевої

множини альтернатив $A = \{a/i = 1, \dots, n\}$. При цьому наслідки вибору кожної альтернативи створюють відповідну множину майбутніх станів $Q = \{q/i = 1, \dots, n\}$. Вибір альтернативи a_i для стану q_i є наслідком c_{ij} , який знаходиться у відповідному просторі S . При цьому зв'язуються стани об'єкта, альтернатива вибору (рішення) і наслідки прийнятого рішення. Цей зв'язок має такий аналітичний вигляд:

$$A \cdot Q \rightarrow C. \quad (1)$$

При введенні двох функцій:

- суб'єктивної імовірності $P(*)$, яка відображує уявлення фахівця про можливі або правдоподібні стани виробничих процесів;
- корисності $U(*)$, що є перевагою фахівця, можливі альтернативи рішень ранжуються за таким правилом:

$$U(a_i) = \sum_j P(q_i) U(c_{ij}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Функцію $U(*)$ можна використовувати як функцію належності нечіткій множині. Далі можливим є використання методу нечітких множин для удосконалення систем управління якістю ремонту вагонів на підставі розроблення окремих алгоритмів управління з таблицями рішень [11].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Подальше підвищення якості кінцевої продукції в умовах вагоноремонтних підприємств є необхідним напрямом розвитку виробничих систем. Для відповідності вимогам міжнародних стандартів якості необхідно значно модернізувати управлінські підходи на підставі створення прогресивних систем підтримки рішень.

Список використаних джерел

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. Офіційний вісник України. Вид. офіційне. 2018 р. № 52 С. 533, ст. 1848, код акта 90720/2018.
2. Дикань В. Л., Панченко С. В. Тенденції та протиріччя розвитку залізничного транспорту в умовах становлення світової транспортно-логістичної системи. *Oxford Debate. EVA 2020*. All rights reserved. 2020. P. 144–151.
3. Dykan V., Ovchynnikova V., Kalicheva N., Korin M. Strategic Knowledge Management as Means of Ensuring the Competitiveness of Railway Transport Enterprises. *SHS Web of Conferences*. 2019. Vol. 67. P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196701003>.
4. Тимофеева Л. А. Фактори підвищення конкурентоспроможності продукції. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ (електронне видання)*. Харків, 2015. Вип. 11. С. 107–113.
5. Волошина Л. В., Строїн С. І. Підвищення ефективності управління якістю на підприємствах Укрзалізниці. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика: матеріали 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф.*, 04–05 жовтня 2022 р. Київ: АТМ України, 2022. С. 11–12.
6. Волошин Д. І., Волошина Л. В. Забезпечення підтримки управління логістичними системами вагоноремонтних підприємств. *Зб. матеріалів V Міжнар. конф. «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (29 листопада 2022 р., Дніпро, Україна)*. Електронне видання. Дніпро: Журфонд, 2022. С. 137–140.

7. Волошин Д. І., Волошина Л. В. Управління виробничими ризиками в технологічних системах вагоноремонтних підприємств. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України. Серія «Транспортні системи і технології»*. Київ: ДУІТ, 2022. Вип. 39. С. 22–29. DOI:10.32703/2617-9040-2022-39-3.
8. Волошин Д. І., Плескач І. І., Плескач О. І. Застосування прогресивних підходів до управління технологічною системою вагоноремонтних підприємств. *Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р.* Київ: АТМ України, 2024. С. 17–19.
9. ISO/TS 22163:2023 (International Railway Industry Standart) Railway applications — Railway quality management system — ISO 9001:2015 and specific requirements for application in the railway sector. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/79427.html>.
10. Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process. Decision Making for Strategic Decisions. De Felice, F. (Ed.). IntechOpen, 2016.
11. Mauris G., Lassere V., Foulley L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement. *Measurement*. 2001. № 29. С. 109–121.

Волошин Дмитро Ігорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4735-5207. Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: voloshin@kart.edu.ua.

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2039-111X. Тел.: (057)730-10-50. E-mail: vol@kart.edu.ua.

Плескач Олександр Ігорович, магістрант, група 222-ВВГ-Д22, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: pleskach1305@gmail.com.

Voloshin Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4735-5207. Tel.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: voloshin@kart.edu.ua.

Voloshyna Liudmyla, PhD (Tech), Senior Lecturer, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2039-111X. Tel.: +38 (057) 730-10-50. E-mail: vol@kart.edu.ua.

Pleskach Oleksandr, master, Group 222-BBG-D22, postgraduate student, department of wagons engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: pleskach1305@gmail.com.

Статтю прийнято 07.05.2024 р.

УДК 629.4.016.2

СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА

Д-р техн. наук О. М. Горобченко, асп. Д. О. Заїка

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING TRACTION AND ENERGY PERFORMANCE INDICATORS OF A MANEUVERING LOCOMOTIVE

Dr. Sc. (Tech.) O. Gorobchenko, postgraduate student D. Zaika

Анотація. У статті розроблено математичну модель із можливістю визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ за роботи на чотирьох і двох паралельно з'єднаних тягових електричних двигунах. Побудовано графіки залежності сили тяги від швидкості руху локомотива; залежності витраченого часу на подолання заданої відстані, залежності витрат палива на подолання заданої відстані; залежності перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму порівняно з шістьма паралельно з'єднаними тяговими електричними двигунами для третьої, четвертої, п'ятої позицій контролера машиніста, обравши однакоvu ділянку руху та вагу поїзда, з урахуванням обмежень за коефіцієнтом зчеплення коліс із рейками.

Ключові слова: ефективність експлуатації, математична модель, тягово-енергетичні показники, тепловоз, економія палива, керування локомотивом.

Abstract. Fuel consumption for traction significantly depends on the locomotive's operating mode, and by selecting a rational mode during station maneuvers or transit, it is possible to reduce fuel consumption. Previous works on this topic do not provide sufficient analysis of locomotive motion with varying numbers of connected engines. To optimize energy resource consumption, a combination of methods for the rational use of the locomotive is necessary. The traction and energy performance indicators for the maneuvering work of the ЧМЕЗ locomotive are calculated by performing traction calculations. In this paper, a mathematical model has been developed to determine these indicators when operating with 4 and 2 parallel-connected traction electric motors. Graphs were constructed to illustrate the relationship between traction force and locomotive speed, the time required to cover a given distance, fuel consumption for a specified distance, and the temperature rise above ambient conditions concerning 6 parallel-connected traction electric motors for the 3rd, 4th, and 5th positions of the engineer's controller. The locomotives were compared while covering the same stretch of track with the same train weight, considering wheel-rail adhesion constraints.

Analyzing the obtained dependencies allows the conclusion that using different configurations of connected engines can result in fuel savings of up to 15 % during maneuvering operations, depending on operational conditions. Furthermore, the engine temperature remains within acceptable limits for insulation class F, based on the results of approximating existing locomotive characteristics and deriving analytical expressions (6, 7, 8, 24). Mathematical models of the motion of the ЧМЕЗ locomotive were created for various engine connection scenarios using the obtained mathematical formulas (9, 10, 11, 13, 20, 21, 22, 23, 24).

Keywords: operational efficiency, mathematical model, traction and energy performance indicators, locomotive, fuel economy, locomotive control.

Вступ. Для ефективного використання локомотива застосовують багато методів удосконалення процесів керування локомотивом [1], у тому числі з використанням методів штучного інтелекту [2-4]. Для якісного керування локомотивом необхідно дослідити наявну базу методів тягових розрахунків. Тягові розрахунки є ключовим елементом у залізничному транспорті та являють собою одну з основних дій для організації залізничних робіт і їхнього проектування. Методологія тягових розрахунків містить різні методи і прийоми, що охоплюють визначення маси поїзда, обчислення швидкості та часу руху, оцінювання витрат палива та електроенергії для тяги, а також вирішення завдань, пов'язаних із гальмуванням. Ключовим напрямом у розвитку методів тягових розрахунків є комп'ютерне моделювання з використанням програмного коду, суть якого полягає в розробленні теоретичного підґрунтя для оптимізації витрат палива та енергії, моделюванні руху поїзда на визначеному шляху для виявлення потенційних резервів підвищення ефективності залізниць і раціонального використання рухомого складу [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для оптимізації витрат енергетичних ресурсів необхідно використовувати комплекс методів з раціонального використання локомотива. Багато фахівців присвятили свої праці дослідженню та удосконаленню тягових розрахунків локомотива, які саме в цих комплексах і відображуються. У роботі [6] висвітлено основні положення для тягових розрахунків промислового залізничного транспорту, особливості тягових розрахунків для вантажних поїздів на тепловозній тязі, розглянуто основний питомий опір руху поїзда, додаткові питомі опори руху, повний опір руху поїзда. Посібник [7] описує точність розрахунків, координати і довжини шляхів маневрового рейсу, методи розрахунку параметрів руху на заданому інтервалі шляху, шляху та часу руху

локомотива на заданому інтервалі, максимальної швидкості розгону в маневровому напіврейсі методом ітерації. У монографії [8] проведено аналіз математичної моделі руху, також розглянуто метод тягових розрахунків із використанням механіки Лагранжа. У статті [9] розглянуто питання підходів до проведення тягових розрахунків за допомогою автоматизованих комп'ютерних систем, встановлено основну методіку розрахунку для конкретних умов роботи з метою раціонального використання енергетичних ресурсів. У роботі [10] запропоновано математичну модель руху маневрового локомотива ЧМЕЗ для окремої ділянки руху. Аналіз закордонних статей [11, 12] відкриває сутність енергетичного моделювання залізничного транспорту. Симуляції сили тяги локомотива є фундаментальною складовою таких моделей. У цих роботах створено першу двовимірну модель локомотива (без деталізації контакту колесо-рейка) і більш удосконалену другу версію з повністю деталізованою моделлю контакту колесо-рейка. Авторами роботи [13] подано моделювання тягового електричного привода рухомого складу, за допомогою якого можна аналізувати стан навантаження привода локомотива. У статті [14] вирішено питання збільшення надійності та зменшення витрат палива шляхом використання мікропроцесорних систем у процесі керування локомотивом. У роботі [15] використано оптимізаційні розрахунки за допомогою створеної математичної моделі, яка відображує реальні умови роботи мотор-генераторної установки.

Попередні роботи, які стосуються цієї тематики, не дають змогу повною мірою виконати аналіз руху локомотива на різній кількості підключених ТЕД. Використовуючи сучасні дослідження методів тягових розрахунків і створення математичних моделей руху локомотива, у цій статті запропоновано розроблення нового підходу до тягового розрахунку маневрового локомотива ЧМЕЗ з

урахуванням можливості відключення паралельно з'єднаних ТЕД.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є створення математичних моделей тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ. Це дасть змогу провести аналіз роботи тепловоза на різних варіантах підключення ТЕД за рахунок побудови графіків залежності сили тяги від швидкості руху локомотива $F_k = f(v)$; витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{pr})$; кількості витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{pr})$; перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ порівняно зі штатним підключенням ТЕД. Поставлені завдання необхідно виконати для третьої, четвертої, п'ятої позицій контролера машиніста (найбільш застосовуваних для маневрової роботи) для однакової ділянки руху та маси поїзда з урахуванням обмежень за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати апроксимацію характеристик тепловоза;
- побудувати математичну модель руху локомотива;
- проаналізувати залежності $F_k = f(v)$, $t = f(S_{pr})$, $G_e = f(S_{pr})$, $T = f(I_d)$ для двох, чотирьох і шести ТЕД для однакової ділянки руху та ваги поїзда.

Основна частина дослідження.

Витрати палива на тягу суттєво залежать від режиму руху локомотива. Вибираючи раціональний режим руху на станції або перегоні, можна зменшити витрати палива. Для можливості розроблення системи керування автоматичним переведенням режиму роботи локомотива ЧМЕЗ необхідно виконати розрахунок моделі руху в штатному режимі та на частково відключеному ТЕД за маневрової роботи.

Тягово-енергетичні показники на маневрову роботу локомотива отримують шляхом тягових розрахунків. Тягова характеристика за окремими позиціями контролера машиніста маневрового локомотива ЧМЕЗ подана на рис. 1.

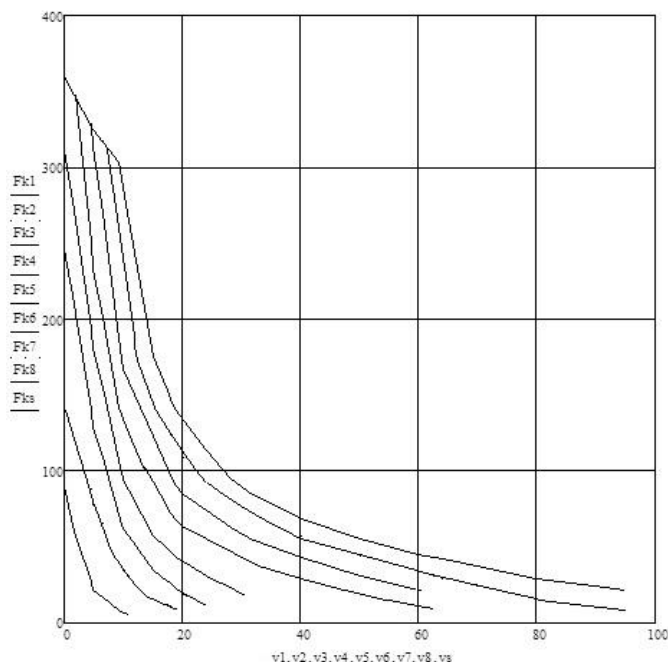


Рис. 1. Тягова характеристика локомотива ЧМЕЗ від першої до восьмої позиції контролера машиніста (F_k , кН, v , км/год)

Для аналітичного опису поданих тягових характеристик (залежності сили тяги F_k від швидкості v) проведено апроксимацію позицій тепловоза ЧМЕЗ методом кубічної та гіперболічної регресій.

Розглянувши кубічну регресію, у якій будують поліном на основі меншої кількості точок, тому що в кожній точці можна обчислювати значення і функції, і її похідної, апроксимація кубічним поліномом записується як

$$F(x) = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) + a_3(x - x_1)^2(x - x_2). \quad (1)$$

Параметри рівняння (1) підбирають так, щоб значення $F(x)$ і її похідні в точках

x_1, x_2 збігалися зі значеннями $f(x), f'(x)$ у цих точках. Перша похідна функції $F(x)$

$$\frac{dF(x)}{dx} = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) + 2a_3(x - x_1)^2(x - x_2). \quad (2)$$

Коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 рівняння (2) знаходять за відомими значеннями $f(x_1),$

$f(x_2), f'(x_1), f'(x_2)$ шляхом розв'язання такої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} f_1 &= f(x_1) = a_0; \\ f_2 &= f(x_2) = a_0 + a_1(x_2 - x_1); \\ f'_1 &= f'(x_1) = a_1 + a_2(x_1 - x_2); \\ f'_2 &= f'(x_2) = a_1 + a_2(x_2 - x_1) + a_3(x_2 - x_1)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Цю систему легко розв'язати рекурсивним методом. Після того як коефіцієнти знайдено, діючи за аналогією з випадком квадратичної апроксимації, можна оцінити координату стаціонарної точки $f(x)$ за допомогою полінома (1).

Прирівнявши до похідної нуля (2), можна отримати квадратне рівняння.

Використовуючи формулу для обчислення коренів квадратного рівняння, запишемо розв'язок, що визначає стаціонарну точку кубічного полінома, як

$$\vec{x} = \begin{cases} x_2, & \text{якщо } \mu < 0; \\ x_2 - \mu(x_2 - x_1), & \text{якщо } 0 \leq \mu \leq 1; \\ x_1, & \text{якщо } \mu > 1, \end{cases} \quad (4)$$

де

$$\mu = \frac{f'_2 + w - z}{f'_2 - f'_1 + 2w},$$

$$z = \left[\frac{3 \cdot (f_1 - f_2)}{x_2 - x_1} \right] + f'_1 + f'_2,$$

$$w = \begin{cases} \sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, & \text{якщо } x_1 < x_2 \\ -\sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, & \text{якщо } x_1 > x_2 \end{cases}.$$
(5)

Формула для визначення значення w забезпечує належний вибір одного з двох коренів квадратного рівняння.

За цими рівняннями отримано аналітичний опис тягових характеристик:

- для третьої позиції була обрана кубічна регресія, похибка якої становила 2.3 %, і отримано математичний вираз

$$y = -0.023211278269 \cdot x^3 + 1.400358362989 \cdot x^2 - 30.194326017237x + 249.846466524097.$$
(6)

Аналітичний опис струмової характеристики тягового генератора має такий

вигляд, як на рис. 2 (залежність струму генератора I_r , А, від швидкості v , км/год);

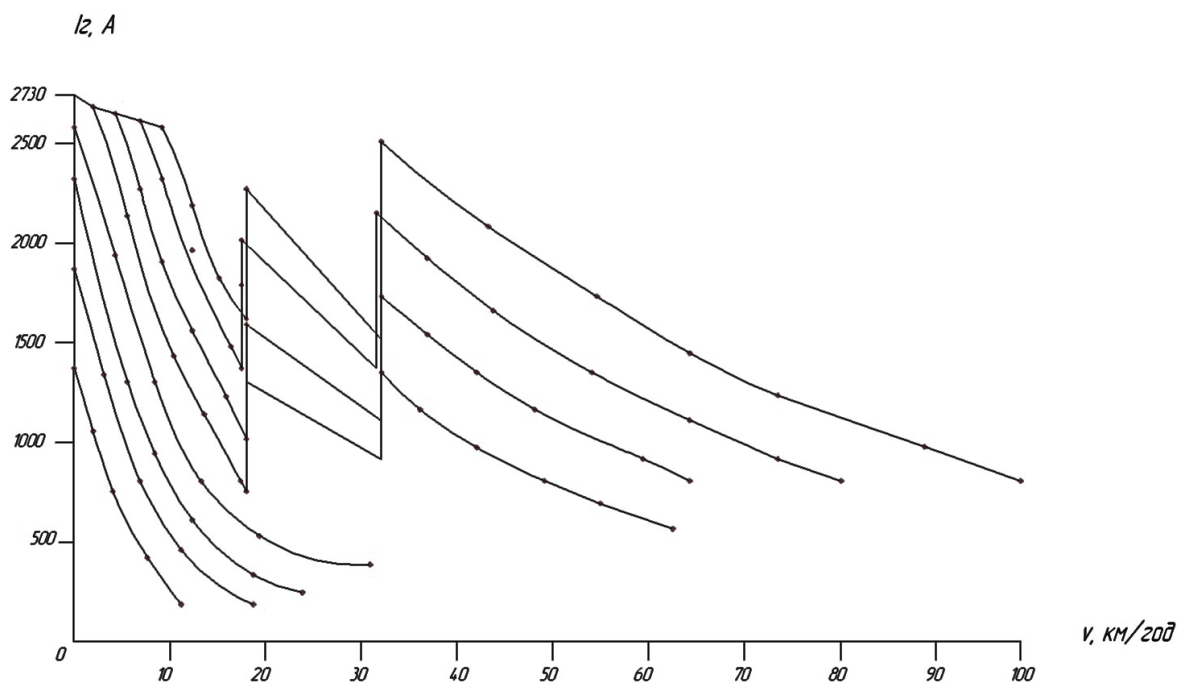


Рис. 2. Струмова характеристика тягового генератора локомотива ЧМЕЗ від першої до восьмої позиції контролера машиніста (I_r , А, v , км/год)

- для третьої позиції була обрана кубічна регресія, похибка якої становила 1.9 %, і отримано математичний вираз

$$y = -0.123756657010 \cdot x^3 + 9.260371985943 \cdot x^2 - 239.534045890959 \cdot x + 2385.843400085908 \quad (7)$$

Навантажувальна характеристика тепловоза має такий вигляд, як на рис. 3 (за дослідженнями Демченка Є. Б.);

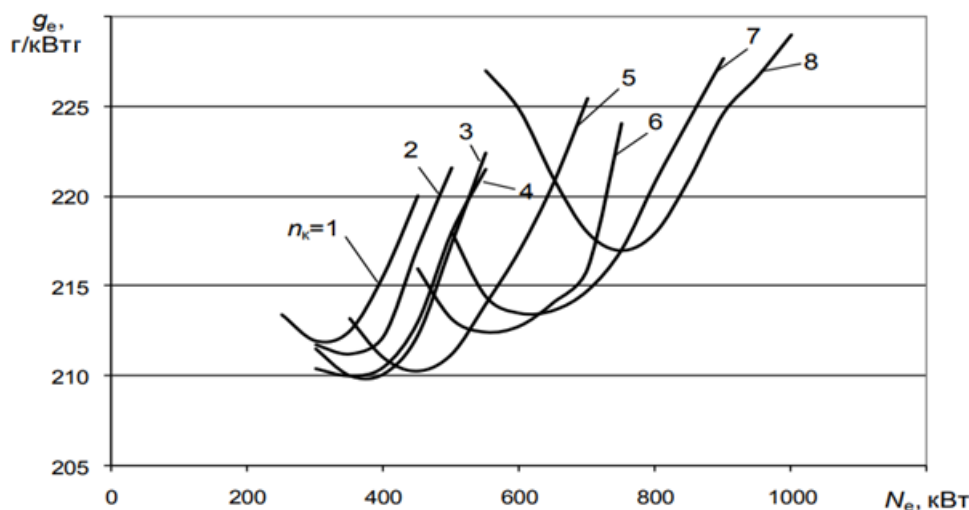


Рис. 3. Навантажувальна характеристики $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ

- для третьої позиції була обрана квадратична регресія, похибка якої становила 0.2 %, і отримано математичний вираз

$$y = 0.000419023539 \cdot x^2 - 0.314625500417 \cdot x + 269.324921960171 \quad (8)$$

Тягові розрахунки здійснюють у такий спосіб.

Для визначення прискорення локомотива a , m/s^2 , використовуючи другий закон Ньютона, отримаємо вираз

$$F_k - F_{опору} = m \cdot a, \quad (9)$$

де F_k – сила тяги локомотива, Н;
 $F_{опору}$ – сили опору руху, Н;
 m – маса складу, кг.

Звідки отримуємо вираз

$$a = \frac{F_k - F_{опору}}{\Sigma m} = \frac{F_k - (W_{04} + W_l)}{(m_s + m_l)}, \quad (10)$$

де F_k – сила тяги локомотива, Н;
 W_{04} – основний питомий опір руху поїзда, Н;
 W_l – основний питомий опір руху локомотива, Н;

$m_s + m_l$ – сумарна маса локомотива та рухомого складу, кг.

Для подальших розрахунків необхідно задати початкові значення:

n_{ted} – кількість тягових електричних двигунів, задіяних під час руху; для наступних розрахунків приймаємо за шести тягових електричних двигунів $n_{ted} = 1$, за чотирьох $n_{ted} = 0,66$, за двох $n_{ted} = 0,33$;

m_l – маса локомотива (маса локомотива ЧМЕЗ = 123 т = 123000 кг, значення $m_l = 123000$ кг);

m_s – маса складу (обираємо для подальших розрахунків 10 чотиривісних

вагонів вагою 65 т і отримуємо значення $m_s = 65 \cdot 10 = 650m = 650000 \text{ кг}$

$m_s = 650000$ кг);

q_{04} – середню масу, т/вісь, яка припадає відповідно на вісь чотиривісного вагона, розраховують за формулою, її значення $q_{04} = 65/4 = 16.25$ т/вісь;

$v_{початкове}$ – початкова швидкість локомотива, км/год (5 км/год);

t_{int} – інтервал часу (1 с);

F_k – сила тяги локомотива, кН, яку розраховують за допомогою апроксимації тягових характеристик і отриманого математичного виразу (6) для позиції тепловоза ЧМЕЗ,

$$F_{k(v)} = -0.023211278269 \cdot v_{початкове}^3 + 1.400358362989 \cdot v_{початкове}^2 - 30.194326017237 \cdot v_{початкове} + 249.846466524097 \cdot n_{ted} ; \quad (11)$$

g_e – витрати палива, $г/кВт \cdot г$, визначають за допомогою навантажувальної характеристики $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ і математичного виразу (9).

Для розрахунку витрат палива g_e , $г/кВт \cdot г$, необхідно розрахувати потужності локомотива N_e , кВт, у момент швидкості за формулою

$$N_e = F_k \cdot v_{початкове}, \quad (12)$$

$$g_e = 0.000419023539 \cdot N_e^2 - 0.314625500417 \cdot N_e + 269.324921960171, \quad (13)$$

де N_e – потужність локомотива, кВт.

Вага поїзда Q'' , Н,

$$Q'' = m_s \cdot g, \quad (14)$$

де m_s – маса складу, кг;

g – прискорення вільного падіння, $м/с^2$.

Питомий опір w''_{04} , Н/кН, руху для чотиривісних вагонів [6-8]

$$w''_{04} = 0.7 + \frac{3 + 0.1 \cdot v_{початкове} + 0.0025 \cdot v_{початкове}^2}{16.25}, \quad (15)$$

де $v_{початкове}$ – початкова швидкість локомотива, км/год.

Основний питомий опір руху поїзда W_{04} , Н,

$$W_{04} = \frac{(w_{04} \cdot Q)}{1000}. \quad (16)$$

Вага локомотива Q , Н,

$$Q = m_1 \cdot g, \quad (17)$$

де m_1 – маса складу, кг;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Основний опір w_0 , Н/кН, руху локомотива [6-8]

$$w_0' = 1,9 + 0,01 \cdot v_{\text{початкове}} + 0,0003 \cdot v_{\text{початкове}}^2, \quad (18)$$

де $v_{\text{початкове}}$ – початкова швидкість локомотива, км/год.

Основний питомий опір Wl , Н, руху локомотива

$$Wl = \frac{(w_0 \cdot Q)}{1000}. \quad (19)$$

Визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ

Отримавши значення прискорення локомотива a , розраховані за формулою (11), визначасмо поточну швидкість $v_{\text{поточне}}$ локомотива через момент часу t_{int} , км/год:

$$v_{\text{поточне}}' = v_{\text{початкове}} + a \cdot t_{\text{int}}, \quad (20)$$

де $v_{\text{початкове}}$ – початкова швидкість локомотива, м/с;

a – прискорення локомотива, м/с²;

t_{int} – інтервал часу, с.

Пройдений шлях локомотива $S_{\text{пройдене}}$, м, через час t_{int}

$$S_{\text{пройдене}} = v_{\text{поточне}} \cdot t_{\text{int}}, \quad (21)$$

де $v_{\text{поточне}}$ – поточна швидкість локомотива, м/с;

t_{int} – інтервал часу, с.

Отримавши значення пройденого шляху локомотива, можна розрахувати витрати палива, г:

$$Ge = \frac{F_k \cdot S_{\text{пройдене}}}{t_{\text{int}}} \cdot t_{\text{int}} \cdot \frac{g_e}{3600}. \quad (22)$$

Для визначення перевищення температури ТЕД порівняно з температурою навколишнього середовища розраховуємо струм тягового електричного двигуна ТЕ-006:

$$I_D = (-0.123756657010 \cdot v^3 + 9.260371985943 \cdot v^2 - 239.534045890959 \cdot v + 2385.843400085908) / n_{\text{тед}}, \quad (23)$$

де v – швидкість руху локомотива, км/год;

$n_{\text{тед}}$ – кількість паралельно з'єднаних ТЕД.

Температури перевищення порівняно з температурою навколишнього середовища

$$T = (0.000000364219 \cdot I_{\text{д}}^3 - 0.000310314685 \cdot I_{\text{д}}^2 + 0.148228438228 \cdot I_{\text{д}} + 32.699300699231) \cdot (1 - 2.72^{-\frac{t}{0.000000065851 \cdot I_{\text{д}}^3 - 0.000038170163 \cdot I_{\text{д}}^2 + 0.014696969697 \cdot I_{\text{д}} + 29.993006992981}}) \quad (24)$$

Використовуючи отримані результати розрахунку моделі тягово-енергетичних показників, аналізуємо отримані залежності сили тяги від швидкості руху локомотива $F_k = f(v)$; витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{\text{пр}})$; кількості витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{\text{пр}})$; перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_{\text{д}})$ через інтервал часу t порівняно з шістьма паралельно з'єднаними

ТЕД для третьої, четвертої, п'ятої позицій контролера машиніста (найбільш застосовуваних для маневрової роботи).

Для третьої позиції контролера машиніста графічна залежність $F_k = f(v)$ має такий вигляд, як на рис. 4.

Залежності витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{\text{пр}})$ подано на рис. 5.

Кількість витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{\text{пр}})$ подано на рис. 6.

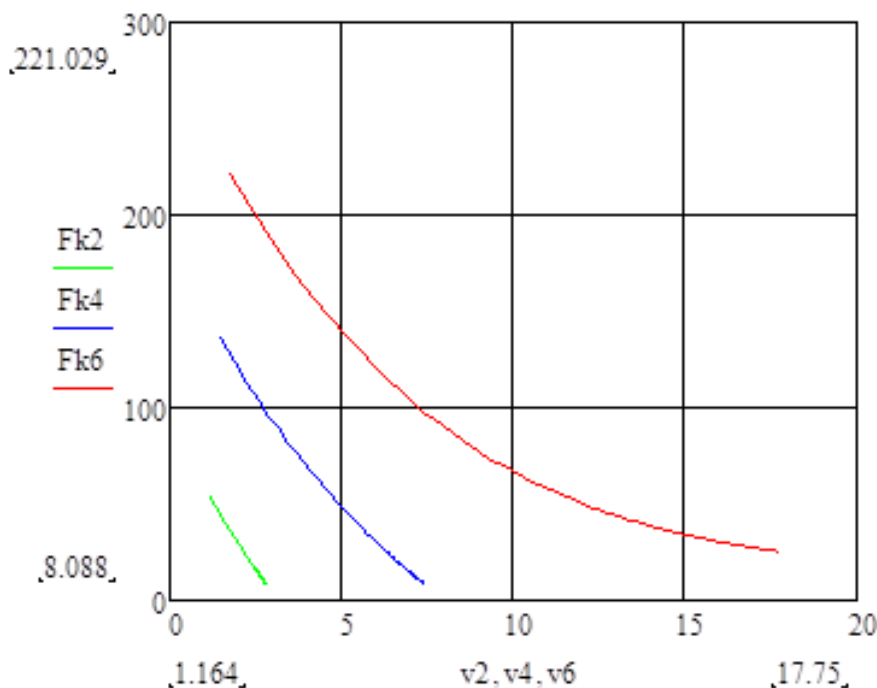


Рис. 4. Залежність $F_k = f(v)$:

- $F_{k6} = f(v_6)$ – від швидкості руху для шести ТЕД;
- $F_{k4} = f(v_4)$ – від швидкості руху для чотирьох ТЕД;
- $F_{k2} = f(v_2)$ – від швидкості руху для двох ТЕД

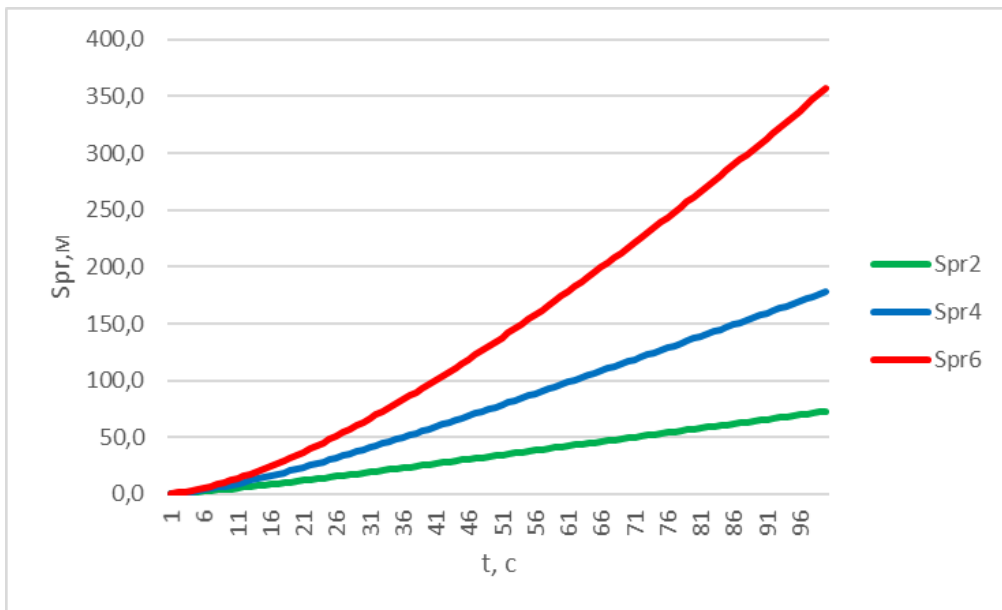


Рис. 5. Залежність $t = f(S_{pr})$:
 $t = f(S_{pr2})$ – на двох ТЕД;
 $t = f(S_{pr4})$ – на чотирьох ТЕД;
 $t = f(S_{pr6})$ – на шести ТЕД

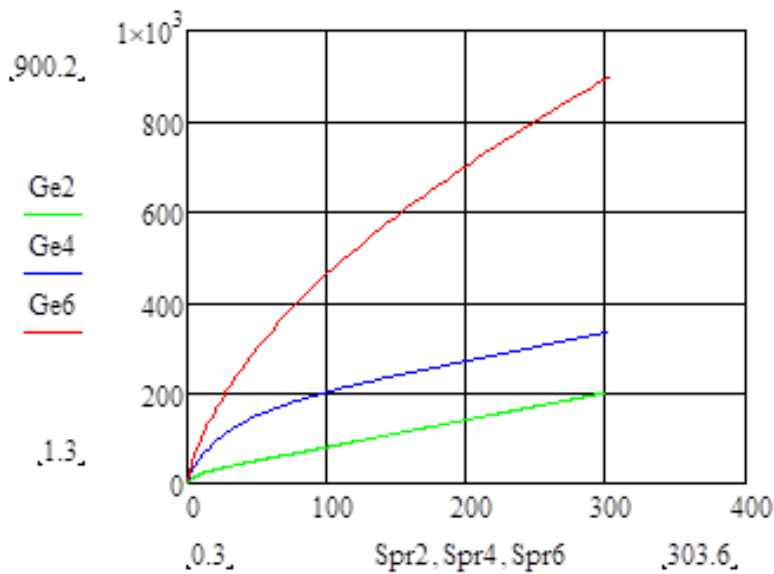


Рис. 6. Залежність $G_e = f(S_{pr})$:
 $G_{e6} = f(S_{pr6})$ – для шести ТЕД;
 $G_{e4} = f(S_{pr4})$ – для чотирьох ТЕД;
 $G_{e2} = f(S_{pr2})$ – для двох ТЕД

Залежність перевищення температури порівняно з температурою навколишнього

середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ через інтервал часу t подано на рис. 7.

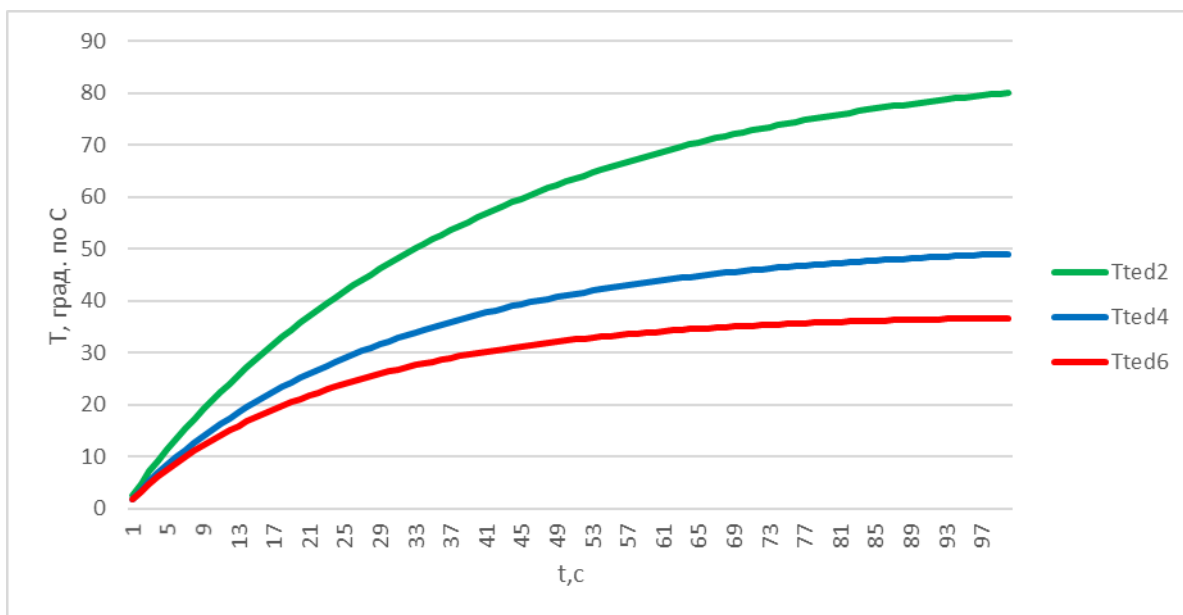


Рис. 7. Залежність $T = f(I_d)$ через інтервал часу t :

$$T_{ted6} = f(I_{d6}) \text{ – для шести ТЕД;}$$

$$T_{ted4} = f(I_{d4}) \text{ – для чотирьох ТЕД;}$$

$$T_{ted2} = f(I_{d2}) \text{ – для двох ТЕД}$$

Для четвертої позиції контролера машиніста графічна залежність $F_k = f(v)$ має такий вигляд, як на рис. 8.

Залежність витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{pr})$ подано на рис. 9.

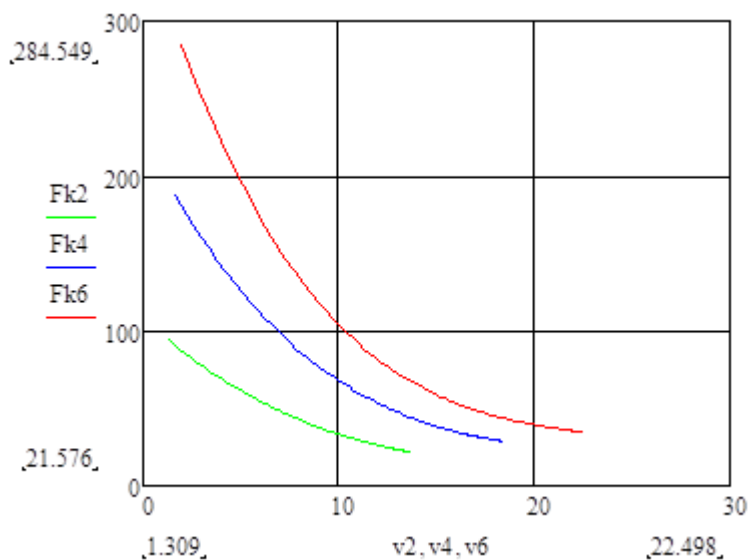


Рис. 8. Залежність $F_k = f(v)$:

$$F_{k6} = f(v_6) \text{ – сили тяги від швидкості руху для шести ТЕД;}$$

$$F_{k4} = f(v_4) \text{ – сили тяги від швидкості руху для чотирьох ТЕД;}$$

$$F_{k2} = f(v_2) \text{ – сили тяги від швидкості руху для двох ТЕД}$$

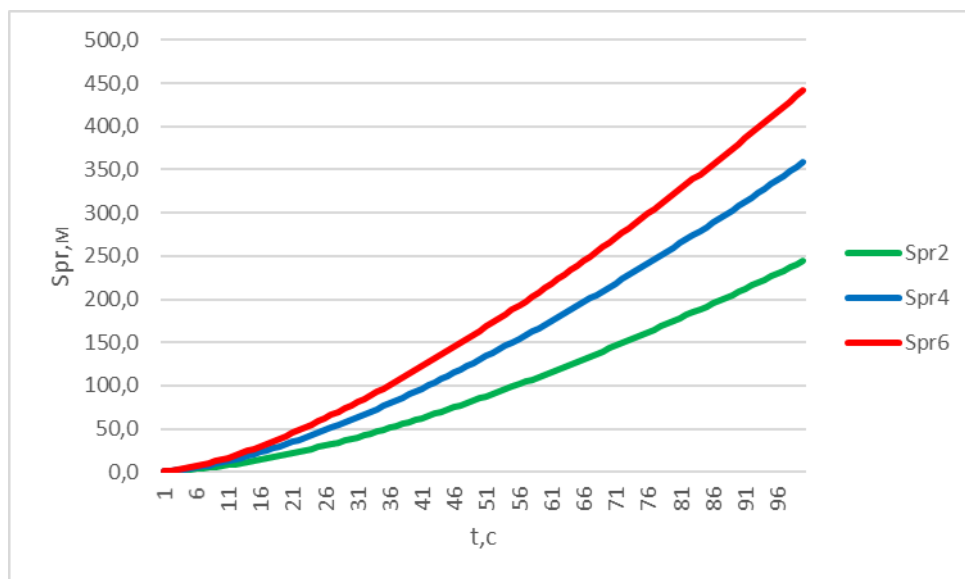


Рис. 9. Залежність $t = f(S_{pr})$:
 $t = f(S_{pr2})$ – на двох ТЕД;
 $t = f(S_{pr4})$ – на чотирьох ТЕД;
 $t = f(S_{pr6})$ – на шести ТЕД

Кількість витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{pr})$ подано на рис. 10.

Залежність перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ через інтервал часу t подано на рис. 11.

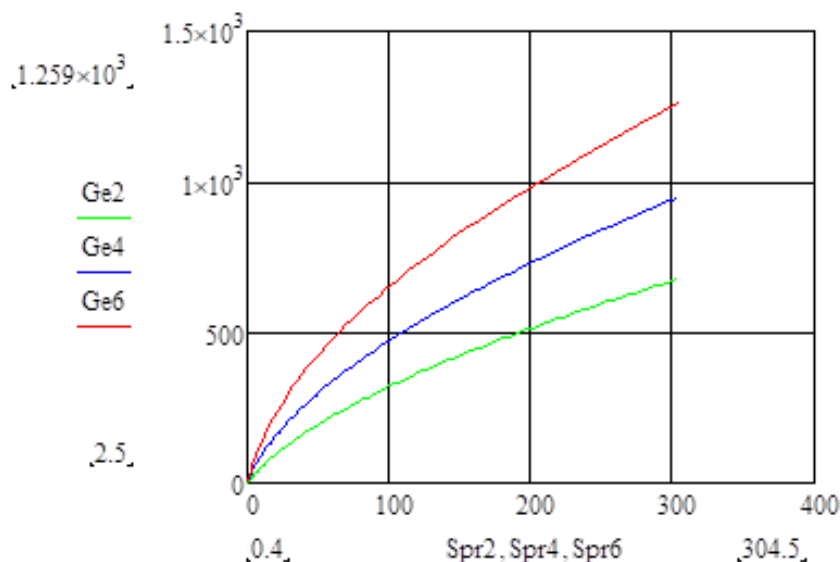


Рис. 10. Залежність $G_e = f(S_{pr})$:
 $G_{e6} = f(S_{pr6})$ – для шести ТЕД;
 $G_{e4} = f(S_{pr4})$ – для чотирьох ТЕД;
 $G_{e2} = f(S_{pr2})$ – для двох ТЕД

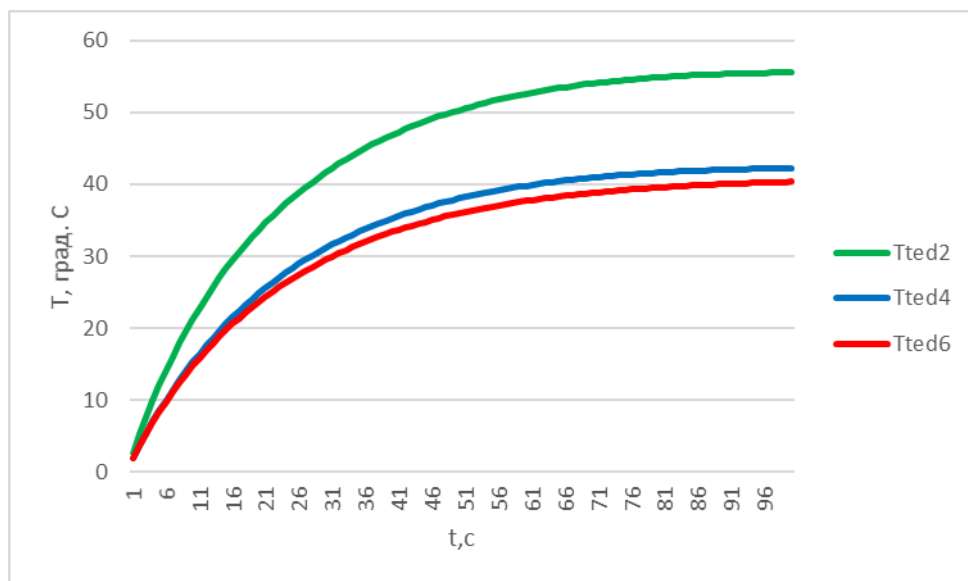


Рис. 11. Залежність $T = f(I_d)$ через інтервал часу t :

$$T_{ted6} = f(I_{d6}) - \text{для шести ТЕД};$$

$$T_{ted4} = f(I_{d4}) - \text{для чотирьох ТЕД};$$

$$T_{ted2} = f(I_{d2}) - \text{для двох ТЕД}$$

Для п'ятої позиції контролера машиніста графічна залежність $F_k = f(v)$ має такий вигляд, як на рис. 12.

Залежність витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{pr})$ подано на рис. 13.

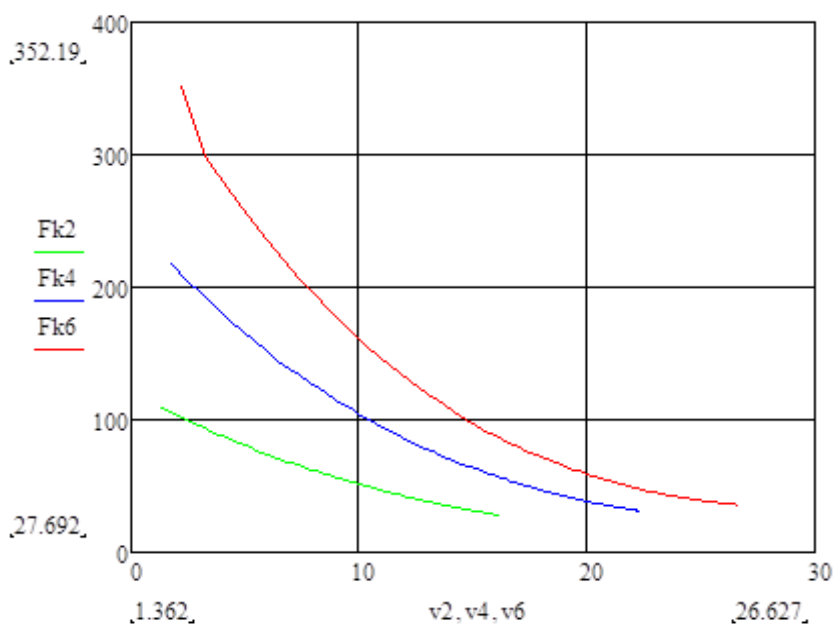


Рис. 12. Залежність $F_k = f(v)$:
 $F_{k6} = f(v_6)$ – для шести ТЕД;
 $F_{k4} = f(v_4)$ – для чотирьох ТЕД;
 $F_{k2} = f(v_2)$ – для двох ТЕД

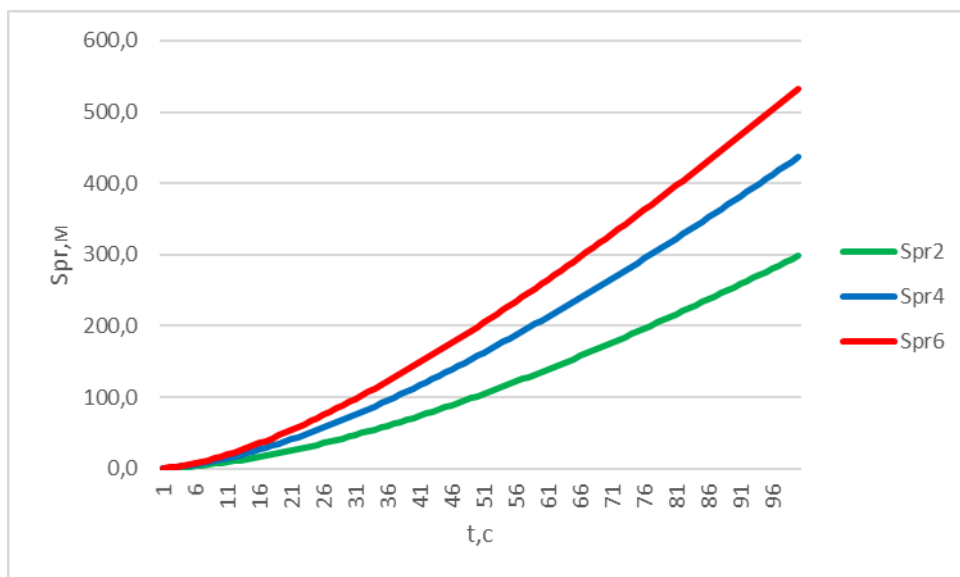


Рис. 13. Залежність $t = f(S_{pr})$:
 $t = f(S_{pr2})$ – на двох ТЕД;
 $t = f(S_{pr4})$ – на чотирьох ТЕД;
 $t = f(S_{pr6})$ – на шести ТЕД

Кількість витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{pr})$ подано на рис. 14.

Залежність перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ через інтервал часу t подано на рис. 15.

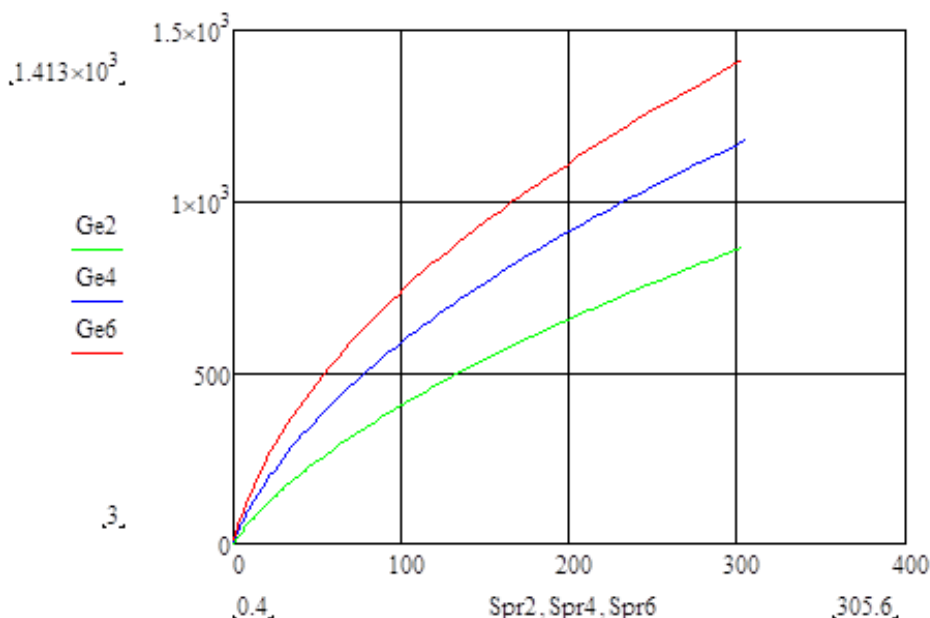
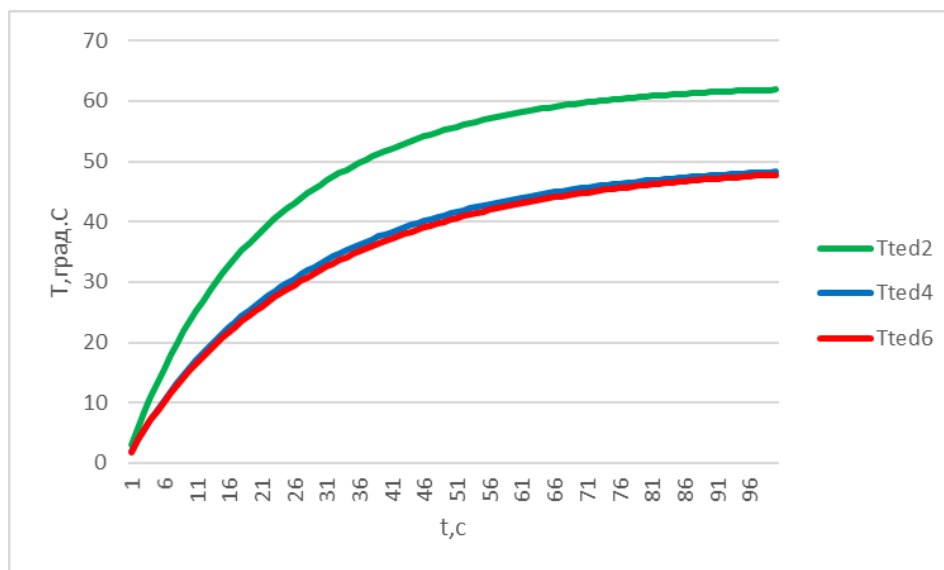


Рис. 14. Залежність $G_e = f(S_{pr})$:
 $G_{e6} = f(S_{pr6})$ – для шести ТЕД; $G_{e4} = f(S_{pr4})$ – для чотирьох ТЕД;
 $G_{e2} = f(S_{pr2})$ – для двох ТЕД

Рис. 15. Залежність $T = f(I_d)$ через інтервал часу t :

$$T_{ted6} = f(I_{d6}) \text{ – для шести ТЕД;}$$

$$T_{ted4} = f(I_{d4}) \text{ – для чотирьох ТЕД;}$$

$$T_{ted2} = f(I_{d2}) \text{ – для двох ТЕД}$$

Висновки. За результатами апроксимації наявних характеристик тепловоза було отримано аналітичні вирази (6)-(8), (24). За допомогою формул (9)-(11), (13), (20)-(24) створено математичні моделі руху маневрового локомотива ЧМЕЗ для різних варіантів підключення ТЕД. Результати розрахунків створеної математичної моделі тягово-енергетичних показників залежності $F_k = f(v)$, $t = f(S_{pr})$, $G_e = f(S_{pr})$, $T = f(I_d)$ для двох, чотирьох і шести ТЕД свідчать про те, що доцільно використовувати різні варіанти підключення ТЕД. На п'ятій позиції рух на

ділянці з відстанню 300 м і вагою поїзда 773 000 кг для шести двигунів склав 1.68 хв, на виконану роботу витрачено 1 кг 958 г дизельного палива. Для чотирьох ТЕД час руху склав 1.68 хв, тобто не змінився, на виконану роботу локомотив витратив 1 кг 457 г палива. Отже, в результаті використання різних варіантів підключення ТЕД можна отримати економію палива на виконання маневрової роботи на часткових навантаженнях до 15 % залежно від експлуатаційних умов. При цьому температура ТЕД залишається в межах допустимої для класу ізоляції F.

Подяка.

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках розроблення проєкту 2022.01/0224 за темою «Розробка наукових засад комплексного підвищення безпеки, ефективності експлуатації та управління критичними об'єктами залізничного транспорту в умовах післявоєнного розвитку України».

Список використаних джерел

1. Zvolenský P., Barta D., Grenčík J., Drożdziel P. & Kašiar Ľ. Improved method of processing the output parameters of the diesel locomotive engine for more efficient maintenance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 315–323. URL: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.2.11> (date of access 26.02.2024).

2. Gorobchenko O., Nevedrov O. Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*. 2020. Vol. 56, no. 4. P. 47–58. DOI: 10.5604/01.3001.0014.5517 (date of access: 26.02.2024).
3. Горобченко О. М. Теоретичні основи оцінки інформативності ознак поїзної ситуації для роботи інтелектуальних систем керування локомотивом. *Транспортні системи і технології*. 2021. № 38. С. 223–231. DOI: 10.32703/2617-9040-2021-38-220-21 (дата звернення 26.02.2024).
4. Горобченко О. М., Заїка Д. О. Огляд методів та перспективи використання штучного інтелекту на залізничному транспорті. *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference : матеріали Міжнар. науково-практ. конф., м. Vancouver, 2–4 лют. 2022 р. Vancouver, 2022*. С. 184–192. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and-prospects-of-world-science-2-4-fevralya-2022-goda-vankuver-kanada-arhiv/> (дата звернення 26.02.2024).
5. Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу / М. А. Барибін, А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 4. С. 15–27. URL: <https://doi.org/10.18664/iksz.v25i4.219530>.
6. Бобирь Д. В., Капіца М. І., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту: навч. посіб. Дніпро: Дріант-друк, 2022. 112 с.
7. Бобирь Д. В., Білоконь І. М., Очкасов О. Б., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для маневрової роботи: навч. посіб. Дніпро: Дріант-друк, 2023. 129 с.
8. Сорока К. О. Тягові розрахунки на основі аналізу процесів перетворення енергії: монографія. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, 2022. 242 с.
9. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках / А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко, С. І. Возненко та ін. *Транспортні системи і технології*. 2020. № 35. С. 102–112. DOI: 10.32703/2617-9040-2020-35-11 (дата звернення 26.02.2024).
10. Kostenko I., Bilokon I., Lysenko Y., Chernyshenko Y., Riabov I. Analysis of shunting locomotive operating modes when performing traction tasks. *Транспортні системи і технології*. 2023. № 42. С. 18–33. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-42-2> (дата звернення 26.02.2024).
11. Wu Q., Spiryagin M., Cole C. Train energy simulation with locomotive adhesion model. *Railway Engineering Science*. 2020. Vol. 28. P. 75–84. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00202-1> (date of access 26.02.2024).
12. Wu Q., Spiryagin M., Wolfs P., Cole C. Traction modelling in train dynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 233, no. 4. P. 382–395. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409718795496> (date of access 26.02.2024).
13. Macii D., Dalpez S., Passerone R., Corrà M., Avancini M., Benciolini L. A safety instrumented system for rolling stocks: Methodology, design process and safety analysis. *Measurement*. 2015. Vol. 67. P. 164–176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.002> (date of access 26.02.2024).
14. Liudvinavičius L., Jastremskas V. Modernization of diesel-electric locomotive 2M62 and ТЕР-70 locomotives with respect to electrical subsystem. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 272–280. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.375> (date of access 26.02.2024).

15. BABeł M., Szkoda M. Diesel locomotive efficiency and reliability improvement as a result of power unit load control system modernisation. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2016. Vol. 18, no. 1. P. 38–49. URL: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.6>.

Горобченко Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000 – 0002 – 9868 – 3852. Тел.: +38(050) 972-04-71. E-mail: gorobchenko.a.n@gmail.com.

Заїка Денис Олександрович, аспірант кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000 – 0003 – 0693 – 9580. Тел.: +38(066) 836-09-91. E-mail: zaika_do@gsuite.duit.edu.ua.

Oleksandr Gorobchenko, Dr. Sc. (Tech.), professor, Electromechanics and Rolling Stock of Railways department, State University of Infrastructure and Technologies. ORCID iD: 0000 – 0002 – 9868 – 3852. Тел.: +38(050) 972-04-71.

E-mail: gorobchenko.a.n@gmail.com.

Denys Zaika, postgraduate student, Electromechanics and Rolling Stock of Railways department, State University of Infrastructure and Technologies. ORCID iD: 0000 – 0003 – 0693 – 9580. Тел.: +38(066) 836-09-91.

E-mail: zaika_do@gsuite.duit.edu.ua.

Статтю прийнято 14.05.2024 р.

УДК 629.4.027.31-272.82

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВОГО РЕЗЕРВУАРА НА ДЕФОРМУВАННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦІ

Д-р філософії А. Я. Кузишин, д-р техн. наук В. В. Ковальчук

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF AN ADDITIONAL TANK ON THE DEFORMATION OF THE PNEUMATIC SPRING OF HIGH-SPEED RAILWAY ROLLING STOCK

PhD A. Kuzyshyn, Doctor of Technical Sciences V. Kovalchuk

Анотація. У статті проведено дослідження впливу додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори. Для цього розроблено методологію проведення експериментальних досліджень із використанням випробувальної установки. Установлено, що вплив додаткового резервуара на величину вертикального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки є незначним за внутрішніх тисків у ресорі до 2,5 атм. Проте за манометричного тиску більше 2,5 атм перекрыття крана перед додатковим резервуаром призводить до більшого деформування гумо-кордної оболонки порівняно з деформуванням при відкритому крані та включенні у пневматичну систему ресорного підвішування додаткового резервуара.

Ключові слова: пневматична ресора, додатковий резервуар, деформування, тиск, гумо-кордна оболонка.

Abstract. The use of a pneumatic spring suspension system in the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock is an integral component of ensuring its permissible dynamic indicators and traffic safety indicators. This work is aimed at researching the deformation characteristics of the rubber-cord shell of the pneumatic spring in the vertical and horizontal directions, taking into account manometric pressure, external load and an auxiliary reservoir. To achieve the goal, a methodology for experimental studies of pneumatic spring deformation was developed using a test rig with an assembled pneumatic spring suspension system, power and measuring equipment. Deformations of the rubber-cord sheath were measured by analog sensors of linear displacements using an analog-to-digital converter and special software. It was established that the effect of the auxiliary reservoir on the amount of vertical deformation of the lower part of the rubber-cord shell does not exceed 3.46 %, which allows us to conclude that the auxiliary reservoir of the pneumatic spring suspension system has a negligible effect on the vertical deformations of the lower part of the rubber-cord shell of the pneumatic spring. The dependences of the deformation of the rubber-cord shell of the pneumatic spring in the horizontal direction on the value of the manometric pressure when the auxiliary reservoir is connected and disconnected are obtained. It was established that in the range of manometric pressure changes of 1.0÷2.5 atm the presence or absence of an auxiliary reservoir has little effect on the amount of deformation of the rubber-cord sheath in the horizontal direction. However, at a pressure of more than 2.5 atm, closing the tap to the auxiliary reservoir leads to significantly greater deformation of the rubber cord shell compared to the deformation when the tap is open and the auxiliary reservoir is turned on. The obtained results regarding the deformation characteristics of the rubber-cord shell of the pneumatic spring will allow us to proceed to the study of the dynamic characteristics of the pneumatic spring, which are necessary when establishing safe conditions for the operation of modern high-speed rolling stock at the stage of its design.

Keywords: air spring, auxiliary reservoir, deformation, pressure, rubber-cord shell.

Вступ. Пневматична система ресорного підвішування, застосовувана у другому ступені ресорного підвішування сучасного швидкісного рухомого складу залізниці, є невід’ємною складовою забезпечення допустимих динамічних

показників і показників безпеки його руху [1, 2]. Основними конструктивними складовими пневматичної системи ресорного підвішування є пневматична ресора, додатковий резервуар і з’єднувальний трубопровід (рис. 1).

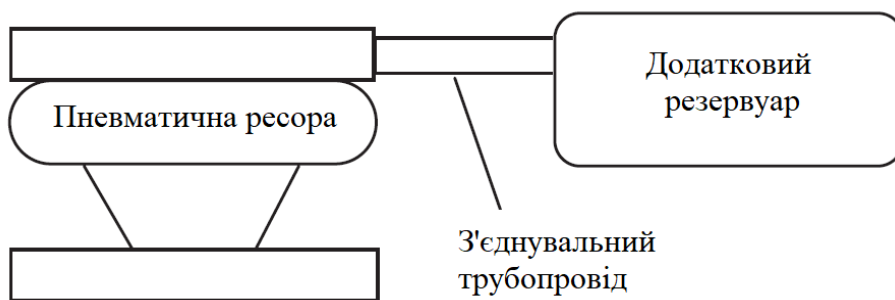


Рис. 1. Основні складові елементи пневматичної системи ресорного підвішування

Використання пневматичної системи ресорного підвішування на швидкісному

рухомому складі насамперед дає змогу замінити великогабаритні та масивні

металеві конструктивні елементи, а також забезпечити змінну жорсткість і високі демпфувальні властивості системи [3].

Слід зазначити, що жорсткість пневматичної ресори залежить не тільки від стану повітря, але і конструктивних особливостей гумо-кордної оболонки та загального об'єму пневматичної системи ресорного підвішування. Тому актуальним є завдання дослідження деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори з урахуванням манометричного тиску, зовнішнього навантаження та додаткового резервуара. Це дасть змогу встановити різницю роботи гумо-кордної оболонки пневматичної ресори з додатковим резервуаром і без нього, а також перейти до дослідження динамічної жорсткості пневматичної ресори.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Математичні моделі, які описують роботу пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках, відображено в роботі [4].

Робота [5] спрямована на визначення та порівняння альтернативних підходів до математичного моделювання пневматичної ресори, впливу її динамічних характеристик на багатомасове моделювання залізничного рухомого складу. Використовуючи лабораторне обладнання, розроблено два різних підходи до моделювання пневматичної системи ресорного підвішування: квазістатичний і динамічний. Проте дослідження особливостей деформування гумо-кордної оболонки за наявності та відсутності додаткового резервуара в цій роботі не проведено.

У роботах [6, 7] авторами за допомогою аеродинаміки, механіки рідини, структурної механіки, інженерної термодинаміки розроблено різні моделі пневматичної системи ресорного підвішування та досліджено динамічні характеристики пневматичної ресори за різних амплітуд і частот збудження. Встановлено, що для демпфування низькочастотних збуджень найкращою є

система «пневматична ресора – демпфувальний отвір – з'єднувальний трубопровід – додатковий резервуар», а для високочастотних збуджень рекомендовано «пневматична ресора – демпфувальний отвір – додатковий резервуар». Використання пневматичної системи ресорного підвішування за типом «пневматична ресора – з'єднувальний трубопровід – додатковий резервуар» не рекомендовано, оскільки система за такого з'єднання має від'ємну жорсткість. Дослідження роботи пневматичної ресори, а саме її вертикальне та горизонтальне деформування у випадку зміни внутрішнього тиску та впливу додаткового резервуару в цих роботах не проведено.

У роботі [8] авторами проведено дві групи експериментів для моделювання політропного процесу у пневматичних ресорах. Встановлено, що механічна поведінка пневматичної ресори переважно залежить від політропного процесу з певним індексом політропи. Встановлено, що термодинамічний процес у пневматичній ресорі можна вважати адіабатичним за частоти збудження більше 5 Гц, а політропним – за частоти менше 5 Гц. Крім того, побудовано залежності вертикальної жорсткості пневматичної ресори від зміни вертикального навантаження за різних значень об'єму додаткового резервуара, але не проведено досліджень роботи гумо-кордної оболонки як складової динамічної жорсткості пневматичної ресори.

У роботі [9] проведено математичне моделювання пневматичної ресори та аналіз її вертикальної жорсткості. При цьому геометричні параметри пневматичної ресори визначали наближеним аналітичним методом. Однак не отримано залежностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках.

У роботі [10] авторами наведено модель пневматичної системи ресорного підвішування в поєднанні з клапанами вирівнювання та перепаду тиску для

моделювання динаміки залізничного рухомого складу. Зазначено важливість урахування нелінійних характеристик конструктивних складових пневматичної системи ресорного підвішування для оцінювання безпеки рухомого складу на низьких швидкостях руху та кривих ділянках колії.

У роботі [11] змодельовано роботу пневматичної системи ресорного підвішування сучасного швидкісного рухомого складу як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках. При цьому у вертикальному напрямку сила реакції пневматичної ресори отримана з рівнянь пневматики, а в горизонтальному напрямку використовували квадратичну функцію, яка була розрахована з використанням методу скінченних елементів.

У роботі [12] авторами досліджено динамічну жорсткість пневматичної ресори на основі розробленої узагальненої аналітичної моделі, враховуючи термодинаміку пневматичної системи «пневматична ресора – з'єднувальний трубопровід – додатковий резервуар», ефективно тертя і в'язкопружне тертя гумо-кордної оболонки. Однак у роботі не досліджено роботу гумо-кордної оболонки в горизонтальному напрямку за прикладання зовнішнього вертикального навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує важливість питання дослідження роботи пневматичної системи ресорного підвішування та визначення її динамічних характеристик. Однак невіршеним завданням залишається дослідження поведінки гумо-кордної оболонки за різних манометричних тисків у пневматичній ресорі з урахуванням впливу додаткового резервуара.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є експериментальне дослідження впливу додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування гумо-кордної оболонки

пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Розробити методологію експериментальних досліджень деформування пневматичної ресори залежно від робочого стану додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування.

2. Дослідити вплив додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках.

Основна частина дослідження.

Визначення закономірностей деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори швидкісного складу проводили в лабораторних умовах. Випробувальну установку з зібраною пневматичною системою ресорного підвішування та силовим і вимірювальним обладнанням зображено на рис. 2.

Методика експериментальних досліджень передбачала проведення випробувань пневматичної ресори залежно від внутрішнього тиску та величини прикладеного зовнішнього навантаження у двох станах роботи додаткового резервуара. Перший стан робочий – додатковий резервуар включено в загальну роботу пневматичної системи ресорного підвішування, другий – додатковий резервуар не включено в загальну роботу пневматичної системи ресорного підвішування. Першого стану можна досягти відкриттям крана на з'єднувальному трубопроводі, а другого – перекриттям (рис. 3).

Випробування пневматичної ресори проведено за зміни манометричного тиску в ресорі від 0 до 5 атм. Підвищення манометричного тиску здійснювали ступенями по 0,5 атм. На кожному підвищенні тиску на 0,5 атм прикладали зовнішнє навантаження за допомогою домкрата і фіксували вертикальні та

горизонтальні деформації гумо-кордної оболонки ресори. При цьому прикладення зовнішнього навантаження і вимірювання деформацій проводили двічі на кожному ступені зміни манометричного тиску, а саме за ввімкнення додаткового резервуара та

вимкнення його під час роботи пневматичної системи ресорного підвішування. Зміну величини манометричного тиску контролювали манометричним датчиком високого тиску, розташованим на з'єднувальному трубопроводі.

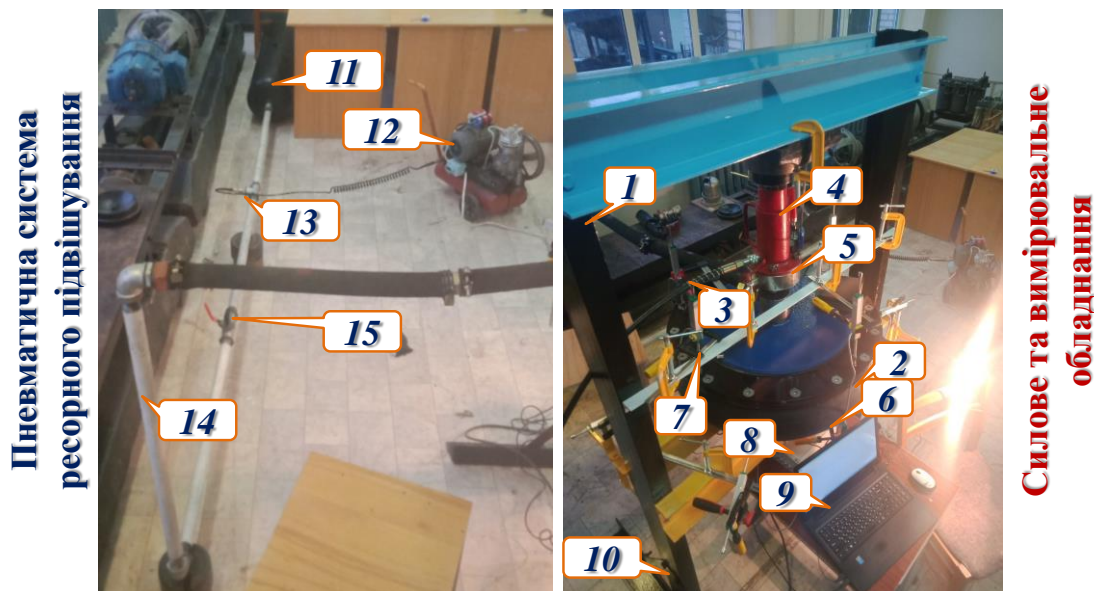


Рис. 2. Схема стенда для випробування пневматичної ресори швидкісного рухомого складу: 1 – П-подібна стійка; 2 – пневматична ресора швидкісного рухомого складу; 3 – ручний насос гідралічний із рукавом високого тиску; 4 – гідралічний домкрат; 5 – тензометричний датчик сили; 6 – прилад зчитування значень прикладеної сили; 7 – лінійні датчики переміщень; 8 – аналого-цифровий перетворювач; 9 – персональний комп’ютер; 10 – нерухома основа; 11 – додатковий резервуар; 12 – компресор; 13 – манометр; 14 – з’єднувальний трубопровід; 15 – кран



Рис. 3. Стани додаткового резервуара

Навантаження на пневматичну ресору задано гідравлічним домкратом, при цьому контролювали його значення тензометричним датчиком сили.

Деформації гумо-кордної оболонки виміряно аналоговими датчиками лінійних переміщень із використанням аналого-цифрового перетворювача та спеціального програмного забезпечення. Виміряні дані, збережені в пам'яті персонального комп'ютера, згодом аналізували.

Результати експериментальних досліджень. На основі проведених експериментальних досліджень отримано особливості деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори залежно від робочих станів додаткового резервуара. На

рис. 4–8 показано вплив додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки пневматичної ресори.

Із рис. 4 видно, що за манометричного тиску в ресорі 0,5 атм і вертикального навантаження 40,80 і 40,40 кН, що відповідає граничній роботі пневматичної ресори при вимкненому і ввімкненому додатковому резервуарі пневматичної системи ресорного підвішування відповідно, нижня частина гумо-кордної оболонки деформується на величину 22,96 мм (резервуар вимкнений) порівняно з 22,50 мм (резервуар ввімкнений).

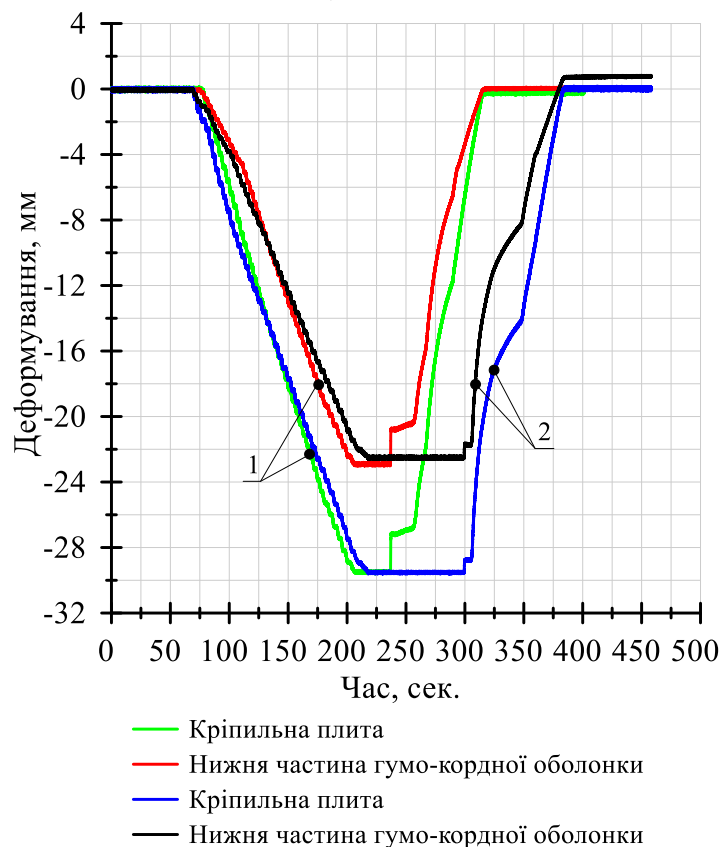


Рис. 4. Вертикальні переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 0,5 атм:

- 1 – додатковий резервуар вимкнено;
- 2 – додатковий резервуар ввімкнено

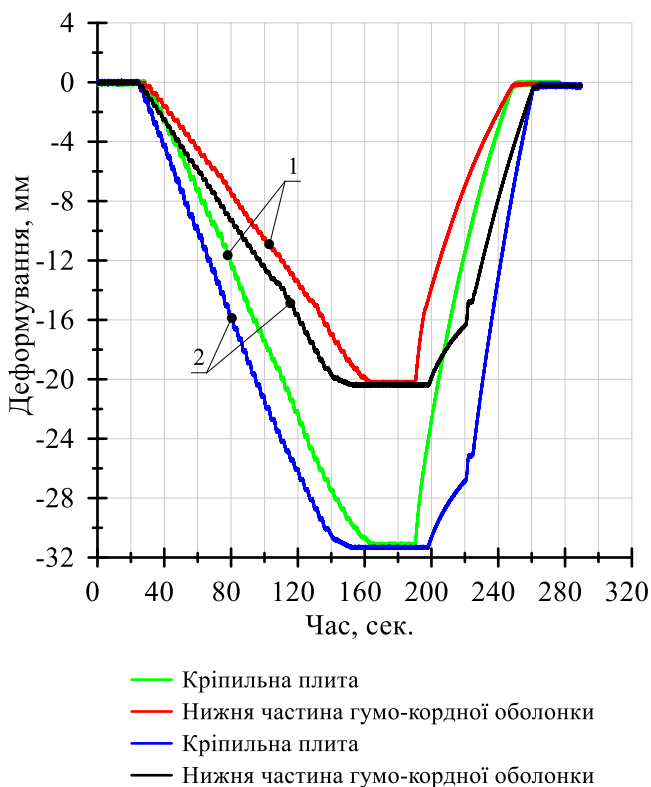


Рис. 5. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 1,5 атм:
1 – додатковий резервуар вимкнено;
2 – додатковий резервуар ввімкнено

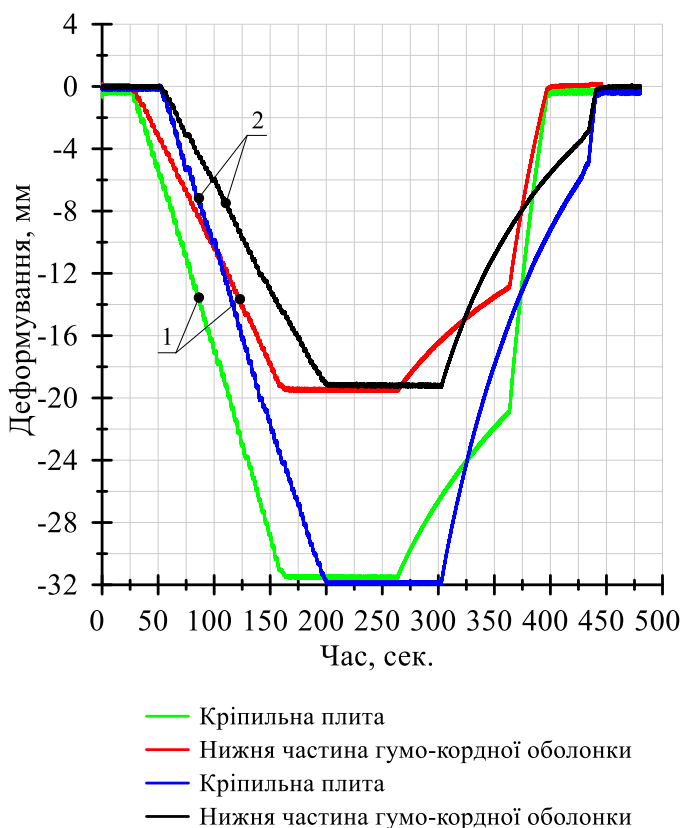


Рис. 6. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 2,5 атм:
1 – додатковий резервуар вимкнено;
2 – додатковий резервуар ввімкнено

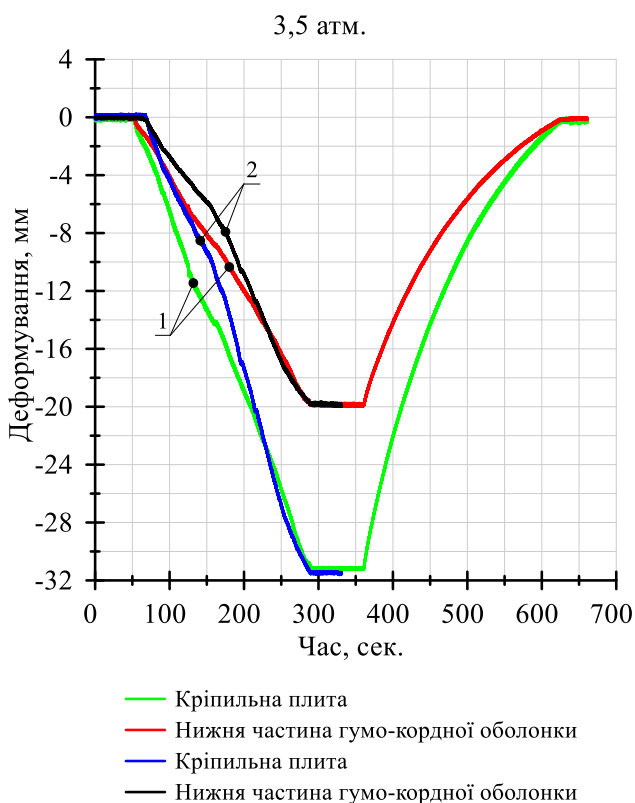


Рис. 7. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 3,5 атм:
1 – додатковий резервуар вимкнено;
2 – додатковий резервуар ввімкнено

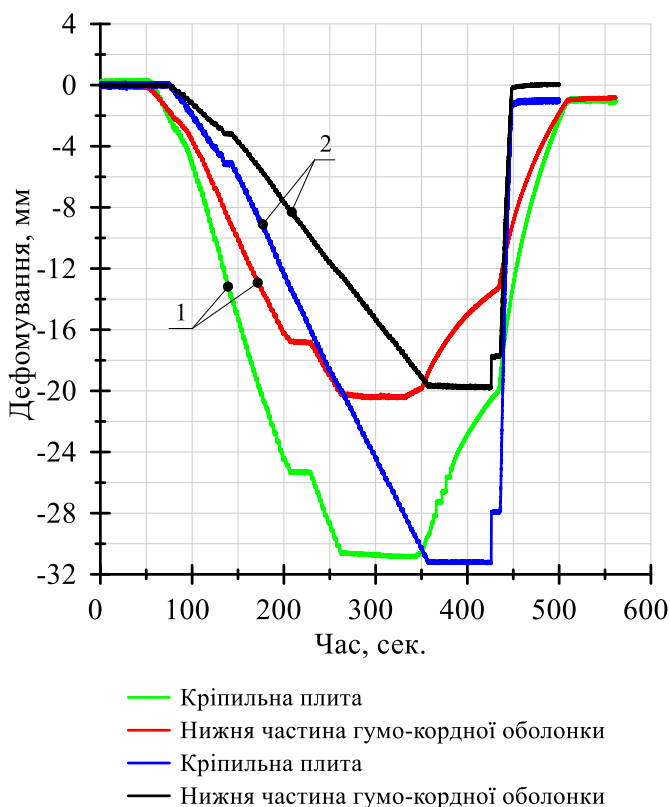


Рис. 8. Вертикальне переміщення кріпильної плити та деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки за манометричного тиску 4,5 атм:
1 – додатковий резервуар вимкнено;
2 – додатковий резервуар ввімкнено

При подальшому збільшенні манометричного тиску вплив додаткового резервуара на величину деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки не перевищує 3,46 %. Це дає змогу зробити висновок про незначний вплив додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування на вертикальні деформації

нижньої частини гумо-кордної оболонки пневматичної ресори.

При прикладанні на пневматичну ресору вертикального навантаження відбувається також деформування гумо-кордної оболонки в горизонтальному напрямку, характер зміни якого показано на рис. 9.

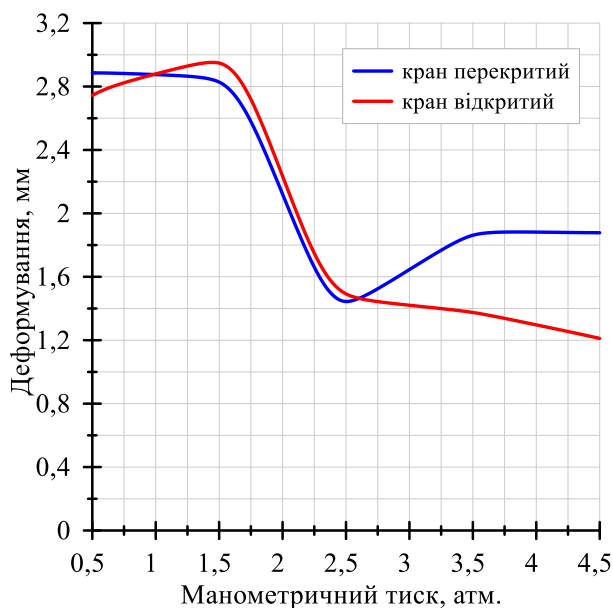


Рис. 9. Залежність деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку залежно від величини манометричного тиску

Аналізуючи рис. 9, встановлено, що в діапазоні зміни манометричного тиску 1,0÷2,5 атм наявність чи відсутність додаткового резервуара пневматичної системи ресорного підвішування має незначний вплив на величину деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку.

За манометричного тиску більше 2,5 атм перекриття крана до додаткового резервуара призводить до більшого деформування гумо-кордної оболонки порівняно з деформуванням при відкритому крані та ввімкненому додатковому резервуарі.

Висновки. Розроблено методологію експериментальних досліджень деформування гумо-кордної оболонки пневматичної

ресори у вертикальному та горизонтальному напрямках залежно від умов експлуатації пневматичної системи ресорного підвішування.

Встановлено, що вплив додаткового резервуара на величину вертикального деформування нижньої частини гумо-кордної оболонки не перевищує 3,46 %. Побудовано залежності деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку від величини манометричного тиску при ввімкненому та вимкненому додатковому резервуарі.

Зазначено, що в діапазоні манометричного тиску 1,0÷2,5 атм додатковий резервуар не має значного впливу

на величину деформування гумо-кордної оболонки пневматичної ресори в горизонтальному напрямку. За подальшого збільшення тиску перекриття крана до

додаткового резервуара призводить до більшого деформування гумо-кордної оболонки порівняно з деформуванням при відкритому крані.

Список використаних джерел

1. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Kovalchuk V., Dovhanyuk S., Voznyak O. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension. *BulTrans 2018: 10th Intern. Sci. Conf. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies*. Vol. 234 (2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823405003>.
2. Kuzyshyn A., Batig A., Kostritsa S., Sobolevska J., Dovhaniuk S., Dzhus V. Study of the Dynamic Behavior of Rolling Stock using a Computer Experiment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 15th Intern. Sci. and Techn. Conf. «Problems of the railway transport mechanics» (PRTM 2020)*. Dnipro, Ukraine (2020). Vol. 985. DOI 10.1088/1757-899X/985/1/012002.
3. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Stankevych V., Hilevych V. Determining patterns in the influence of the geometrical parameters of the connecting pipeline on the dynamic parameters of the pneumatic spring of railroad rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 1/7(121). P. 57–65. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274180>.
4. Кузишин А. Я., Костриця С. А., Соболевська Ю. Г., Батіг А. В. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4 (94). С. 25–42. DOI: 10.15802/stp2021/245974.
5. Facchinetti A., Mazzola L., Alfi S., Bruni S. Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*. 2010. Vol. 48. Is. sup1. P. 429–449. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.486036>.
6. Gao H. X., Chi M. R., Zhu M. H., Wu P. B. Study on different connection types of air spring. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 423–426. P. 2026–2034. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.2026>.
7. Sihong Z., Jiasheng W., Ying Z. Research on theoretical calculation model for dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (Harbin, 3-5 Sept. 2008). Harbin, 2008. P. 2–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc.2008.4677717>.
8. Li X., Wei Y., He Y. Simulation on polytropic process of air springs. *Engineering Computations*. 2016. Vol. 33. Is. 7. P. 1957–1968. DOI: <https://doi.org/10.1108/EC-08-2015-0224>.
9. Xu L. Mathematical modeling and characteristic analysis of the vertical stiffness for railway vehicle air spring system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 220. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2036563>.
10. Nakajima T., Shimokawa Y., Mizuno M., Sugiyama H. Air Suspension System Model Coupled With Leveling and Differential Pressure Valves for Railroad Vehicle Dynamics Simulation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 9. Is. 3. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026275>.
11. Qi Z., Li F., Yu D. A three-dimensional coupled dynamics model of the air spring of a high-speed electric multiple unit train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. 231(1). P. 3–18. DOI:10.1177/0954409715620534.

12. Zhu H., Yang J., Zhang Y., Feng, X. A novel air spring dynamic model with pneumatic thermodynamics, effective friction and viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*. 2017. 408. P. 87-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.015>.

Кузишин Андрій Ярославович, доктор філософії, доцент кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту національного університету «Львівська політехніка». ORCID 0000-0002-3012-5395. Тел.: +38(098)116-99-47. E-mail: andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua.

Ковальчук Віталій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту національного університету «Львівська політехніка». ORCID 0000-0003-4350-1756. Тел.: +38(097)223-72-43. E-mail: kovalchuk.diit@gmail.com.

Kuzyshyn A., PhD, Associate Professor, Department of Railway transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport. Lviv Polytechnic National University. ORCID 0000-0002-3012-5395. Tel.: +38(098)116-99-47. E-mail: andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua.

Kovalchuk V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Railway transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport. Lviv Polytechnic National University. ORCID 0000-0003-4350-1756. Tel.: +38(097)223-72-43. E-mail: kovalchuk.diit@gmail.com.

Статтю прийнято 15.05.2024 р.

УДК 629.4.014.2:621.89

ВПЛИВ НАВАНТАЖЕНЬ НА МОТОРНО-ОСЬОВИЙ ПІДШИПНИК ЛОКОМОТИВА, НА УМОВИ УТВОРЕННЯ МАСТИЛЬНОЇ ПЛІВКИ НА ПОВЕРХНЯХ ТЕРТЯ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, кандидати техн. наук В. О. Стефанов, С. В. Комар,
аспіранти А. Д. Савченко, О. О. Губін

IMPACT OF LOADS ON LOCOMOTIVE MOTOR AXLE BEARINGS ON THE CONDITIONS OF FORMATION OF OIL FILM ON FRICTION SURFACES

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech) V. Stefanov,
postgraduate student A. Savchenko, postgraduate student O. Hubin

***Анотація.** У процесі активної експлуатації локомотивів значна частка відмов (до 20 %) припадає на вихід із ладу моторно-осьових підшипників. Це зумовлено тим, що система змащування МОП є недосконалою, належна робота якої переважно залежить від багатьох факторів, таких як кліматичні умови, ступінь напрацювання мастильної оливи та змащувальних приладів тощо. Постає необхідність в удосконаленні сучасних систем змащування моторно-осьових підшипників ковзання. Одним із методів вирішення проблеми є розгляд факторів, що впливають на процес змащування робочих поверхонь тертя МОП та умови подавання мастильного матеріалу. У статті наведено розрахунок сил навантаження на МОП, їхній вектор дії та проаналізовано вплив цих параметрів на здатність утворення мастильної плівки на поверхнях тертя моторно-осьових підшипників. Для розрахунку було обрано тепловоз 2ТЕ116 із тяговими електродвигунами ЭД-118Б.*

***Ключові слова:** моторно-осьовий підшипник, підшипник ковзання, мастильна плівка, система змащування.*

Abstract. During the active operation of locomotives, a significant portion of failures (up to 20 %) is attributed to the malfunction of motor-axial bearings. This is due to the imperfection of the lubrication system of the motor-axial bearings, the proper functioning of which largely depends on various factors such as climatic conditions, the level of wear of lubricating oil, and lubrication devices, among others. There is a need to improve the existing lubrication systems for motor-axial sliding bearings. One of the methods to address this issue involves examining the factors influencing the lubrication process of the friction surfaces of motor-axial bearings and the conditions of lubricant material supply. The article provides calculations of the loading forces on the motor-axial bearings, their action vectors, and analyzes the impact of these parameters on the ability to form an oil film on the friction surfaces of motor-axial bearings. To determine the magnitude of the load, technical specifications of the locomotive were used, and the relationship between power usage and locomotive speed was analyzed. The study involved an analysis of recent publications regarding the generation of contact pressure force between the contact surfaces of friction pairs, the magnitude of which exceeds permissible limits, considered one of the primary factors leading to bearing failure. Additionally, the existing bearing lubrication system used on the locomotive was analyzed, its shortcomings were identified, and methods for addressing these issues were discussed. The calculations were performed for the 2TE116 locomotive with traction electric motors ED-118B, based on the operational characteristics of the locomotive in the speed range of 0-80 km/h.

Keywords: motor-axial bearing, sliding bearing, oil film, lubrication system.

Вступ. Деталі моторно-осьових підшипників (МОП) тягових електродвигунів локомотивів є високонавантаженими елементами екіпажної частини, які зазнають значного впливу динамічних навантажень, що виникають під час експлуатації локомотива. Ці несприятливі умови зберігаються в МОП за руху локомотива на швидкостях від 0 до 80 км/год. Система змащення МОП на тепловозах 2TE116 є однією з найдосконаліших систем змащення на сьогодні. Проте вона також має недоліки [1]. Одним із важливих недоліків можна вважати питання недостатнього подавання мастильного матеріалу до робочих поверхонь тертя і утворення мастильної плівки недостатньої товщини, адже наслідком стає пошкодження вкладишів МОП і зменшення їхнього ресурсу. Тому для вирішення питання, як позбутися цього недоліку, необхідно дослідити умови, що впливають на процес утворення мастильної плівки на поверхнях тертя моторно-осьових підшипників.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За останній час було проведено багато досліджень особливостей

змащування моторно-осьових підшипників. Сучасні системи змащування не відповідають повною мірою необхідному виду мащення робочих поверхонь тертя [1]. Найбільш сприятливий рідинний тип мащення виникає на невеликих проміжках експлуатації локомотива за визначених швидкостей руху [2]. У дослідженнях [3, 4] зазначено, що найчастіше відмови підшипників виникають при перевищенні допустимої величини тиску, що діє на площу поверхні тертя підшипника, що у свою чергу спричиняє його деформацію. У статті [5] автори розглядають питання покращення розподілу тиску на поверхнях тертя. У роботах [6, 7] автори розглядають питання використання насоса для подавання мастильного матеріалу до робочих поверхонь підшипників для забезпечення утворення достатньої мастильної плівки. Ці дослідження проведені для підшипників, що сприймають невеликі навантаження. Тези в цих публікаціях дадуть змогу провести дослідження для більш навантажених підшипників ковзання, яким є моторно-осьовий підшипник локомотива.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є дослідження дії сил навантаження, що виникають при русі тепловоза 2ТЕ116, і їхній вплив на умови утворення мастильної плівки на поверхнях тертя МОП. Для отримання результативності поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: дослідити ступінь навантаження підшипників МОП, визначити вектор дії навантажень, дослідити вплив питомого тиску на утворення мастильної плівки, проаналізувати в цілому систему змащення МОП на тепловозі 2ТЕ116 і визначити вектор її удосконалення.

Основна частина дослідження. Під час експлуатації локомотива на моторно-осьовий підшипник тягового електродвигуна діють різнонаправлені за вектором сили навантаження. Оскільки конструкція МОП несиметрична, то з боку тягового редуктора та колектора сила навантаження на МОП має різну величину. У цей час на поверхні тертя виникають протидійні контактні параметри.

За допомогою методики [8] і з використанням даних роботи [9] про величини навантаження F на вкладиші МОП тепловоза 2ТЕ116 проведено розрахунок питомих параметрів. До основних питомих параметрів можна віднести дугу контакту φ і величину тиску ρ .

Вираз для обчислення дуги контакту

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} [(1 - \mu_1^2) + (1 - \mu_2^2) \cdot \psi]} \cdot \alpha, \quad (1)$$

де μ_1, μ_2 – коефіцієнт Пуассона для матеріалів вкладиша та осі відповідно;

ψ – відношення модулів пружності матеріалів вкладиша та осі;

α – коефіцієнт контакту.

Відношення модулів пружності матеріалів вкладиша та осі

$$\psi = E_1/E_2, \quad (2)$$

де E_1, E_2 – модулі пружності матеріалів вкладиша та осі.

Коефіцієнт контакту

$$\alpha = \frac{\rho_0}{E_1 \cdot \varepsilon}, \quad (3)$$

де ρ_0 – навантаження на одиницю довжини підшипника;

ε – радіальний зазор сполучення.

Навантаження на одиницю довжини підшипника

$$\rho_0 = \frac{k \cdot F}{l}, \quad (4)$$

де F – навантаження на вкладиші МОП;

k – коефіцієнт нерівномірності прикладання навантажень через перекося;

l – довжина опорної частини шийки осі.

Радіальний зазор сполучення

$$\varepsilon = R_1 - R_2, \quad (5)$$

де R_1, R_2 – радіуси вкладишів і шийки осі.

Максимальний тиск у центрі контактної зони

$$\rho = \frac{2\rho_0}{\pi \cdot R_1 \cdot \sin \varphi_0}. \quad (6)$$

Результати розрахунку виконано за умови швидкості руху локомотива 10, 40 та 70 км/год та наведено (табл. 1, 2) залежно від напрямку руху.

З наведених у табл. 1, 2 даних можна зробити висновок, що відмінності, характерні для величин векторів навантажень двох підшипників одного комплексу, стосуються також і питомого тиску. Питомий тиск у більш завантаженого підшипника з боку редуктора в 1,7-2,0 рази перевищує значення тиску на поверхні вкладишу іншого – з боку колектора.

Таблиця 1

Параметри навантажень в МОП з боку редуктора

Швидкість локомотива, км/год	Параметри навантажень, що діють на поверхні вкладиша					
	F , кН	ρ_o , кН/м	α	$\sin \varphi_0$	φ_0 , град	ρ , мПа
Рух тепловоза тяговим електродвигуном попереду						
10	46,4	350	0,0056	0,1016	5,82	10,41
40	36,9	278	0,0045	0,0906	5,19	9,28
70	31,2	236	0,0038	0,0834	4,78	8,54
Рух тепловоза тяговим електродвигуном позаду						
10	33,0	248	0,0040	0,0856	4,91	8,77
40	23,3	176	0,0028	0,0721	4,13	7,38
70	15,8	119	0,0019	0,0593	3,40	6,08

Таблиця 2

Параметри навантажень в МОП з боку колектора

Швидкість локомотива, км/год	Параметри навантажень, що діють на поверхні вкладиша					
	F , кН	ρ_o , кН/м	α	$\sin \varphi_0$	φ_0 , град	ρ , мПа
Рух тепловоза тяговим електродвигуном попереду						
10	17,2	129	0,0021	0,0618	3,54	6,33
40	14,3	108	0,0017	0,0564	3,23	5,78
70	11,7	89	0,0014	0,0511	2,93	5,24
Рух тепловоза тяговим електродвигуном позаду						
10	6,3	48	0,0008	0,0375	2,15	3,85
40	5,9	44	0,0007	0,0362	2,08	3,71
70	5,2	39	0,0006	0,0341	1,95	3,49

Через нерівномірність розподілу навантажень постає питання розгляду характеру дії їхніх векторів і локалізації спричинених навантаженнями ділянок утворення зносу. Схеми дії векторів навантажень на МОП подані на рис. 1, 2, дані для побудови використовували з табл. 1, 2.

З отриманих даних про напрямки векторів дії та величину сил можна надати загальну характеристику навантажень, що діють на вкладиші МОП під час руху локомотива (рис. 3).

Загальний аналіз отриманих результатів вказує на таке:

- навантаження на моторно-осьовий підшипник з боку редуктора перевищують ті, що діють на інший МОП, у середньому в 2.5 раза за прямого руху та 3 рази – за зворотного;

- амплітуда кута φ вектора навантаження підшипника з боку редуктора в інтервалі швидкості руху тепловоза 10-70 км/год становить від 4 до 75⁰, а підшипника з боку колектора – від 9 до 17⁰.

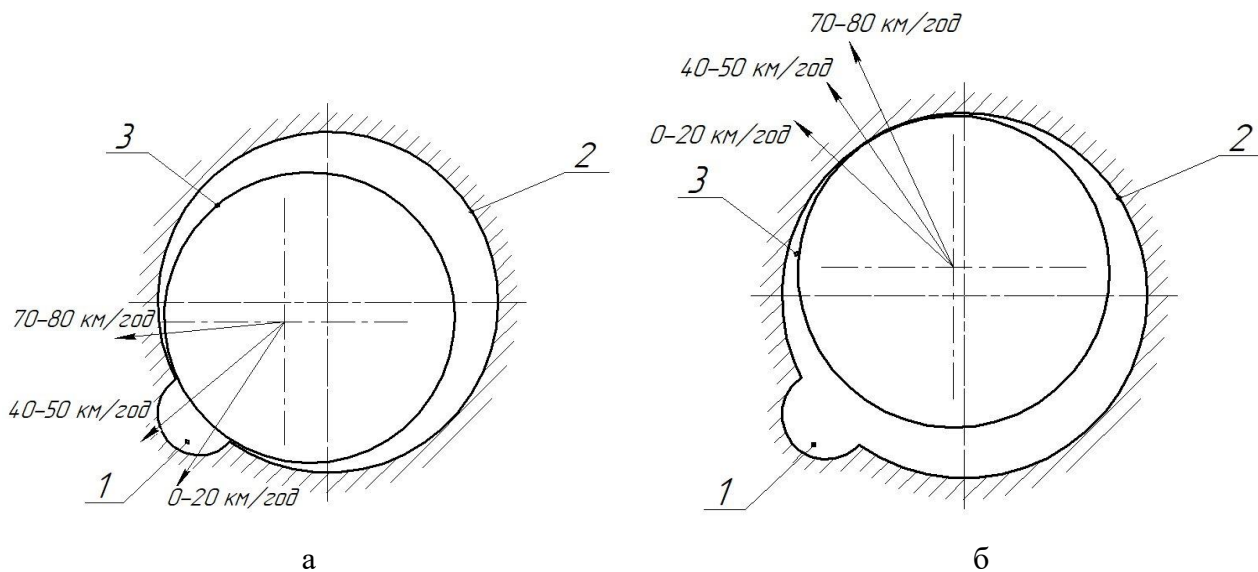


Рис. 1. Схема дії вектора навантажень на МОП з боку редуктора за різних величин швидкості руху локомотива:
 а – тяговим електродвигуном попереду; б – тяговим електродвигуном позаду;
 1 – мастильне вікно; 2 – вкладиші підшипника; 3 – вісь колісної пари

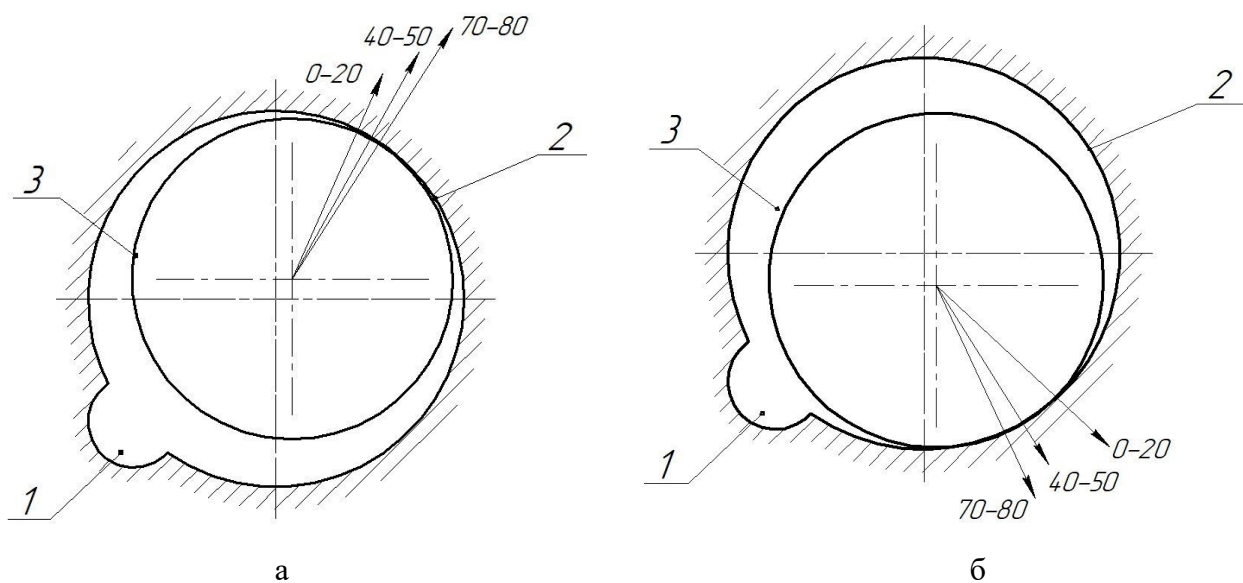


Рис. 2. Схема дії вектора навантажень на МОП з боку колектора за різних величин швидкості руху локомотива:
 а – тяговим електродвигуном попереду; б – тяговим електродвигуном позаду;
 1 – мастильне вікно; 2 – вкладиші підшипника; 3 – вісь колісної пари

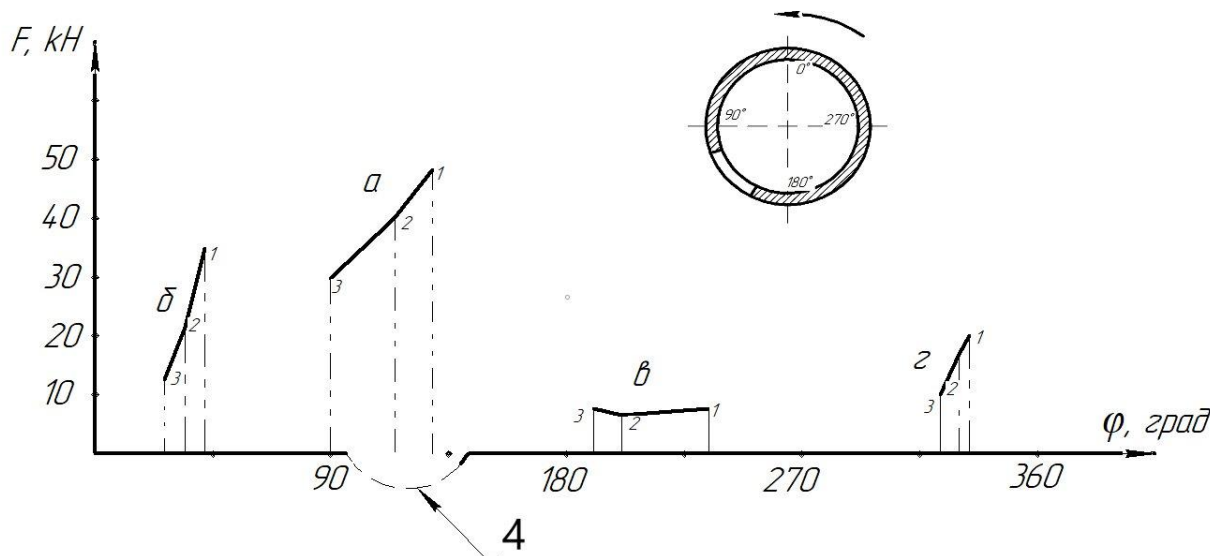


Рис. 3. Схема навантаження на розгортці вкладишів МОП за різних швидкостей руху локомотива:

а, б – МОП з боку редуктора за руху тяговим електродвигуном попереду та позаду відповідно; в, г – МОП з боку колектора за руху тяговим електродвигуном попереду та позаду відповідно; 1, 2, 3 – швидкість тепловоза відповідно 10, 40, 70 км/год; 4 – мастильне вікно

Слід зазначити, що умови утворення гідродинамічного (рідкого) мащення для підшипників не є однаковими. Для більш навантаженого (з боку редуктора) вони будуть складнішими через такі причини:

- найбільші за величиною навантаження діють переважно на опорну площу, послаблену вирізом під мастильне вікно, що призводить до максимальних величин питомого тиску;

- високий протитиск поблизу мастильного вікна теоретично не дає змогу організувати подавання мастила до пари тертя взагалі;

- за умови виникнення рідкого мащення через недостатній тиск у системі подавання оливи воно є нетривалим.

У свою чергу високий за величиною тиск p між робочими поверхнями тертя МОП впливає на утворення мастильної плівки товщиною h між елементами

підшипника та комплексний параметр режиму роботи пари тертя λ [8]:

$$\lambda = \eta \cdot \omega / p, \quad (7)$$

де η – динамічна в'язкість оливи;
 ω – швидкість ковзання;
 p – тиск між поверхнями тертя.

$$h = 0.5 \cdot \xi \cdot \Delta, \quad (8)$$

де ξ – відносна товщина мастильної плівки, яку визначають числом Зоммерфельда S ;
 Δ – діаметральний зазор.

Розрахунок товщини мастильної плівки виконано для більш навантаженого підшипника МОП з боку редуктора за умови, що діаметральний зазор $\Delta = 0,5$ мм (табл. 3).

Таблиця 3

Залежність товщини мастильної плівки та параметра режиму тертя від тиску між поверхнями тертя, $\Delta = 0,5$ мм

Швидкість руху локомотива, км/год	Тиск ρ , МПа	Комплексний параметр λ	Число Зоммерфельда S	Відносна товщина мастильної плівки ξ	Товщина мастильної плівки h , мкм
10	10,41	185	0,025	0,025	6
40	9,28	332	0,055	0,053	13
70	8,54	522	0,091	0,091	24

Аналізуючи отримані дані з табл. 3, можна дослідити залежність, що зі збільшенням швидкості питомий тиск між поверхнями тертя зменшується, водночас як товщина мастильної плівки та комплексний параметр режиму пар тертя збільшується, що означає перехід до сприятливішого режиму мащення МОП.

Отримані результати викликають необхідність дослідити систему змащування МОП для визначення напрямку подальшої роботи з вирішення проблеми недостатнього змащення підшипників ковзання.

На тепловозах 2ТЕ116 встановлена циркуляційна система змащування МОП. Вона є досконалішою порівняно з гнотовою системою, кількість відмов тягових електродвигунів зменшилася в декілька разів. Проте вона має деякі недоліки:

- подавання мастила в системі повністю залежить від кутової швидкості шийки колісної пари, незалежно від умов роботи підшипника;

- подавання мастила насосом починається за досягання швидкості руху тепловоза 25 км/год, до цього моменту змащення відбувається тільки польстерною системою;

- у свою чергу польстерна система не дає змогу подолати на поверхнях тертя режим масляного дефіциту, особливо після тривалої зупинки при початку руху локомотиву.

Як зазначено вище, продуктивність роботи масляного насоса циркуляційної системи прямо пропорційна швидкості руху локомотива. Така особливість конструкції не включає умови та складність режиму роботи підшипника. При цьому мастило в системі за режиму роботи методом переливу використовують нераціонально, внаслідок чого фактична товщина мастильної плівки на робочих поверхнях моторно-осьового підшипника є набагато меншою за значення, розраховані за номінальним об'ємом мастила, що циркулює в системі. Також дослідження показують, що номінальна продуктивність насоса у два рази менша за необхідну для забезпечення утворення гідродинамічного режиму мащення.

Аналізуючи недоліки, постає питання використання масляного насоса примусової дії, робота якого не залежить конструкційно від швидкості обертання шийки колісної пари.

Дослідження [6] в напрямі інтенсифікації подавання мастила до робочої зони підшипників дає змогу зробити висновок, що використання насоса для контролю об'єму та часу подавання мастила до пар тертя підшипників покращує не тільки роботу самих підшипників, а і властивості мастильного матеріалу.

Висновки. У процесі дослідження зроблено такі висновки:

1. Моторно-осьові підшипники тепловоза 2ТЕ116 навантажені нерівномірно. На підшипник з боку редуктора діють більші у 2-3 рази навантаження, ніж на підшипник з

боку колектора. Вектори дії навантажень направлені в різні боки і залежать від швидкості та напрямку руху тепловоза.

2. Високий питомий тиск між контактними поверхнями підшипника МОП, утворений за невеликих швидкостей руху локомотива, не сприяє утворенню стійкої мастильної плівки на

поверхнях тертя, що призводить до зменшення ресурсу самого підшипника.

3. Використання циркуляційного насоса примусової дії подавання мастила до МОП може подолати проблему підвищеного зносу та покращить умови утворення мастильної плівки між робочими поверхнями підшипника.

Список використаних джерел

1. Стефанов В., Савченко А. Аналіз існуючих систем змащування моторно-осьових підшипників. *Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference*. Copenhagen, Denmark. 2023. P. 403-404.
2. Астахов В. Н., Лысиков Е. Н., Коновалов П. Е. Оценка режимов трения и смазки в подшипниках осевого подвешивания локомотивов. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2011. № 40. С. 46-53.
3. Methodology for the assessment of equivalent load for self-lubricating radial spherical plain bearings under combined load / J. Aguirrebeitia et al. *Tribology International*. 2017. Vol. 105. P. 69-76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.028>. (last access: 09.04.2024).
4. Newly developed theoretical solution and numerical model for conformal contact pressure distribution and free-edge effect in spherical plain bearings / X. Fang et al. *Tribology International*. 2015. Vol. 84. P. 48-60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.11.020>. (last access: 09.04.2024).
5. Numerical simulation of sliding wear for self-lubricating spherical plain bearings / X. Shen et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012. Vol. 1, no. 1. P. 8-12. URL: [https://doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70003-0](https://doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70003-0). (last access: 11.04.2024).
6. Lubricant distributions and lubrication state under regular and quantitative oil supply / L. Wenzhe et al. *Tribology International*. 2023. Vol. 43, no. 5. P. 506-516. URL: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022002> (last access: 04.04.2024).
7. Груник І. С. Стендові випробування моторно-осьових підшипників локомотивів в умовах електростатичної обробки осьової оливи із присадкою. *Залізничний транспорт України*. 2013. № 2. С. 12-14.
8. Трение, изнашивание и смазка / В. В. Алисин и др. Москва: Машиностроение, 1979. 358 с.
9. Филонов С. П., Гибалов А. И., Быковский В. Е. Тепловоз 2ТЭ116. Москва: Транспорт, 1996. 334 с.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38 (068) 819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.

Комар Сергій Володимирович, кандидат технічних наук доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-8961-2614>.

Савченко Андрій Дмитрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-0418-3945. Тел.: +38(050) 90-58-406. E-mail: 0509058406a@gmail.com.

Губін Олександр Олександрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8451-5236. Тел.: +38(099)788-19-06. E-mail: sash.gubin95@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222.

E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Stefanov Volodymyr, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.

E-mail: vstef@ukr.net.

Sergii Komar, Candidate of Technical Sciences Associate Professor, Associate Professor of the department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-8961-2614>.

Andrii Savchenko, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-0418-3945.

E-mail: 0509058406a@gmail.com.

Hubin Oleksandr, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8451-5236.

E-mail: sash.gubin95@gmail.com.

Статтю прийнято 24.05.2024 р.

УДК 629.423.31

СИНТЕЗ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА NARMA-L2 ДЛЯ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Канд. техн. наук В. В. Панченко, асп. О. Г. Туренко

SYNTHESIS OF NARMA-L2 NEURAL CONTROLLER FOR TRACTION INDUCTION ELECTRIC DRIVE SYSTEM

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

Анотація. У сучасному світі, де технології швидко розвиваються, системи електропривода відіграють ключову роль у величезному спектрі застосувань – від промислових ліній виробництва до транспортних засобів і побутових пристроїв. Ці системи потребують високої ефективності, точності та надійності. Саме тут виникає необхідність удосконалення та оптимізації процесів керування електроприводами. У статті розглянуто застосування нейрорегулятора в системі тягового асинхронного електропривода. У середовищі Matlab/Simulink було розроблено імітаційну модель системи векторного керування тяговим асинхронним електродвигуном АД914-У і виконано синтез нейрорегулятора NARMA-L2 на основі моделі авторегресії з ковзним середнім і подано параметри навчання нейронної мережі. Для демонстрації можливостей нейрорегуляторів у системах керування тяговим електродвигуном було проведено порівняльне імітаційне моделювання нейрорегулятора NARMA-L2 і класичного пропорційно-інтегрального регулятора.

Результати імітаційного моделювання демонструють, що система з нейрорегулятором показує кращі показники регулювання заданих параметрів у перехідних режимах роботи електропривода і є перспективним інструментом при розробленні високопродуктивних та енергоефективних тягових електроприводів.

Ключові слова: тяговий асинхронний електродвигун, векторна система керування, нейрорегулятор, модель авторегресії з ковзним середнім, Deep Learning Toolbox.

Abstract. In today's world, where technology is developing rapidly, electric drive systems play a key role in a huge range of applications: from industrial production lines to vehicles and household appliances. These systems require high efficiency, accuracy and reliability. It is here that there is a need to improve and optimize the processes of controlling electric drives.

In recent decades, neural network controllers, or neuroregulators, have won their place in the world of automatic control. Their unique ability to model complex nonlinear dependencies makes them an ideal tool for applications in electric drive systems. Neuro-regulators can adapt to changing operating conditions, learn from data and optimize the control process depending on specific requirements and conditions.

This work is devoted to the possibility of using a neuroregulator in the traction asynchronous electric drive system. In the Matlab/Simulink environment, a simulation model of the AD914-U traction asynchronous electric motor vector control system described in the d, q rotating coordinate system was developed. The synthesis of the NARMA-L2 neuroregulator was performed, which combines the principles of the autoregressive model and the moving average model to provide prediction and control of complex processes. The main idea of this controller is to build a nonlinear transformation of input data that can predict the future states of the system. To demonstrate the capabilities of neuroregulators in traction electric motor control systems, comparative modeling of the NARMA-L2 neuroregulator and the classical proportional-integral regulator was conducted.

The results of simulation modeling show that the system with a neuro-regulator shows the best indicators of regulation of the given parameters in transient processes and is a promising tool in the development of high-performance and energy-efficient traction electric drives.

Key words: traction induction electric motor, vector control system, neuroregulator, autoregressive model with moving average, Deep Learning Toolbox.

Вступ. За останні десятиліття нейромережеві контролери, або нейрорегулятори, завоювали своє місце в системах автоматичного керування. Унікальна здатність моделювати складні нелінійні залежності робить їх ідеальним інструментом для застосування в системах електропривода. Нейрорегулятори можуть адаптуватися до змінних умов роботи, навчатися на основі даних і оптимізувати процес керування залежно від конкретних вимог і умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій показує значний інтерес дослідників до нейромережевих технологій у системах електропривода. Використовують нейромережі як у вигляді вбудованих у Matlab/Simulink нейрорегуляторів [4], так і з навчанням нейромережі в інших середовищах для

подальшої роботи в Matlab/Simulink [5]. Нейрорегулятори застосовують у системах керування кроковим двигуном для робота-маніпулятора [1], системах стабілізації [4], для керування вентиляно-реактивними двигунами [6] і в промислових електроприводах. Більшість робіт з дослідження роботи нейрорегуляторів із тяговим електроприводом були присвячені електромобілям [2, 3, 7, 8, 12]. Однак дослідженню роботи нейрорегуляторів із тяговим електроприводом рухомого складу залізниць присвячено лише невелику кількість робіт [10, 11]. Метою цього дослідження є спроба показати переваги використання нейрорегуляторів на прикладі системи векторного керування тяговим асинхронним електродвигуном АД914-У.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета – розглянути можливість застосування вбудованих у

програмне забезпечення Matlab/Deep Learning Toolbox нейрорегуляторів у системі керування тяговим асинхронним електроприводом.

Основна частина дослідження. За теорією автоматичного керування, асинхронний електродвигун (АД) являє собою складну нелінійну систему, описану рівняннями взаємодії статора та ротора

двигуна. Існує певна кількість математичних моделей для опису цієї взаємодії залежно від поставленого завдання дослідження АД. Для дослідження векторної системи керування використовують математичну модель АД в обертовій системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора d, q , яку можна описати системою рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = R_e i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} - \omega_k \sigma L_s i_{sq} - p \omega k_r \Psi_{rq}; \\ U_{sq} = R_e i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} + \omega_k \sigma L_s i_{sd} + p \omega k_r \Psi_{rd}; \\ \frac{d\Psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rd} + (\omega_k - p\omega) \Psi_{rq}; \\ \frac{d\Psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sq} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rq} - (\omega_k - p\omega) \Psi_{rd}; \\ M = \frac{3}{2} p k_r (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}); \\ M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

де $R_e = R_s + k_r^2 R_r$ – еквівалентний опір;

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – електромагнітна постійна часу

ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коефіцієнт розсіювання;

U_{sd}, U_{sq} – напруга статора по осях d та q відповідно;

i_{sd}, i_{sq} – струм статора;

Ψ_{rd}, Ψ_{rq} – потокозчеплення ротора;

L_s – індуктивність статора;

L_m – індуктивність розсіювання;

k_r – коефіцієнт зв'язку ротора;

ω_k – частота обертання системи координат;

ω – електрична частота обертання ротора;

p – кількість пар полюсів;

M – електромагнітний момент;

M_c – момент опору;

J – момент інерції.

Розглянемо можливості застосування нейрорегуляторів у системі тягового електропривода на прикладі системи з тяговим електродвигуном АД914-У. Застосування цього електродвигуна дасть змогу збільшити потужність і електромагнітний момент локомотива і працювати в широкому діапазоні кутової швидкості та навантажень. Основні технічні характеристики наведені в табл. 1.

Основні технічні характеристики АД914-У

Параметр	Значення
Номинальна лінійна напруга, В	1870
Частота струму статора, Гц	55,9
Потужність на валу, кВт	1200
Номинальний струм, А	450
Номинальний момент, Н·м	10400
Частота обертання ротора, об/хв	1140
ККД	0,955
Коефіцієнт потужності	0,870
Активний опір фази статора, Ом	0,0026
Активний приведенний опір обмотки ротора, Ом	0,0181
Індуктивний опір фази статора, Ом	0,213
Індуктивний приведенний опір обмотки ротора, Ом	0,161
Індуктивний опір намагнічуючого контуру, Ом	6,48

У бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab подано три типи нейрорегуляторів: регулятор на основі еталонної моделі Model Reference Controller, регулятор на основі авторегресії з ковзним середнім NARMA-L2 Controller і регулятор із передбаченням NN Predictive Controller. NARMA-L2 є одним із найбільш доречних

методів керування нелінійними системами, що змінюються залежно від часу. Проектування NARMA-L2 складається з двох основних кроків. Першим кроком є визначення системи, якою потрібно керувати. Другим кроком є синтез системи керування. Модель NARMA [9] може бути подана як

$$y(k+d) = N[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)], \quad (2)$$

$$u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)$$

де $u(k)$ – вхід системи;

$y(k)$ – вихід системи;

m – ціле число, що показує затримку вхідного сигналу;

n – ціле число, що показує затримку вихідного сигналу;

d – відносний ступінь.

На вході в систему є контрольний набір, і коли система слідує цьому посилянню, структура контролера може бути продемонстрована у рівнянні

$$u(k) = G[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]. \quad (3)$$

Нейронну мережу використовують для мінімізації середньої квадратичної помилки, визначеної функцією G . З іншого боку, для навчання нейронної мережі

використовували алгоритм зворотного поширення.

Після визначення функції G NARMA-L2 можна записати

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] + g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-m+1)] \cdot u(k) \quad (4)$$

Перевага рівняння (4) полягає в тому, що його можна розв'язати для керуючого введення, що змушує системний вихід

слідувати еталонному. Отриманий вираз регулятора

$$u(k) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]} \quad (5)$$

У реальній системі входи, підключені до виходу, не визначені одночасно. Тому

при значенні d більше двох використовують рівняння

$$y(k+d) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)] + g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)] \cdot u(k+1) \quad (6)$$

У цьому випадку структура NARMA-L2 буде виглядати як показано в рівнянні

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]} \quad (7)$$

На рис. 1 зображено узагальнену форму структури NARMA-L2 і спосіб

підключення регулятора після завершення навчання нейромережі.

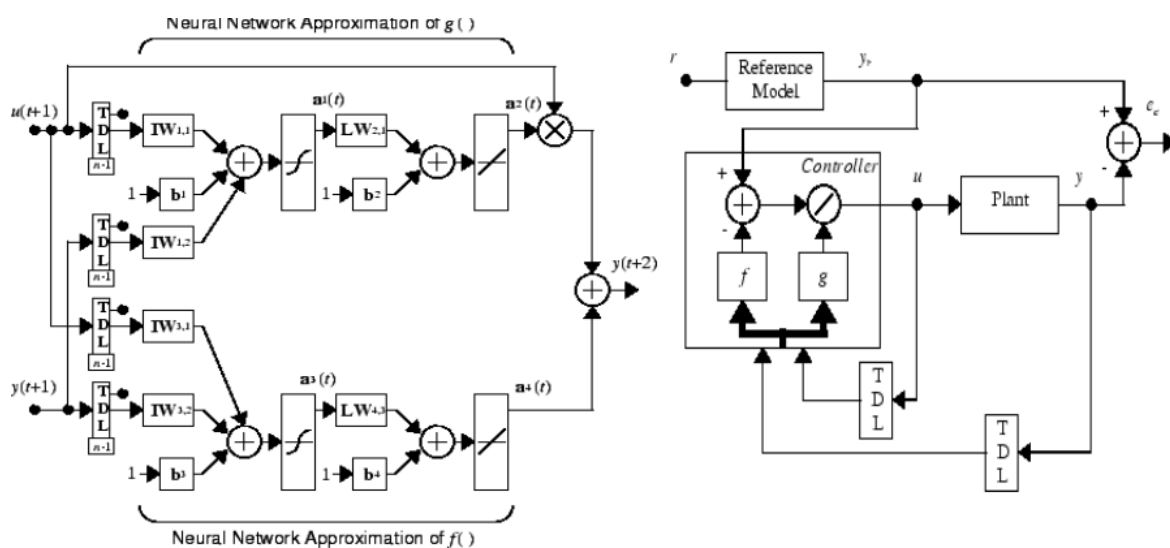


Рис. 1. Узагальнена форма структури NARMA-L2 і спосіб підключення регулятора

На основі системи рівнянь (1) було розроблено імітаційну модель системи векторного керування тяговим електро-

двигуном АД914-У з нейрорегулятором NARMA-L2 (рис. 2).

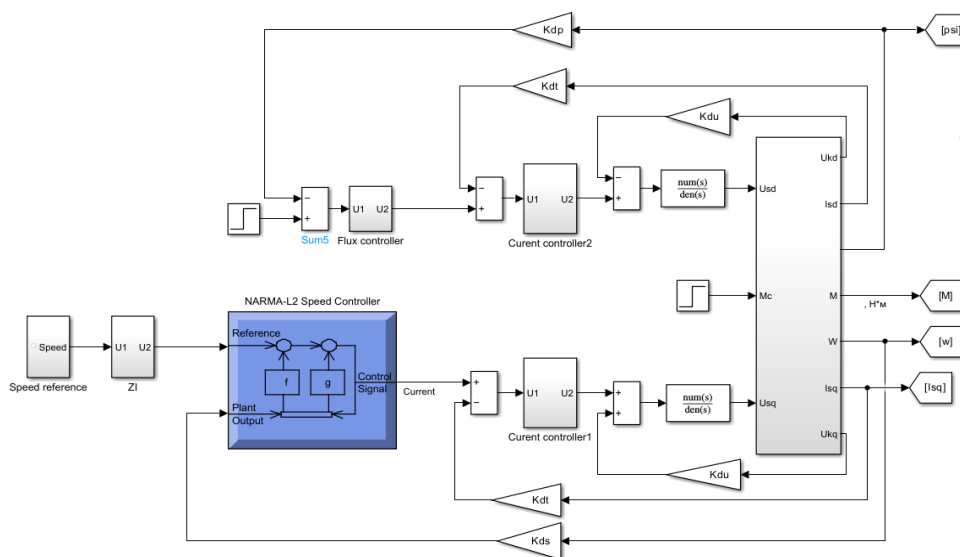


Рис. 2. Імітаційна модель векторного керування з нейрорегулятором NARMA-L2

Синтез нейрорегулятора NARMA-L2 починається з заповнення даних у вікні ідентифікації об'єкта керування (рис. 3). Це вікно може бути використане для побудови нейромережевої моделі динамічного

об'єкта, описаного в Simulink. Для навчання нейронної мережі було обрано 40000 тренувальних точок, які знімали через інтервал 0,01 с, 1000 циклів навчання і алгоритм Левенберга-Марквардта.

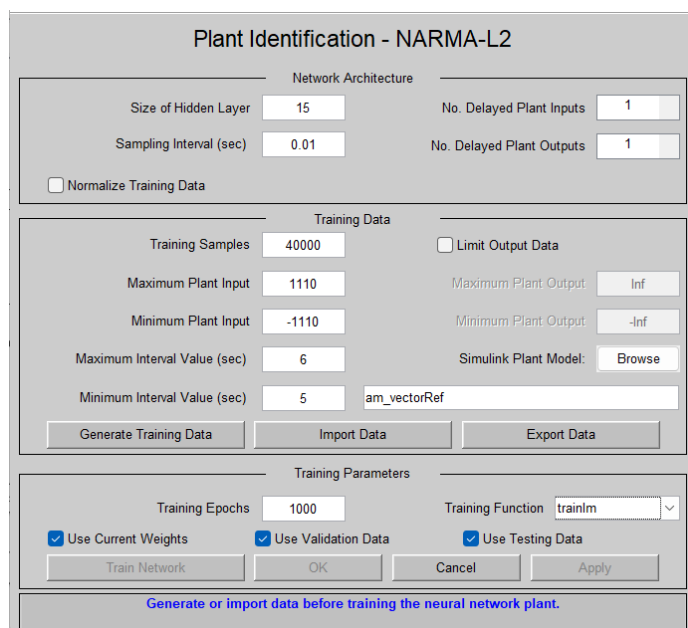


Рис. 3. Вікно ідентифікації об'єкта керування

У результаті навчання нейромережі похибка регулювання частоти обертання складала 10 об/хв, для чого було здійснено 70 навчальних циклів.

Для демонстрації можливостей нейрорегулятора NARMA-L2 проведемо порівняльне імітаційне моделювання

системи векторного керування з нейрорегулятором швидкості та ПІ-регулятором. Результати моделювання наведені на рис. 4. Червоним кольором позначені характеристики електродвигуна з нейрорегулятором швидкості, а синім – із ПІ-регулятором.

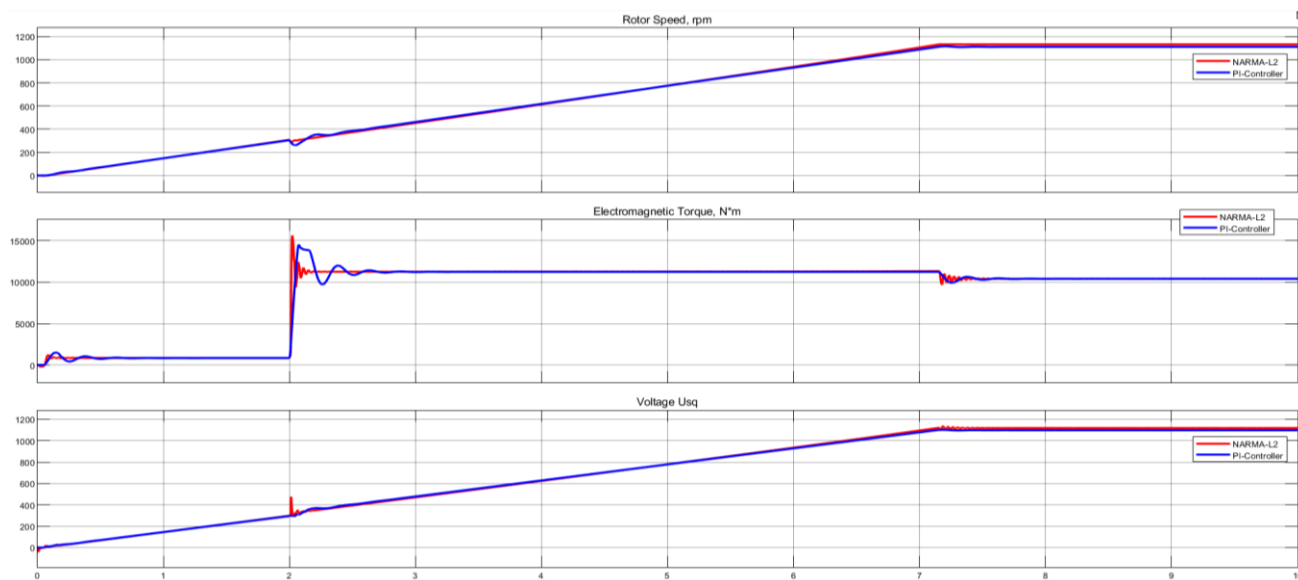


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання з нейрорегулятором і ПІ-регулятором

Як видно з рисунка, застосування нейрорегулятора в системі керування дає змогу позбутися просадки частоти обертання при накиданні навантаження, підвищити точність її регулювання, значно зменшити коливання електромагнітного моменту в перехідних режимах роботи електропривода. Однак за стрибкоподібного накидання навантаження має місце значна пульсація напруги U_{sq} .

Висновки. У роботі було виконано синтез нейрорегулятора швидкості на основі авторегресії з середнім NARMA-L2, реалізованого в бібліотеці Deep Learning Toolbox середовища Matlab для демонстрації можливостей нейрорегуляторів у

системі керування тяговим електродвигуном. У Simulink була розроблена імітаційна модель векторного керування тяговим асинхронним електродвигуном АД914-У. Порівняльне імітаційне моделювання показало переваги нейрорегулятора над ПІ-регулятором при регулюванні параметрів у перехідних режимах роботи електропривода.

Дослідження показало перспективність використання нейрорегулятора в системі тягового електропривода. Подальші дослідження будуть спрямовані на включенні рухомого складу до такої системи.

Список використаних джерел

1. Gundogdu A., Celikel R. (2021). NARMA-L2 controller for stepper motor used in single link manipulator with low-speed-resonance damping. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 24(2): 360–371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.09.008>.
2. Kanchev H., Hinov N., Gilev B. & Francois B. (2018). Modelling and Control by Neural Network of Electric Vehicle Traction System. *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 24(3). 23-28. URL: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.24.3.20974>.
3. Haddoun A., Benbouzid M. E. H., Diallo D., Abdessemed R., Ghouili J. and Srairi K. Modeling, Analysis, and Neural Network Control of an EV Electrical Differential. *Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 55, no. 6. P. 2286-2294. June 2008. DOI:10.1109/TIE.2008.918392.
4. Кузнецов Б., Василець Т., Варфоломієв О. Синтез нейрорегулятора Model Reference Controller для системи наведення та стабілізації. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 5. С. 47–54.
5. Обруч І. В. Синтез електромеханічних систем з нейронною мережею та фрикційним навантаженням: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.03. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. 188 с.
6. Лозинський А., Бобечко Ю. Синтез нейрорегулятора для формування жорстких характеристик вентиляного реактивного двигуна. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. № 4 (80). С. 51-55.
7. Choo K. M., Won C. Y. Design and Analysis of Electrical Braking Torque Limit Trajectory for Regenerative Braking in Electric Vehicles with PMSM Drive Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 35(12). 13308–13321.
8. El-bakkouri J., Ouadi H., Saad A. Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Based controller for Electric Vehicle's hybrid ABS braking. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. 55. 371–376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.340>.
9. MathWorks Help Center Deep Learning Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/design-narma-l2-neural-controller-in-simulink.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_narma.
10. Kutovoj Y., Kyrylenko Y., Obruch I., Kunchenko T. Application of intelligent control systems in electric drives of rail vehicles. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) – Conference Proceedings*. 2021. P. 709–713. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570026.
11. Kyrylenko Y., Kutovyi Yu., Obruch I., Kunchenko T. Neural Network Control of a Frequency-Regulated Electric Drive of a Main Electric Locomotive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240880.
12. Воробйов Б., Сенченко С., Пшеничников Д., Ліхно Я., Хань Л. Система запобігання буксування електромобіля на основі контролера нейронної мережі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2023. 1(15). 3–11. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.01>.

Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Туренко Олександр Геннадійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7592-7455.

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

Panchenko Vladyslav, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

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, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-7592-7455. Tel.: +380950539075. E-mail: aleksandrturenko97@gmail.com.

Статтю прийнято 14.06.2024 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 629.331:656.11

ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Канд. техн. наук І. О. Хітров

RESEARCH OF THE NOISE LOAD OF VEHICLES

PhD (Tech.) I. Khitrov

***Анотація.** У цьому дослідженні проведено аналіз причини утворення автомобільного шуму і джерел шуму. Методика дослідження включала вимірювання рівня шуму в різних точках салону автобуса за допомогою спеціалізованого акустичного обладнання. Визначено допустимий рівень шумового навантаження в салоні автобуса за різних умов експлуатації: міський і позаміський рух, простій. Встановлено, що шум у салоні автобуса може досягати значних рівнів під час руху, що може створювати дискомфорт для пасажирів і водія.*

***Ключові слова:** транспортний засіб, шумове навантаження, джерело шуму, шумомір, рівень шуму.*

***Abstract.** Noise can be viewed as an undesirable component of a signal that can affect the quality of perception or transmission of information in a system. In different contexts, the term «noise» may have different meanings, but a common feature is the random impulsive nature of this phenomenon.*

Automotive noise is sound energy generated by the movement of a vehicle and its components. The study of road traffic noise is an important area, especially in environments where noise can have a significant impact. This includes analyzing noise levels, identifying noise sources, assessing its impact on the environment, and developing strategies to reduce noise.

This study analyzes the causes of automobile noise and their noise sources, and provides classification features. The research methodology included measuring the noise level at different points of the bus interior using a specialized acoustic sound level meter Testo 816. The Sound Meter program was additionally used to obtain current time values of noise level changes with graphical data interpretation.

When the bus is idling, a monotonous noise load level in the range of 58-63 dB is observed in the cabin, which is typical for a running diesel engine, which is the main source of noise. The movement of the bus in urban conditions is accompanied by a change in traffic conditions, which in turn increases the maximum noise load to 73 dB. The movement of the bus in the city is accompanied by an increase in the noise load up to 74 dB and the equivalent up to 67 dB. This is due to an increase in speed, contact of tires with the asphalt road, interaction of the air environment with bus elements, the appearance of vibrations and other noises.

Although the noise load in the bus interior is within the upper permissible limits, it requires the introduction of noise reduction measures, especially for long-distance buses for a comfortable ride for passengers.

Therefore, it is important to take noise levels into account when designing and operating vehicles, as well as when planning urban infrastructure projects.

Keywords: *vehicle, noise load, noise source, sound meter, noise level.*

Вступ. Автомобільна промисловість відіграє ключову роль у впровадженні інновацій і розвитку технологій для зменшення шумового навантаження довкілля. Виробники постійно працюють над удосконаленням систем управління шумом і використанням новітніх матеріалів, розробленням ефективних систем зниження звуку, «тихих» конструкцій та інших інноваційних рішень [1].

Зменшення шуму від діяльності автомобільного транспорту складає загальний контекст сталого розвитку і створення більш екологічно чистих і життєздатних міських умов, адже високі рівні шуму можуть викликати стрес та інші негативні впливи на фізичне та психічне здоров'я [2].

Отже, дослідження шуму автомобілів має велике значення для забезпечення сталого розвитку, здоров'я населення та поліпшення якості життя. Вони визначають і формують стратегії для зменшення негативних впливів шуму і сприяють технічному прогресу в автомобільній індустрії та побудові екологічно чистих просторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження шумового навантаження автомобільного транспорту є важливою галуззю, особливо в умовах, де шум може мати значний вплив. Це включає аналіз рівнів шуму, визначення джерел шуму, оцінювання його впливу на оточення та розроблення стратегій для зменшення шуму.

Науковці О. С. Миронюк, В. В. Шевчук та В. В. Грабовець дослідили шумове поле легкових автомобілів. Встановлено, що для зниження загального рівня шуму легкового автомобіля без зниження рівня його джерела можна досягти завдяки перерозподілу енергії шуму [3].

У статті [4] розглянуто і оцінено шум, який видають транспортні засоби, залежно

від типу дорожнього покриття і швидкості руху. Дослідження показали, що зниження шуму можна досягти шляхом зменшення швидкості руху транспортних засобів.

Дослідження [5] являє собою новий напрям оцінювання шуму шляхом аудіоперевірки транспортних засобів як інструменту ідентифікації.

У статтях [6, 7] дослідники розкривають проблему шумового забруднення міст із дослідженням методів їх вирішення.

Дослідження шуму дає змогу розробити і впровадити нові технології та стратегії для зменшення шуму в салоні автобуса, що сприяє покращенню умов для пасажирів і водія.

Визначення мети та завдання дослідження. Головна мета дослідження полягає в розкритті проблеми шумового забруднення від діяльності автомобільного транспорту. Для досягнення сформульованої мети з'ясуємо причини утворення автомобільного шуму, проаналізуємо нормативне забезпечення щодо встановлення допустимого рівня транспортного шуму та визначимо рівень шумового навантаження в салоні автобуса.

Основна частина дослідження. Шум – це акустичне явище, пов'язане зі звуковими хвилями, які рухаються через середовище і сприймаються об'єктами або людьми в цьому середовищі. Шум – це випадковий, неправильний сигнал або перешкода, яка виникає при роботі в різних системах, механізмах, джерелах тощо. У контексті звуку шум визначають як непотрібний акустичний сигнал, який може бути спричинений різними джерелами, такими як механізми, природні явища або інші джерела.

Шум можна розглядати як небажану складову сигналу, яка може впливати на якість сприйняття або передавання інформації в системі. У різних контекстах

термін «шум» може мати різні значення, але загальною ознакою є випадковий імпульсний характер цього явища.

Автомобільний шум – це звукова енергія, генерована рухом автомобіля та його компонентів (рис. 1).

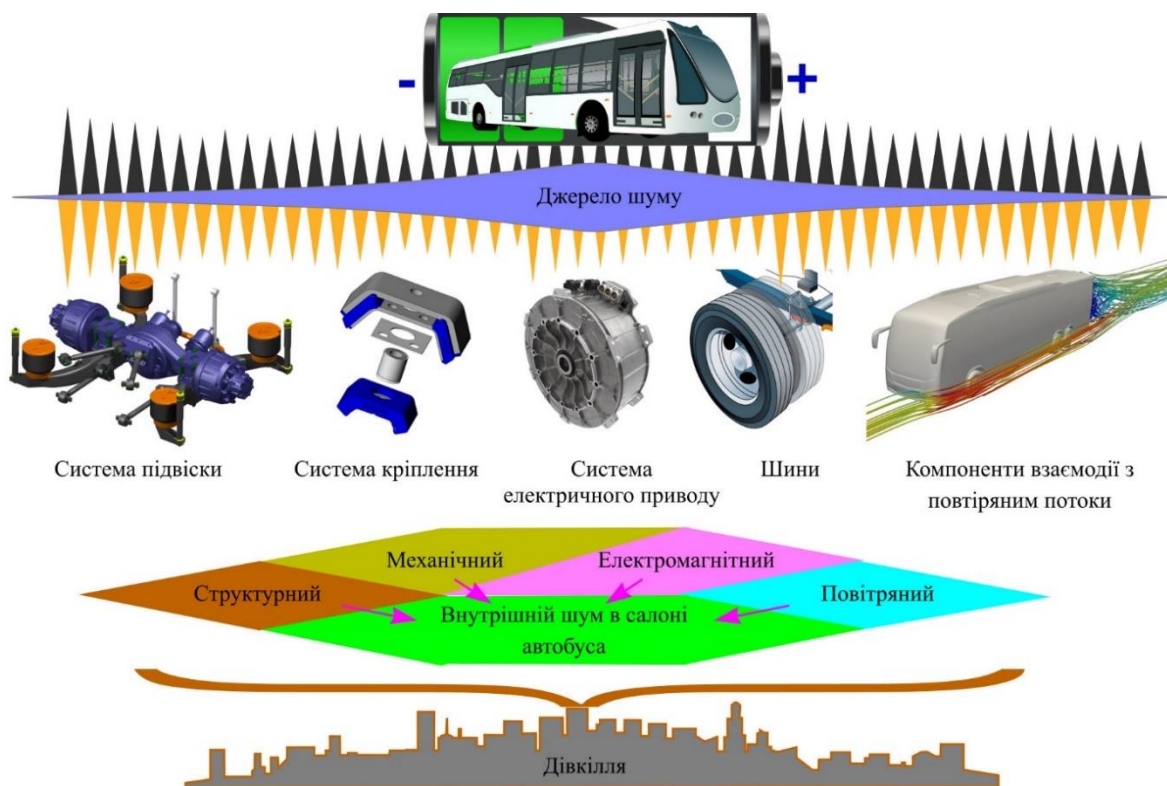


Рис. 1. Джерело шуму автомобільного транспорту

Основні джерела автомобільного шуму включають шум роботи силової установки (він може бути спричинений внутрішнім згорянням пального та рухом механічних частин двигуна), шум коліс і дорожнього покриття (звук, який виникає внаслідок контакту шин із дорожнім покриттям, нерівності на дорозі, ями та інші дефекти можуть збільшувати цей вид шуму), шум вітру (звук, створений опором повітря під час руху автомобіля, дизайн кузова та вікна може впливати на рівень цього шуму) і роботи вихлопної системи (звук, вироблений внаслідок виведення вихлопних газів із двигуна через вихлопну систему) та інші. Різні джерела взаємодіють між собою, створюючи загальний широкий акустичний фон, який сприймається як загальний шум автомобіля.

Шум може бути класифікований за різними критеріями, включаючи природу та джерело виникнення (рис. 2). Розкриємо їхню сутність у розрізі роботи автомобільного транспорту.

За характером спектра автомобільний шум поділяють на компоненти частот [8]:

- низькочастотний шум (низькі частоти). Зазвичай пов'язаний із роботою двигуна та рухом трансмісії. Низькі частоти можуть виникати внаслідок нерівностей на дорозі, аеродинамічного шуму та інших факторів;

- середньочастотний шум (середні частоти). Може бути пов'язаний із рухом коліс, витратами повітря від вентиляційних отворів, роботою підвіски та іншими механічними компонентами;

- високочастотний шум (високі частоти). Виникає внаслідок механічного тертя, руху елементів підвіски,

аеродинамічних вихорів та електричного шуму в системі електроніки автомобіля.



Рис. 2. Класифікаційні ознаки видів шуму автомобіля

Поділ автомобільного шуму за спектральним характером є важливим для розуміння його джерел і ефективного контролю та зменшення. Заходи для зниження автомобільного шуму можуть включати використання акустичних матеріалів для ізоляції, оптимізацію аеродинамічного дизайну, поліпшення механізмів підвіски та інші технічні рішення.

Тональний і широкосмуговий шум – це два різних типи акустичного шуму, визначені характером їхніх частотних характеристик.

Тональний шум має чітко виражений частотний пік або декілька піків у вузькому діапазоні частот (це означає, що існує певна частота або набір частот, на яких звук особливо виділяється або зосереджується).

Прикладом тонального автомобільного шуму може бути звук, який виникає внаслідок неоднорідностей або дефектів у роботі автомобільного двигуна чи його

компонентів. Це може включати певні частоти або їхні гармоніки, які виробляються під час роботи окремих механізмів.

Наприклад, якщо є проблема з певною частиною двигуна або системи випуску, це може призводити до звуків, які мають характеристичний тон або певні тонові компоненти. Це може бути спричинене нерівномірністю обертання валів, вібрацією або іншими аномаліями в роботі механізмів.

Такий тип звуку може виявити несправність або потребу в обслуговуванні транспортного засобу. Наприклад, підвищений тон може свідчити про проблему з вихлопною системою, а гудіння на певних обертах – проблему з підшипниками чи іншими механізмами.

Широкосмуговий шум являє собою рівномірно розподілене випадкове коливання частот у широкому діапазоні (енергія розподілена рівномірно за всією шириною частот). Прикладом широкосмугового шуму є звук,

створюваний від контакту автомобільних шин із дорожньою поверхнею (деякі звуки можуть бути пов'язані з витратами повітря під час їзди або зі структурою дороги).

Гучність звуку (шуму) переважно залежить від інтенсивності та розподілу енергії звукових коливань за шкалою частот [9, 10]. Окрім того, на гучність впливають його локалізація у просторі, тривалість впливу, маскувальна дія інших звуків та інші фактори. Поділяють шум (звук) за його гучністю на рівні (як правило, вимірюють в

одиницях децибелів, дБ): тихий (звук, який є ледь чутний або може викликати труднощі в сприйнятті); помірний (середня гучність, за якої звук є комфортним для слухача і може бути легко розпізнаним); голосний (звук, який відчутно виражений, але не завдає дискомфорту); дуже голосний (звук, який привертає значну увагу і може завдавати дискомфорт) і надзвичайно голосний (екстремально висока гучність, що може бути навіть болісною або шкідливою для слуху) (рис. 3).

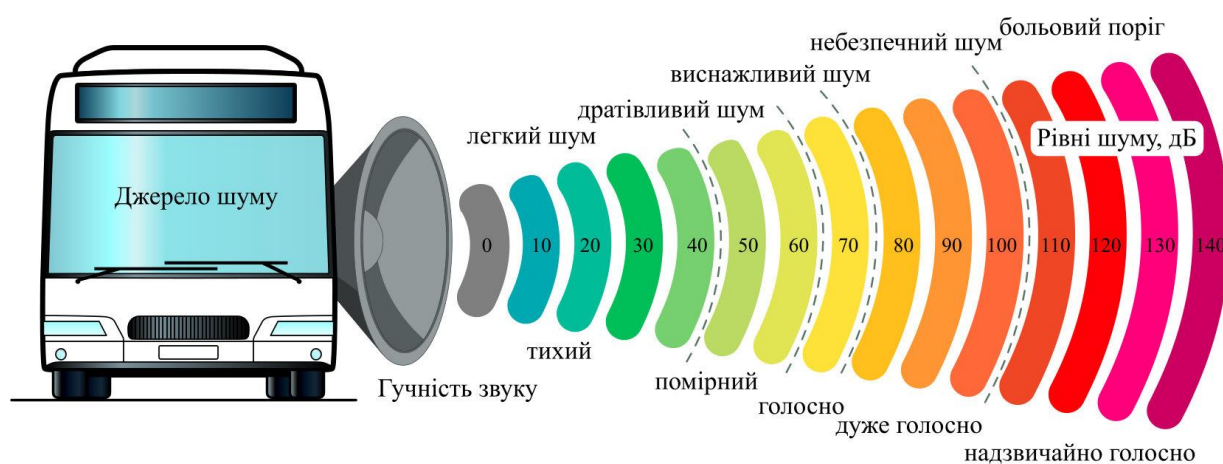


Рис. 3. Поділ шумового забруднення за рівнями

Механічний шум виникає внаслідок механічних коливань і рухів об'єктів (вузлів, механізмів, деталей) або матеріалів. Джерелом такого шуму є постукування і тертя деталей, переміщення газів або рідин (рух газів або рідин через труби чи канали може створювати шум, особливо якщо цей рух є турбулентним або ударним), коливання механізмів (рух механічних частин або механізмів може викликати коливання, що перетворюється у звукові хвилі), робота механічних пристроїв (деякі механічні пристрої, такі як насоси, компресори, електродвигуни і т. д., виробляють специфічний шум внаслідок своєї роботи), удари та вібрації (вони можуть генерувати акустичні хвилі, які спричиняють механічний шум).

Ураховуючи «механічну» природу конструктивного шуму автомобіля, такий шум є переважаючим.

Інший розповсюджений вид шуму – аеродинамічний шум автомобіля, який виникає внаслідок взаємодії потоку повітря з його зовнішніми елементами під час руху. Цей тип шуму може бути відчутним, особливо за високих швидкостей. Вплив аеродинамічного шуму автомобіля визначений формою кузова (турбулентність і вихори повітряного потоку), деталями екстер'єру (дзеркала, дефлектори, антени та інші елементи призводять до додаткових шумових явищ), швидкістю автомобіля (із збільшенням швидкості руху автомобіля зростає опір повітря, що викликає збільшення аеродинамічного шуму).

Електромагнітний шум у контексті автомобілів часто належить до шуму, який виникає в електричних або електронних системах автомобіля. Зазвичай це пов'язано зі споживанням електричної енергії та роботою електричних пристроїв.

Нормування рівнів шуму автомобільного транспорту регульовано різними стандартами та нормами, які встановлюють максимально припустимі рівні звукового тиску для різних типів транспортних засобів і за різних умов експлуатації [11-13]. Основні аспекти нормування шуму автомобілів включають:

- зовнішній шум автомобіля (стандарти встановлюють максимально припустимі рівні шуму, які може створювати автомобіль під час руху). Це може включати різні види шуму, такі як шини, силова установка, вихлопна система, аеродинамічний шум та ін.;

- шум у салоні автомобіля (внутрішній шум в автомобілі теж може бути

регульованим параметром). Стандарти можуть визначати максимальні рівні шуму, спричинені роботою різних систем у салоні, таких як кондиціонер, радіо, система вентиляції тощо;

- методи вимірювання (стандарти визначають методи вимірювання рівнів шуму, щоб забезпечити однозначність і порівняння між різними автомобілями та умовами).

Рівень зовнішнього шуму від діяльності рухомого складу різних видів транспорту не має перевищувати 78-94 дБ з меншими значеннями для пасажирського транспорту і легкових автомобілів (рис. 4).

Рівень внутрішнього шуму характеризується нижчими значеннями. Наприклад, у салоні легкового автомобіля – близько 60 дБ; салоні тролейбуса – 78 дБ, при відчиненні та зачиненні дверей автобусами різке зростання шуму – до 90 дБ [14].

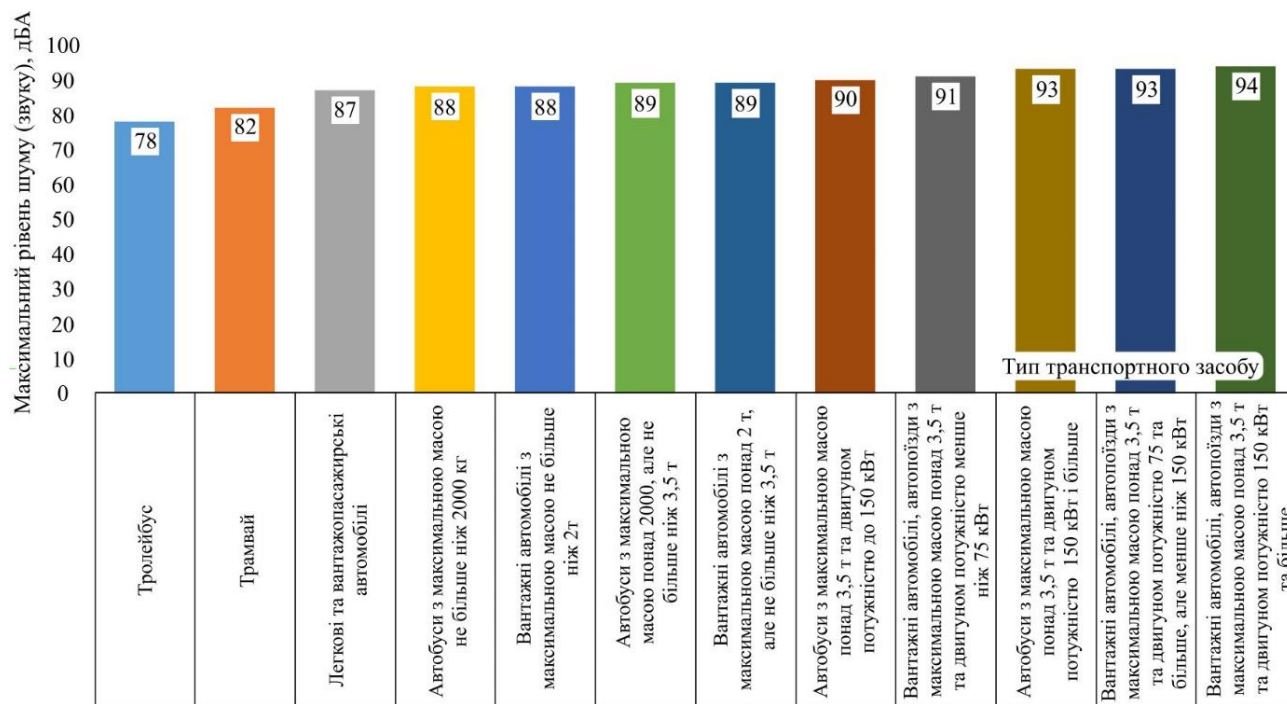


Рис. 4. Стандартизований максимальний рівень шуму (звук) транспортних засобів [11-13]

Оцінювали шумове навантаження в салоні автобуса за допомогою портативного шумоміра Testo 816 [15] – електронний

прилад, призначений для вимірювання шумів від 30 до 130 дБ за еквівалентним і максимальним значенням (рис. 5).

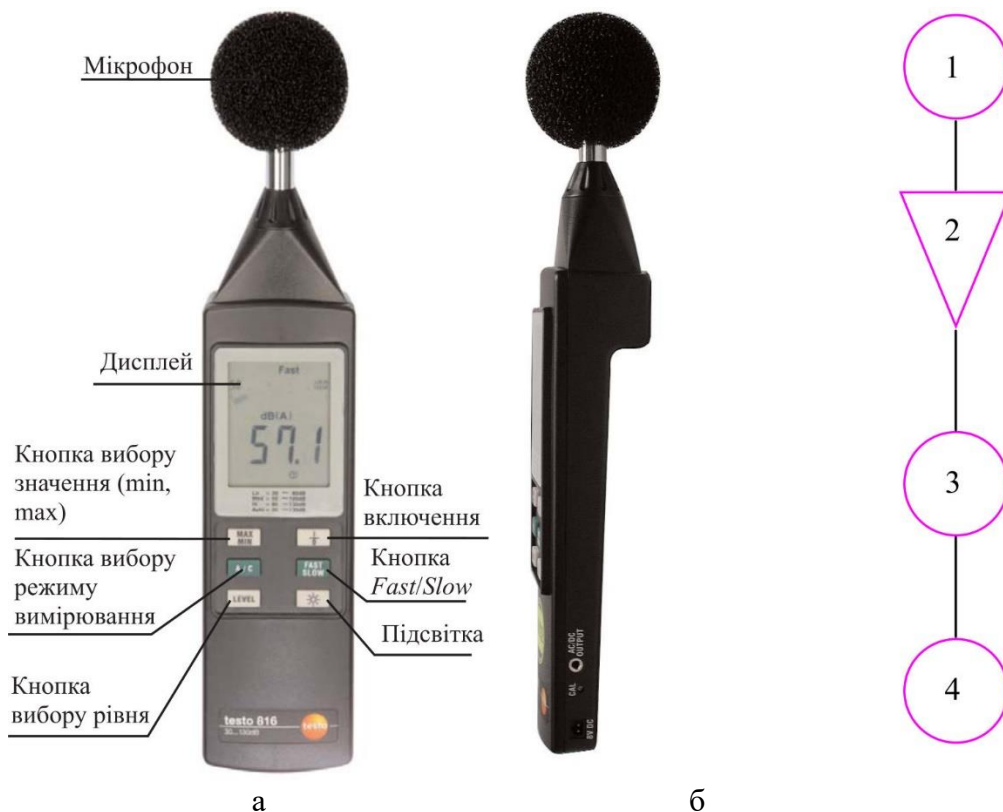


Рис. 5. Загальний вигляд шумоміра (а) і його принципова схема (б):
1 – мікрофон; 2 – підсилювач сигналу; 3 – смуговий октавний фільтр;
4 – вимірювач (обчислювальний блок)

Для становлення поточних часових значень зміни рівня шуму з графічною інтерпретацією даних додатково використовували додаток Sound Meter на смартфоні з обов'язковим калібруванням датчика і порівнянням даних із шумоміром Testo 816.

Для дослідження шумового навантаження в салоні дизельного автобуса обрано міжміський автобус БАЗ-А079.20 «Еталон», який прямував за маршрутом «Радивилів – Рівне».

При роботі автобуса на холостому ходу в салоні спостерігали монотонний рівень шумового навантаження в діапазоні 58-63 дБ, що характерно для працюючого

дизельного двигуна, який є основним джерелом шуму (рис. 6, а).

Рух автобуса в міських умовах (Рівне, Дубно) супроводжується зміною умов руху (швидкості транспортного потоку, наявності світлофорного регулювання, умов проїзду перехрестя тощо), що у свою чергу збільшує максимальне шумове навантаження до 73 дБ (рис. 6, б). Ураховуючи невелику швидкість руху до 30-45 км/год у міському потоці, збільшення рівня шуму спостерігали саме під час натискання водієм на педаль газу, що змінювало режим роботи двигуна, який розміщено в передній частині і закритий захисний кожухом.

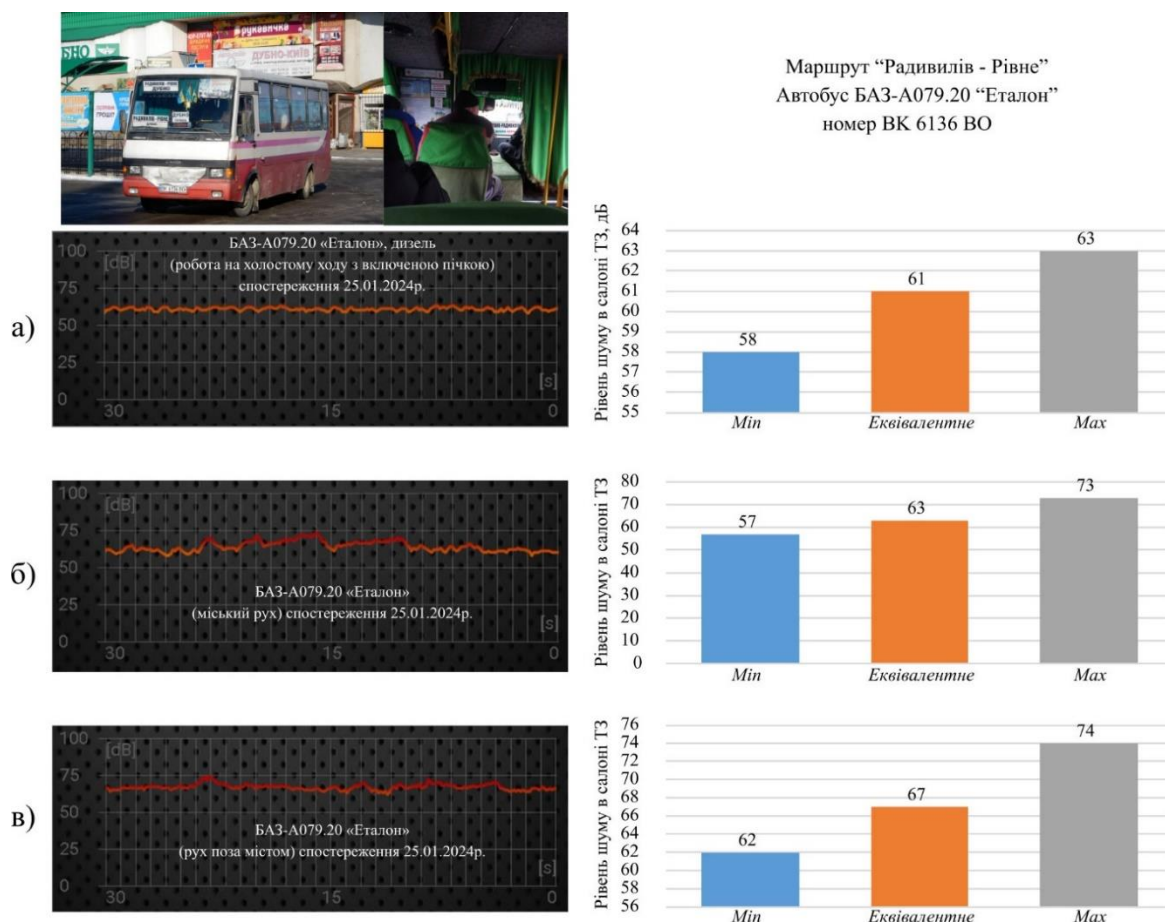


Рис. 6. Шумове навантаження в салоні автобуса за роботи на холостому ході (а), під час руху в міських (б) і позаміських (в) умовах

Рух автобуса за містом супроводжений збільшенням шумового навантаження до 74 дБ та еквівалентного до 67 дБ (рис. 6, в). Це пояснюється підвищенням швидкісного режиму руху, контакту шин із асфальтованою дорогою, взаємодією повітряного середовища з елементами автобуса, появою вібрацій та інших шумів.

Шумове забруднення є серйозною екологічною проблемою через його вплив на здоров'я людини та наслідки для інших сфер життя суспільства. Всесвітня організація охорони здоров'я неодноразово зазначала про вплив шуму навколишнього середовища на здоров'я людини, зокрема дихальну, нервову, метаболічну та серцево-судинну системи. Інфраструктуру для перевезення людей і товарів вважають основним джерелом шуму в цьому типі

середовищ. Фактично транспортний шум став другим за значущістю важливим екологічним джерелом погіршення здоров'я в розвинених країнах після забруднення дрібнодисперсними твердими частинками [16].

Дослідження, проведені багатьма вітчизняними і зарубіжними науковцями, також підтверджують, що цей забруднювач має шкідливий вплив на дихальну, нервову, метаболічну та серцево-судинну системи [17].

Європейське агентство з навколишнього середовища (ЕЕА) вказало, що шумове забруднення залишається основною проблемою здоров'я навколишнього середовища в Європі, а транспортна інфраструктура, така як дороги, залізниці, аеропорти і порти, відіграє важливу роль у цій екологічній проблемі [18]. Однак екологічний шум

також має відповідні наслідки для інших сфер суспільства, наприклад міського планування та збереження дикої природи [19].

Одним із напрямів зменшення шуму в автомобілях є використання новітніх матеріалів, покращення конструкції та впровадження активних систем управління шумом. Ці заходи спрямовані на зменшення як зовнішнього, так і внутрішнього шуму та можуть сприяти створенню більш комфортного та екологічно чистого автомобільного середовища.

Висновки. Шумове забруднення від діяльності автомобільного транспорту є серйозною проблемою для довкілля та здоров'я людей. Цей вид забруднення виникає внаслідок руху автомобілів і роботи

їхніх компонентів, таких як силова установка, колеса, гальма, аеродинамічний та інші види шуму.

Хоча шумове навантаження в салоні автобуса має допустимі межі від 58 до 74 дБ (максимальне значення – 89 дБ), однак потребує запровадження заходів зменшення шуму, особливо для прямування автобусів на далекі відстані для комфортної поїздки пасажиром, із використанням шумознижувальних матеріалів, оптимізації конструкції салону та застосування тихих технологій.

У подальшому потрібне дослідження впливу шуму від діяльності автомобільного транспорту для оцінювання якості життя в міських умовах.

Список використаних джерел

1. Autex Automotive Innovations: Revolutionizing Noise Control in Vehicles. *FasterCapital*: вебсайт. URL: <https://fastercapital.com/content/Autex-Automotive-Innovations--Revolutionizing-Noise-Control-in-Vehicles.html>.
2. Як гучні звуки впливають на наш організм і які хвороби можуть спричинити – дослідження NYT. *Texty.org.ua* : вебсайт. URL: <https://texty.org.ua/fragments/109897/yak-shum-vplyvaye-na-nash-orhanizm-i-yaki-hvoroby-mozhe-sprychynyty-doslidzhennya-nyt/>.
3. Миронюк О. С., Шевчук В. В., Грабовець В. В. Вплив зовнішнього шуму легкового автомобіля на довкілля. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. № 1 (12). С. 107–113. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/56/35>.
4. Rybakowska M., Dudarskia G., Kowal E. Research and analysis of noise emitted by vehicles according to the type of surface roads and driving speed. *European Journal of Environmental and Safety Sciences*. 2014. Вип. 2(2). С. 71–78. URL: <https://cutt.ly/hwMPnuXE>.
5. Krishnamurthy N., Hansen J. H. L. Car noise verification and application. *International Journal of Speech Technology*. 2014. Т. 17. С. 67–181. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10772-013-9215-3>.
6. Смаль М. В., Дзюбинська О. В., Сокур Т. Д. Методи боротьби з шумовим забрудненням у зонах впливу великих міст. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 12. С. 184–191. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/article/view/156/129>.
7. Абрамов В. М., Оболонков Д. Ф., Кулик О. А. Захист населених пунктів від транспортного шуму. *Збірник наукових праць ДонНАБА*. 2016. Вип. 4. С. 14–18. URL: https://donnaba.edu.ua/journal/images/2016-5/2016-05_14-18.PDF.
8. Шум. Вікіпедія: вебсайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%83%D0%BC>.
9. Яка характеристика відповідає за гучність звуку? Almedia: вебсайт. URL: <https://form.almedia.com.ua/yaka-kharakteristika-vidpovidaie-za-guchnist-zvuku/#i>.
10. Шум та його вплив на організм людини. ECOSOUND: вебсайт. URL: https://ecosound.kiev.ua/uk/statti/?record_id=105.
11. ДСТУ 4905:2008. Колісні транспортні засоби. Тролейбуси пасажирські: загальні технічні вимоги. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 45 с.

12. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 30 с.
13. ДСТУ 4876:2019. Вагони трамвайні пасажирські. Загальні технічні вимоги. Київ: Держспоживстандарт України, 2019. 23 с.
14. Транспортна екологія : навч. посіб. / О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвеева та ін.; за заг. ред. С. В. Бойченка. Київ : НАУ, 2017. 507 с.
15. Шумомір Testo 816. Інструкція з експлуатації. URL: https://chemtest.com.ua/previews/_testo_816.pdf.
16. Всесвітня організація охорони здоров'я. ВООЗ: вебсайт. URL: <https://www.who.int/ukraine/uk/publications/9789241516822>.
17. Як гучні звуки впливають на наш організм і які хвороби можуть спричинити – дослідження NYT. *Texty.org.ua* : вебсайт. URL: <https://texty.org.ua/fragments/109897/yak-shum-vplyvaе-na-nash-orhanizm-i-yaki-hvoroby-mozhe-sprychynyty-doslidzhennya-nyt/>.
18. ЕЕА : Європейське агентство з навколишнього середовища. *Eea.europa.eu* : вебсайт. URL: <https://www.eea.europa.eu>.
19. Боротьба за спокій у світі, наповненому шумовим забрудненням. *Imena.ua* : вебсайт. URL: <https://www.imena.ua/blog/quiet-parks-noise-pollution/>.

Хітров Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Тел.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Ihor Khitrov, PhD (Tech), Associate Professor, department of the Transport Technology and Technical Service, National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Tel.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 09.04.2024 р.

УДК 689.463:338.47(477)

АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРЕНДИ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Канд. техн. наук В. І. Шевченко, асп. Б. В. Мацієвський,
магістрант І. М. Андрушко

ANALYSIS OF REGULATORY AND LEGAL SUPPORT FOR THE LEASE OF FREIGHT CARS

PhD (Tech.) V. Shevchenko, postgraduate student B. V. Matsievskiy,
master I. M. Andrushko

Анотація. Проведено аналіз нормативно-правового забезпечення передавання вагонного парку АТ «Укрзалізниця» в оренду. Розглянуто питання необхідності термінового розроблення локальних нормативно-правових актів для передавання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» в оренду за умов зміни чинного законодавства України. Проведено аналіз зміни доходу від продажу послуг із використання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» за період

2022-2023 рр. і початку 2024 р. через систему електронних аукціонів PROZORRO.ПРОДАЖІ. Виявлено відсутність можливості оренди рухомого складу на залізниці та необхідність розроблення чітких параметрів із визначення доцільності надання вантажних вагонів в оренду.

Ключові слова: вантажні перевезення, оренда вагонів, нормативно-правові документи, АТ «Укрзалізниця», електронна система ProZorro, електронні аукціони.

Abstract. At the current stage of the implementation of deep socio-economic transformations aimed at the integration of Ukraine into the European Community, the lease of state and communal property plays an important role, first of all, in ensuring the development of the country's entrepreneurship. In addition, the rental of property is an important source of revenue for Ukrzaliznytsia and contributes to the maintenance of said property in proper condition. However, recently, due to unfavorable economic conditions, renting a car park for entrepreneurs is unattractive and not competitive compared to renting real estate in the private sector. One of the objective factors that have a negative impact on competitiveness and, as a result, on the reduction of rental volumes, is the complicated procedure for transferring wagons for rent, in particular, the long term of its implementation, etc. The solution of the mentioned problem requires appropriate adaptation of the legislative and regulatory framework, which regulates the issue of rent primarily by the Law of Ukraine «On Leasing of State and Communal Property», to modern market requirements. In the regulatory and legal acts of Ukrzaliznytsia, in fact, the relationship of leasing wagons is still regulated by the law adopted back in 1992 (the Law of Ukraine «On Leasing the Property of State Enterprises and Organizations. Currently»), there is a need to create a fundamentally new legal framework for Ukrzaliznytsia, which will be based on the following principles: experience, competitiveness, responsibility, openness, responsiveness and integration into the web environment.

The article analyzes the normative and legal support for the transfer of Ukrzaliznytsia's car park for rent. Considered the issue of the need for urgent development of local normative legal acts for the transfer of Ukrzaliznytsia's own wagons for lease in the context of changes in the current legislation of Ukraine. An analysis of the change in income from the sale of services for the use of Ukrzaliznytsia's own wagons for the period 2022-2023 was carried out and the beginning of 2024 through the electronic auction system PROZORRO. SALES.

Keywords: freight transportation, wagon rental, regulatory documents, JSC «Ukrzaliznytsia», ProZorro electronic system, electronic auctions.

Вступ. З початку 2020 р. почав діяти новий Закон України «Про оренду державного та комунального майна» № 157-ІХ, який було розроблено та подано до Верховної Ради України Фондом державного майна України. У пояснювальній записці до законопроекту автори зазначили необхідність термінових змін у питаннях оренди, які на той час урегульовані Законом України «Про оренду майна державних підприємств та організацій» 1992 р.

Новий закон розроблено з урахуванням тенденцій прагнення інтеграції України до Європейської спільноти, змін,

що спостерігаються на сучасному ринку з використання державної та комунальної власності на умовах оренди, з метою посилення конкурентної придатності державної власності.

Новий закон діє вже майже чотири роки, за які законодавець прийняв вже 16 змін, прийнято безліч підзаконних нормативно-правових положень, постанов, регламентів тощо, однак на залізничному транспорті досі питання надання в оренду рухомого складу не врегульовані локальними нормативно-правовими актами, що унеможлиблює передавання рухомого складу в оренду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вдосконалення порядку передавання майна державної та комунальної власності 03.10.2019 р. Верховна Рада прийняла Закон України «Про оренду державного та комунального майна» № 157-ІХ [10], оприлюднений 26.12.2019 р. у виданні «Голос України» № 248 і набрав чинності 27.12.2019 р., введення його в дію відбулося з 01.02.2020 р. Відповідно до норм Закону визнано нечинними ряд нормативно-правових актів, у першу чергу це Закон України «Про оренду державного та комунального майна» № 2269-ХІІ з усіма змінами, що були чинні станом на 01.02.2020 р., і ще 48 документів, які впорядковували порядок оренди в державі.

За період з прийняття Закону № 157-ІХ до 09.08.2023 р. прийнято 16 змін, внесені відповідно до прийнятого Закону України «Про внесення змін до Закону України «Про оренду державного та комунального майна». На сьогодні діє остання редакція від 07.09.2023 р. У результаті введення норм Закону № 157-ІХ 37 нормативно-правових актів України зазнали змін, розробили 18 нових нормативно-правових актів, пов'язаних із чинними нормами прийнятого Закону.

Визначення мети та завдання дослідження. Згідно з вимогами Закону України «Про оренду державного та комунального майна» державними органами та підприємствами проведена значна робота:

- створено адміністратора системи, що займається продажем прав оренди через проведення електронного аукціону;
- розроблено регламент роботи електронної торгової системи (ЕТС);
- розроблено центральну базу даних ЕТС;
- відбувся перехід із надання прав оренди за новими правилами для більшості власників державного майна та приватного сектору;

- запрацював єдиний електронний майданчик із проведення електронних аукціонів із продажу прав оренди тощо.

Однак залізниця досі не внесла необхідні зміни до внутрішніх нормативно-правових актів із зазначеного питання. Звісно, при перевезенні вантажів залізничним транспортом є потреба в оренді вантажних вагонів, і на сьогодні для передавання вантажних вагонів в оренду АТ «Укрзалізниця» необхідно оновити локальні нормативно-правові акти і привести їх у відповідність чинному законодавству України.

Основна мета дослідження – аналіз чинних локальних нормативно-правових актів, що стосуються передавання вагонного парку АТ «Укрзалізниця» в оренду, виявлення пунктів невідповідності чинному законодавству України, а саме Закону України «Про оренду державного та комунального майна» та іншим чинним нормативно-правовим актам.

З цієї мети випливають завдання дослідження:

1. Встановити можливість передавання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» в оренду на підставі локальних нормативно-правових актів, що існують на залізничному транспорті.
2. Провести аналіз ефективності продажу послуг з передавання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» для використання через систему електронних аукціонів Прозорро.
3. Обґрунтувати необхідність оновлення локальних нормативно-правових актів для можливості передавання вагонів АТ «Укрзалізниця» в оренду.
4. Запропонувати основні напрями оновлення локальних нормативно-правових актів.

Основна частина дослідження. За 2023 р. АТ «Укрзалізниця» покращила стан вантажних вагонів [1]. Так, підприємством за рік на власних потужностях збудовано рекордну кількість (582 одиниці) вантажних

вагонів, зокрема виготовлено 427 платформ для перевезення контейнерів. Розпочато роботи дослідних зразків думпкарів (50 одиниць) і хопер-дозаторів (50 одиниць). Також почалося виготовлення вагонів-зерновозів, що мають можливість перевозити зернову групу вантажів як українськими коліями, так і коліями країн ЄС. Крім того, у 2023 р. Філія «Центр транспортної логістики» АТ «Укрзалізниця» уклала угоду на придбання 115 одиниць вагонів-цистерн для колії шириною 1435 мм із контрагентом TATRAVAGONKA a.s. [2].

Однак досі спостерігається нестача рухомого складу для перевезень вантажів, і є актуальним питання передавання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» в оренду, що, за інформацією, оприлюдненою на офіційному сайті АТ «Укрзалізниця», відбувається на підставі «Порядку розгляду звернень щодо передачі в оренду вантажних вагонів», затвердженого Наказом Укрзалізниці № 138 від 13.04.2011 р. [3]. Цей Порядок розроблено відповідно до положень нормативно-правових актів, що діяли станом на 2011 р:

- Закон України «Про оренду державного та комунального майна» від 10.04.1992 р.;

- Закон України «Про залізничний транспорт» в редакції від 02.10.2012 р.;

- Цивільного кодексу України від 17.03.2011 р.;

- Методики розрахунку і порядку використання плати за оренду державного майна, затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України від 04.10.1995 р. № 786;

- Наказу Міністерства транспорту України «Про затвердження Інструкції про порядок передачі в оренду вантажних вагонів» від 28.04.1997 р. № 151;

- Методики оцінювання вартості об'єктів оренди від 18.06.2008 р.;

- Порядку викупу орендарем оборотних матеріальних засобів і Порядку надання в кредит орендареві коштів і цінних паперів, затверджених Постановою

Кабінету Міністрів України від 10.08.1995 р. № 629.

На сьогодні ці нормативно-правові акти не чинні [4-7] або скасовані відповідними рішеннями Верховної Ради, Уряду, Міністерства тощо, або втратили чинність у зв'язку зі зміною в редакції, відповідно і сам Порядок є таким, що втратив свою чинність. Також є застарілою інструкція на сайті АТ «Укрзалізниця» (https://uz.gov.ua/cargo_transportation/truck_renting/legislation/) про передавання в оренду вантажних вагонів, що зареєстрована в Мінюсті 08 січня 2014 р. за № 2/24779.

Натомість Верховна Рада та Уряд прийняли низку нових Законів України та інших нормативно-правових актів, що стосуються оренди державного майна та майна, що належить державним підприємствам, зокрема АТ «Укрзалізниця» [8-12]. За Законом України «Про оренду державного та комунального майна», єдиний спосіб оренди – це проведення електронного аукціону в єдиній електронній системі, при цьому мають бути виконані положення Порядку передавання майна в оренду [10], згідно з якими існують певні норми і правила визначення стартової ціни, строки оренди, оприлюднення відомостей про майно, порядок проведення капітального та інших видів ремонту та інше.

АТ «Укрзалізниця» у свою чергу оприлюднила нову редакцію Договору «Про надання послуг з організації перевезення вантажів залізничним транспортом», на сьогодні діє редакція від 31.05.2020 р. з додатком 1-5 «Умови продажу послуг з використання вагонів АТ «Укрзалізниця» із застосуванням ЕТС «ProZorro.Продажі», що і є на сьогодні єдиною можливістю використання деяких типів вагонів АТ «Укрзалізниця». Однак це зовсім не оренда вагонів у прийнятих рамках, що знайшли своє відображення в багатьох нормах Правил перевезення вантажів, Тарифній політиці та інших нормативно-правових актів. Незважаючи на те, що деякі

вантажовідправники прийняли таке нововведення як зміни в порядку отримання вагонів в оренду [13-16], у п. 1.1 Договору чітко зазначено, що «користування вагоном не є орендою майна, а плата за користування власним вагоном Перевізника не є орендною платою». Слід урахувати, що при розподілі вагонів через електронний аукціон вантажовідправник фактично використовує власні вагони АТ «Укрзалізниця» і повинен сплачувати за використання на цих умовах, а сам розподіл через електронний аукціон – це, по-перше, встановлення ринкової ціни на плату за використання рухомого складу АТ «Укрзалізниця», по-друге, запобігання корупційним явищам при встановленні черги подавання вагонів під навантаження, по-третє, сплата за можливість взагалі користуватися послугою з перевезення вантажів певним типом вагонів на певних умовах, що також викликає питання в багатьох вантажовідправників [17, 18].

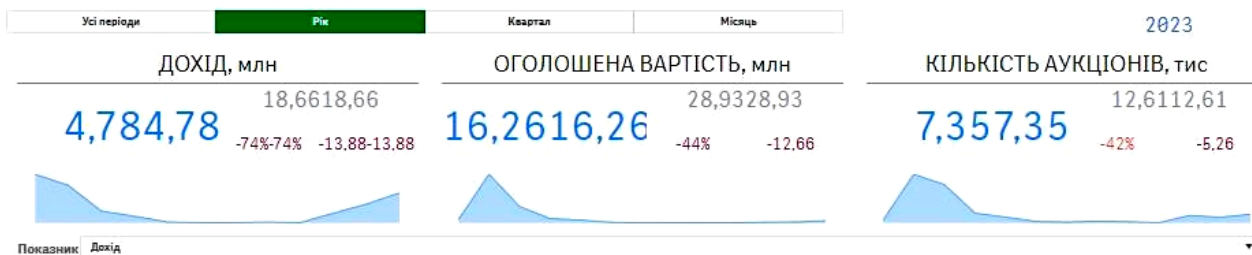
Починаючи з 2018 р. на підставі договору АТ «Укрзалізниця» з ДП «Прозорро.Продажі» та Додатку 1 до цього Договору «Регламент роботи електронної торгової системи ProZorro.Продажі щодо проведення електронних торгів (аукціонів) щодо продажу послуг із використання вагонів власності АТ «Укрзалізниця» під час здійснення перевезень вантажів» [19] розпочалося застосування електронних аукціонів для продажу послуги з можливості використання власних вагонів. Однак, по-перше, це не повноцінна оренда (орендар не отримує всіх переваг, передбачених Законом України «Про оренду державного і комунального майна»), по-друге, досі не розроблені необхідні нормативно-правові акти для передавання в оренду вагонів (що унеможливує надання вагонів в оренду), по-третє, механізм прийняття рішень про виділення вагонів як

для передавання в оренду, так і розподілу прав використання не є прозорим і зрозумілим і не охоплює потреби всіх клієнтів АТ «Укрзалізниця».

Перші електронні аукціони з розподілу вантажних вагонів принесли значний економічний ефект [20], однак у 2023 р. цей ефект значно скоротився, наприклад, порівняно з 2022 р. відбулося зменшення отриманого доходу майже у п'ять разів і склало за весь рік 4,78 млн грн. Зміна показників дохідності з надання послуг зі використання власного вагонного парку наведена на рис. 1.

Складні умови експорту вітчизняної продукції, блокування портів, спад виробництва, воєнні дії, переорієнтація напрямків вантажопотоків та інші негативні наслідки значно погіршили загальний стан економіки, що вплинуло на потребу в послугах із перевезень вантажів залізничним транспортом. За аналітичними даними системи «ПРОЗОРРО.Продажі», у 2023 р. відбулося різке скорочення пропозицій від організатора торгів, з травня по жовтень аукціони майже не проводили, крім того, на 24 % скоротилася частка успішних аукціонів. Результати аналізу з проведення електронних аукціонів з продажу послуг із використання вагонів власності АТ «Укрзалізниця» у 2023 р. наведено на рис. 2. Багато вантажовідправників скаржаться на недостатній рівень пропозицій про тип вагонів (пропозиції обмежені зерновозами, напіввагонами та мінераловозами), обмеження полігону використання, можливості вагонними відправками, недостатність пропозицій із можливості використання вагонів у невеликій кількості та повну відсутність можливості оренди одного вагона.

Основні результати

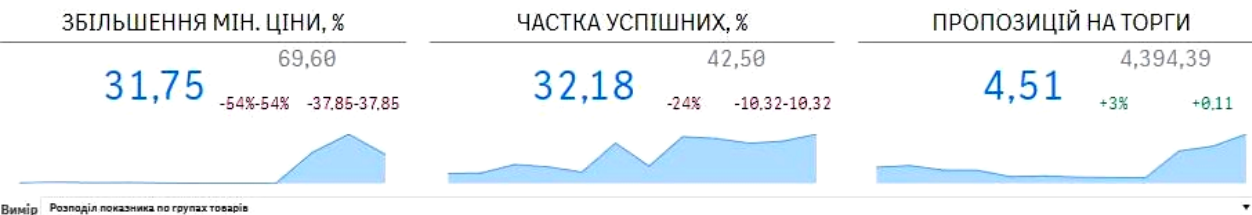


Показник: Дохід

Розподіл доходу по групах товарів

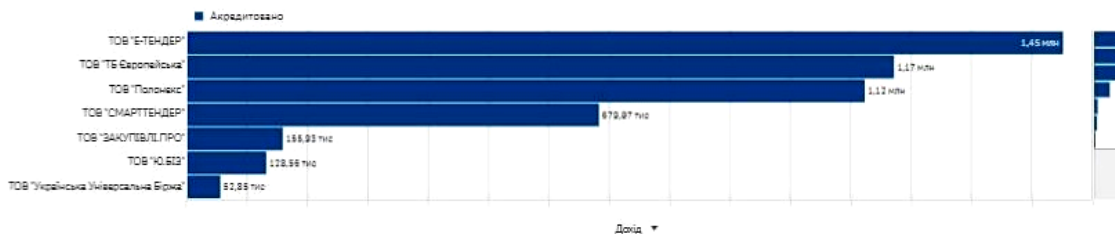


2022 рік 2022 рік



Вимір: Розподіл показника по групах товарів

Рейтинг майданчиків (з яких подавали пропозиції) по доходу



Динаміка (графік будується на останні 24 місяці обраного періоду)

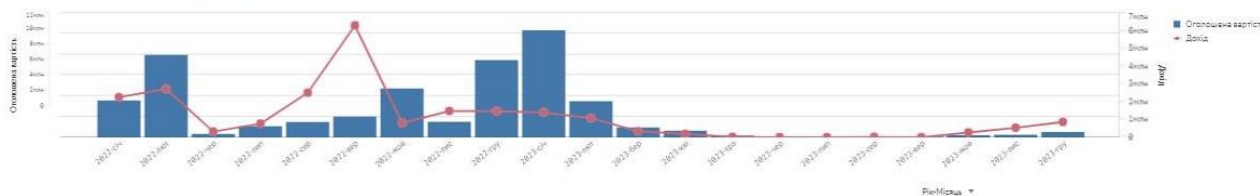
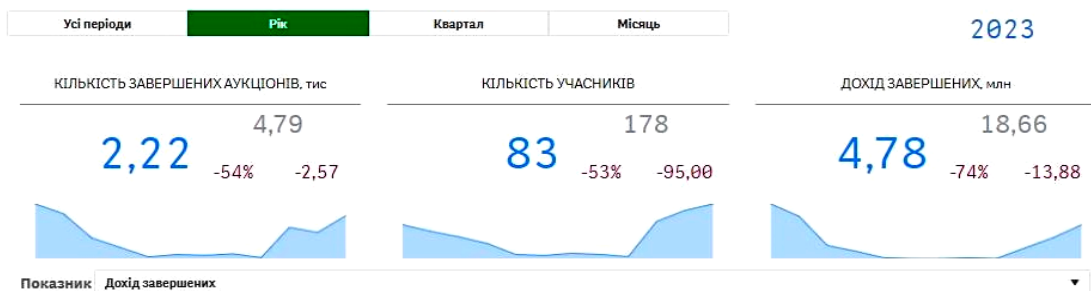
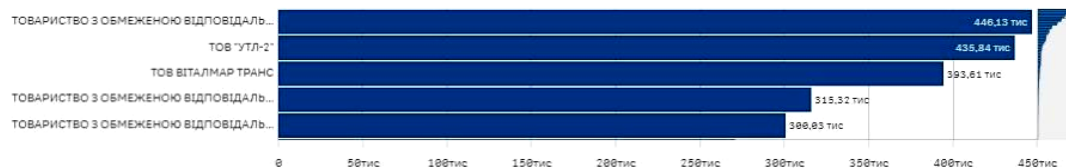


Рис. 1. Аналіз доходу від розподілу вагонного парку АТ «Укрзалізниця» через систему «ПРОЗОПР.Продажі»

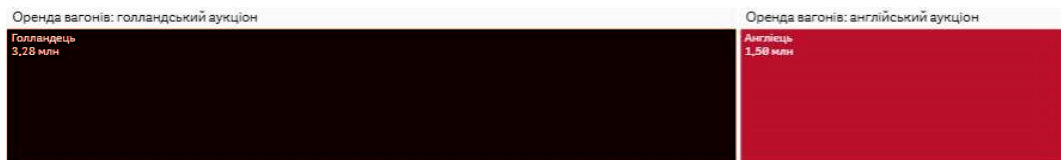
Аналіз завершених торгів



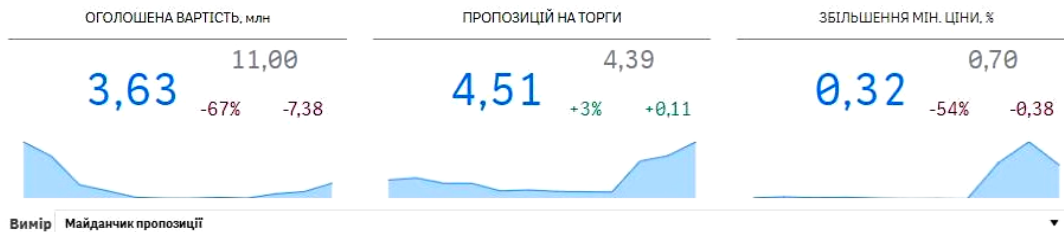
Рейтинг переможців



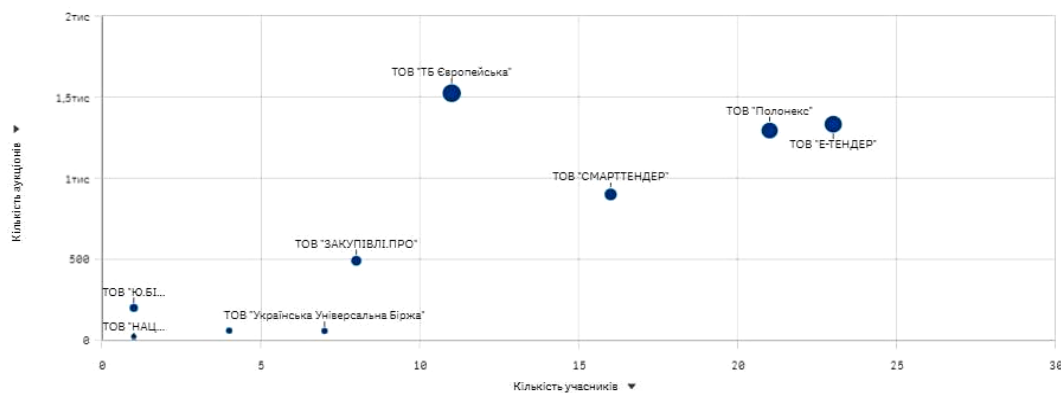
Розподіл доходу за напрямом роботи та типом аукціону



2022



Майданчик пропозиції



*Розмір бульбашки додатково за оголошеною вартістю

Рис. 2. Аналіз проведення електронних аукціонів з продажу послуг із використання вагонів власності АТ «Укрзалізниця» у 2023 р.

Слід зазначити, що, не зважаючи на складні умови, з жовтня 2023 р. почалося поступове відновлення проведення електронних торгів і на сьогодні спостерігається стабільне, хоч і невелике, зростання без урахування розширення вагонного парку та попиту малих відправників, що потребують для використання на умовах оренди від одного до чотирьох вагонів. Для забезпечення попиту вітчизняних експортерів керівництво АТ «Укрзалізниця» 5 жовтня 2023 р. оголосило проведення конкурентних торгів із продажу комплексної послуги з перевезень зернових вантажів у спеціальному рухомому складі (хопер-зерновоз) за межі залізниць України зі зміною візків під колію 1435 мм. За умовами тендера, дозволено перевезення через прикордонні станції Польщі та Румунії – Ягодин, Дяково, Вадул-Сірет, Мостиська-2. Особливістю цієї пропозиції є вимога щодо наявності в учасника торгів чинного договору на транспортно-експедиторське обслуговування з компанією UZ Cargo Poland [21]. Залежно від попиту на перевезення зернових вантажів за такою схемою залізниця запропонувала два варіанти надання послуг: 10 лотів по 28 зерновозів кожний для використання на маршруті Вадул – Дяково і 10 лотів по 38 зерновозів – Мостиська-2 – Ягодин. Початкова добова вартість оцінена як 600 грн/ваг за використання вагонів на території України. Вартість оплати за використання вагонів встановлює окремий договір з компанією UZ Cargo Poland.

На початку 2024 р. (перші 50 днів роботи) філія «Центр транспортної логістики» АТ «Укрзалізниця» оголосила 1143 тендери на проведення електронних аукціонів із продажу послуг використання трьох типів вагонів (рис. 3) згідно з оприлюдненим графіком продажу відповідних послуг, розміщеним для ознайомлення в електронній системі «e.Портал УЗ-Карго» (<https://uz-cargo.com/auction-archive.html#archive>).

Висновки. Проведено аналіз чинних локальних нормативно-правових актів про передавання вагонного парку АТ «Укрзалізниця» в оренду.

Виявлено відсутність можливості оренди рухомого складу на залізниці. Це негативно впливає не тільки на економічні показники роботи від втрати значного джерела отримання додаткових коштів, а і на втрату потенційних клієнтів, що звертаються з питань оренди вагонів до приватних вагоновласників, а в деяких випадках взагалі переходять на інші види транспорту. Тобто є чимала потреба в наданні вантажних вагонів в оренду, і тимчасові заходи з надання можливості використання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» не перекривають цю потребу, а для прозорого, економічно обґрунтованого процесу передавання вагонів в оренду, який буде відповідати чинному законодавству України необхідне розроблення і прийняття нормативно-правових актів на підставі чинних норм і наукового обґрунтування. У першу чергу це стосується розроблення «Інструкції про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» і «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу».

Для цього необхідне розроблення чітких, зрозумілих параметрів із визначення доцільності надання вантажних вагонів в оренду, підстави для відмови в наданні відповідного вагона в оренду, порядку визначення балансової вартості вагонів, розрахунку початкової вартості орендної плати і строку оренди, строків прийняття і оприлюднення рішень, параметрів технічної інформації, що стосується вантажного вагона (номер вагона, рік побудови, фізичний стан, наявність акредитації ТЗ у країнах ЄС та ін.), тобто необхідне опрацювання всіх питань, визначених Законом України «Про оренду державного і комунального майна».

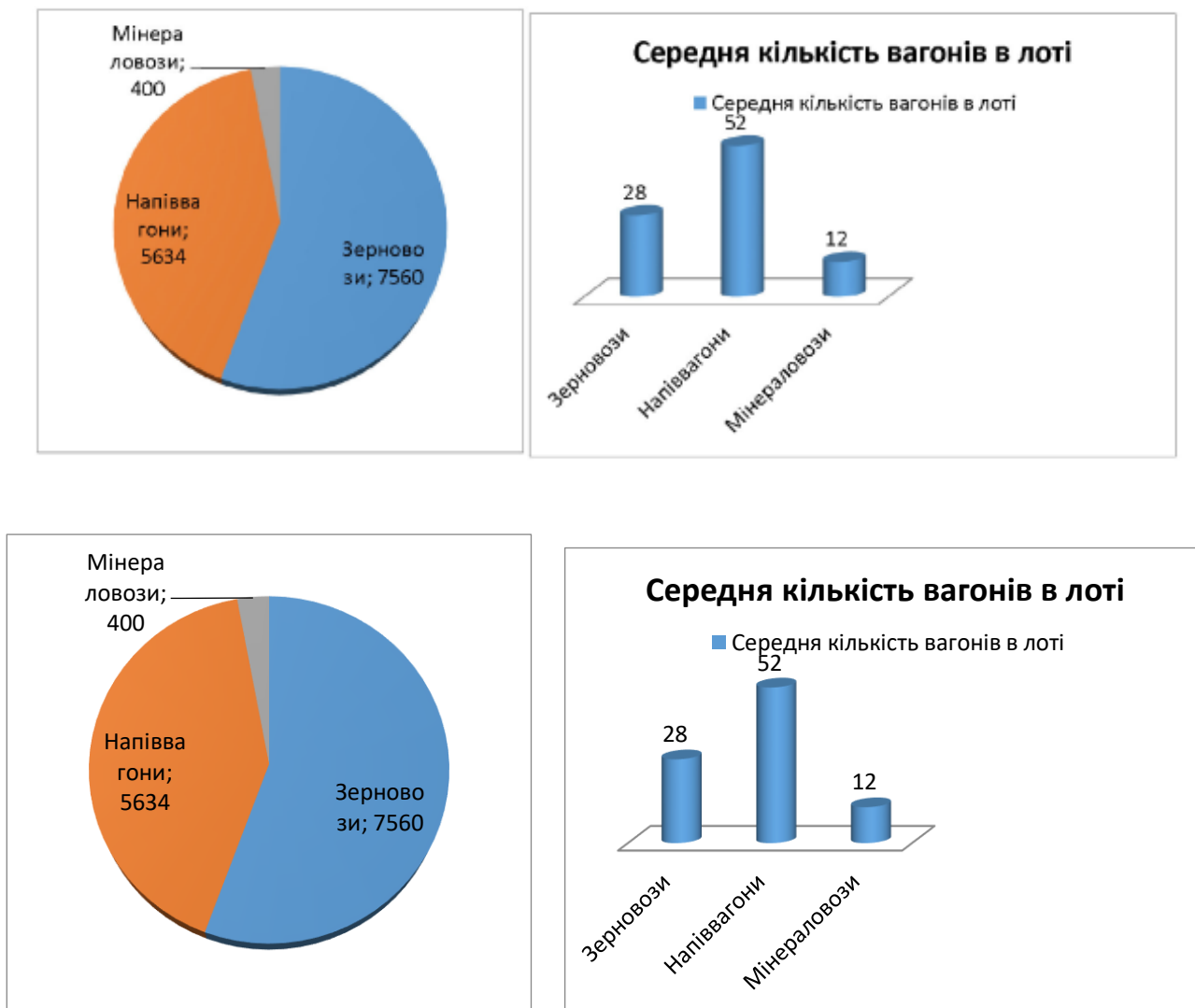


Рис. 3. Планові показники з продажу послуг використання власних вагонів АТ «Укрзалізниця» з січня по березень 2024 р.

Список використаних джерел

1. У 2023 році Укрзалізниця наростила виробництво на власних потужностях – збудовано 528 вантажних вагонів: вебсайт. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/page-3/622649/ (дата звернення 07.03.2024).
2. Prozorro.Продажі: вебсайт. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2023-10-27-002752-a> (дата звернення 07.03.2024).
3. Порядок надання вагонів в оренду: вебсайт. URL: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/truck_renting/the_order_of_cars_for_rent/ (дата звернення 07.03.2024).
4. Про оренду державного та комунального майна: Закон України від 10.04.1992 р. № 2269-ХІІ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2269-12#Text> (дата звернення 07.03.2024).
5. Про залізничний транспорт: Закон України від 04.07.1996 р. № 273/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 07.03.2024).

6. Цивільний Кодекс України: від 16.01.2003 р. № 435-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (дата звернення 07.03.2024).

7. Про затвердження Методики оцінки об'єктів оренди, Порядку викупу орендарем оборотних матеріальних засобів та Порядку надання в кредит орендареві коштів та цінних паперів: Постанова Кабінету Міністрів України від 10.08.1995 р. № 629. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/629-95-%D0%BF#Text> (дата звернення 07.03.2024).

8. Про оренду державного та комунального майна : Закон України від 03.10.2019 р. № 157-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-20#Text> (дата звернення 07.03.2024).

9. Регламент роботи електронної торгової системи Prozorro.Продажі ЦБД2 щодо проведення електронних аукціонів з продажу/надання в оренду майна (активів) / передачі права (Регламент ЕТС). URL: <https://biddingtime.com.ua/documents/%D0%A0%D0%B5%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%20%D0%95%D0%A2%D0%A1%20%D0%A6%D0%91%D0%94%20%20%D0%90%D0%A2%20%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%BE.%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%B6%D1%96.pdf> (дата звернення 07.03.2024).

10. Деякі питання оренди державного та комунального майна: Постанова Кабінету Міністрів України від 03.06.2020 р. № 483. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення 07.03.2024).

11. Про особливості оренди державного та комунального майна у період воєнного стану: Постанова Кабінету Міністрів України від 27.03.2022 р. № 634. URL: <https://www.kmu.gov.ua/pras/pro-osoblivosti-orendi-derzhavnogo-ta-komunalnogo-majna-u-period-voyennogo-stanu-634-270522> (дата звернення 07.03.2024).

12. Деякі питання розрахунку орендної плати за державне майно : Постанова Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 р. № 630. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/630-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення 07.03.2024).

13. Оренда вагонів УЗ: як проходить в Україні?: вебсайт. URL: <https://sale.uub.com.ua/news/arenda-vagonov-v-prozorro#:~:text=%D0%9E%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%20%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%B2%20%D1%87%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B7%20C2%AB%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%BE.,%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%BF%D1%96%D0%B2%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%B0%20%D1%96%201055%20%D0%B3%D1%80%D0%BD> (дата звернення 07.03.2024).

14. Як взяти в оренду залізничні вагони на майданчику Prozorro.Sale вебсайт. URL: https://sale.ueex.com.ua/filter/rail-car-hire?&page=1&rows=10&sidx=dateModified&sord=desc&filter_type=init&action=Y&status=all&list_mark=railwayCargo (дата звернення 07.03.2024).

15. Оренда вагонів Укрзалізниці на Prozorro.Продажі: вебсайт. URL: https://e-tender.ua/prozorro-prodagy/orenda-vagoniv-ukrzaliznici-na-prozorro-prodazhi?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA3JCvBhA8EiwA4kujZg9saKnIbQRtbEp6I6UMGT_utxRuuidCgNrQVS-lSt5TTAnNw2XXNRoCL_AQAvD_BwE (дата звернення 07.03.2024).

16. Аукціони оренди контейнерів і вагонів в Україні: вебсайт. URL: <https://ubiz.ua/auctions-all/railway-carriage> (дата звернення: 07.03.2024).

17. Вартість оренди вантажних вагонів: ринок чи методологія. Головний інформаційно-аналітичний центр. 2018. Вер. (№ 1). URL: https://logisticsmanagement.files.wordpress.com/2018/09/d0b3d196d0b0d186_e284961_d0b2d0b5d180d0b5d181d0b5d0bdd18c_2018_.pdf (дата звернення 07.03.2024).

18. Маліцький В. В. Управління стратегічним ціноутворенням при наданні підприємством – залізничним перевізником послуг з використання вантажних вагонів. URL: http://diser.ntu.edu.ua/malitskyu_dis.pdf (дата звернення 07.03.2024).

19. Договір «Про взаємодію під час реалізації Пілотного проекту щодо продажу із застосуванням електронної торгової системи ProZorro. Продажі послуг із використання вагонів власності АТ «Укрзалізниця» під час здійснення перевезень вантажів». URL: https://www.dto.com.ua/files/Vagoni_dogovir.pdf (дата звернення 07.03.2024).

20. Шевченко В. І., Мацієвський Б. В., Шевченко А. В. Перспективи розвитку технологій підвищення ефективності вантажної роботи АТ «Укрзалізниця» із застосуванням електронної системи Prozorro. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків. 2022. Вип. 4. С. 33–40.

21. Укрзалізниця проведе конкурентні аукціони з продажу комплексної послуги перевезень у зерновозах за кордон з перестановкою візків під євроколію: вебсайт. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/page-17/618566/ (дата звернення 07.03.2024).

Шевченко Віталій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

ORCID iD: 0000-0002-0873-3802. Тел.: +38 (057) 730-10-85. E-mail: 50801@ukr.net.

Мацієвський Богдан Вячеславович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0002-2247-742X. E-mail: bogdanmatsievskiy@gmail.com.

Андрушко Ігор Михайлович, магістрант, 221-ОПУТ-Д22, Український державний університет залізничного транспорту.

Shevchenko Vitaly, Ph. D., associate Professor of the office of freight and commercial work of the Ukrainian state University of Railway transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-0873-3802. Tel.: +38 (057) 730-10-85.

E-mail: 50801@ukr.net.

Matsievskiy Bohdan, postgraduate student, department of the office of freight and commercial work of the Ukrainian state University of Railway transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-2247-742X.

E-mail: bogdanmatsievskiy@gmail.com.

Andrushko Igor, master, Group 221-OPUT-D22, Ukrainian state University of Railway transport.

Статтю прийнято 11.04.2024 р.

УДК 656.6:338

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВАНТАЖНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В УМОВАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОРТОВИХ ТЕРМІНАЛІВ

Канд. техн. наук А. О. Мурад'ян, асп. О. В. Демидюков

TRUCK EQUIPMENT DEVELOPMENT PROSPECTS AND FEATURES OF ITS USE IN THE CONDITIONS OF AUTOMATION OF PORT TERMINALS

Ph.D. A. O. Muradian, postgraduate O. V. Demydiakov

Анотація. Статтю присвячено сучасним тенденціям розвитку вантажного обладнання в портах. Автоматизація портової галузі сприяє трансформації традиційних портів у розумні глобальні транспортні комплекси. Ефективність їхньої діяльності визначена насамперед використанням передових технологій і практик, а результати впливають не лише на вартість послуг порту, але і зниження витрат і підвищення якості всього транспортного ланцюга доставки. Як і будь-який інноваційний процес, автоматизація має свої переваги

та недоліки, які і було відзначено в роботі. Також існують значні перешкоди для автоматизації, особливо це стосується процесів модернізації портів, що вже є.

Ключові слова: перевантаження вантажів, морський порт, автоматизація.

Abstract. *The modern trends in the development of cargo equipment in ports are considered in the article.*

Modern ports are an important link in global supply chains, and the efficiency of their work directly affects the cost of goods and related services provided during cargo transshipment, storage, and passage through port terminals. Cargo equipment used at various stages of cargo transshipment plays an important role in optimizing port operations.

Using universal equipment significantly increases the productivity of the port, reduces the downtime of ships and other types of transport, and allows efficient use of warehouse space and available personnel. The main problem that ports face when choosing equipment is its cost and payback period, which directly affect the efficiency of the port and its competitiveness.

Throughout historical development, ports have had both a negative and a positive impact on the regions and communities in which they are located. On the one hand, they contribute to the development of the region, its transport and logistics infrastructure, can stimulate economic productivity and growth, and on the other hand, their activity requires energy, creates negative external effects, worsens the ecological situation in the region.

The issue of the development of cargo equipment and the efficiency of its use is relevant and requires further research in connection with the emergence of new trends related to the automation and robotization of these processes, the introduction of elements of artificial intelligence, which significantly increase the problem of ensuring cyber security of the port.

Automation of the port industry contributes to the transformation of traditional ports into smart global transport complexes. The effectiveness of their activities is determined primarily by the use of advanced technologies and practices, and the results affect not only the cost of port services, but also the reduction of costs and the improvement of the quality of the entire transport and delivery chain.

Like any innovative process, automation has its advantages and disadvantages, which were noted in the work. There are also significant barriers to automation, especially for the modernization of existing ports.

Environmental standards and innovative cargo delivery technologies, increasing requirements for the quality of transshipment services and the need to reduce costs in order to maintain competitiveness will force traditional ports to switch to automation of transshipment equipment in order to increase its efficiency.

Keywords: cargo transshipment, seaport, automation.

Вступ. Сучасні порти є важливою ланкою глобальних ланцюгів постачання, а ефективність їхньої роботи безпосередньо впливає на вартість товарів і супутніх послуг при перевалці вантажів, їхньому зберіганні, проходженні через портові термінали. Важливу роль в оптимізації діяльності порту відіграє вантажне обладнання, що використовують на різних етапах перевалки вантажів.

Протягом століть розвиток портів був безпосередньо пов'язаний із технологіями

перевалки. Якщо раніше здебільшого будували спеціалізовані порти для перевалки визначених типів вантажів, то далі виділяли окремі райони або термінали для наливних, навалювальних, генеральних вантажів, які потребували різних технологій перевалки та відповідного різноманіття вантажного обладнання.

Поява універсальної тари у вигляді контейнерів призвела до необхідності модернізації портової інфраструктури і появи контейнерних терміналів, наявних на

сьогодні майже по всьому світу. Контейнеризація дає змогу перевалювати будь-які вантажі за допомогою стандартизованого універсального перевантажувального обладнання, яке можна використовувати не лише на терміналі, а й безпосередньо на судні.

Універсальне обладнання значно підвищує продуктивність роботи порту, зменшує простій суден та інших видів транспорту, дає змогу ефективно використовувати складські площі та наявний персонал. Основною проблемою, із якою стикаються порти при виборі перевантажувального обладнання, є його вартість і терміни окупності, які впливають на ефективність роботи порту і його конкурентоспроможність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням розвитку вантажного обладнання та особливостям його використання присвячено чимало праць вітчизняних і зарубіжних учених [1-8].

У роботах [2-4] розглянуто вирішувани проблеми контейнерних терміналів. У дослідженні [2] автори розглядають питання, пов'язані з заторами автотранспорту в портах. Проаналізувавши значну кількість публікацій із цього питання, автори розглядають різні методи зменшення заторів від оптимізації інфраструктури до контролю часу прибуття. І хоча ця проблема вирішувана з точки зору контейнерного терміналу, слід зазначити, що вона впливає на весь транспортний ланцюг від портових операторів до транспортних компаній, вантажних станцій і складських площ. Вагомим внеском цієї роботи є те, що автори, на відміну від попередніх досліджень, пропонують комплексний підхід до вирішення цієї проблеми з урахуванням інтересів усіх учасників транспортного ланцюжка та зростаючих екологічних вимог.

Автори роботи [3] розглядають вплив «зелених» технологій на підвищення продуктивності порту на підставі використання імітаційної моделі «витрати-

вигоди». Використання нового типу інтелектуальних автономних транспортних засобів (IAV) дає змогу підвищити продуктивність вантажних робіт і значно зменшити загальну вартість портових послуг. Однак використання IAV потребує оновлення поточної стратегії порту, його автоматизації та впровадження нової системи диспетчеризації, яка, на відміну від сучасної (яка орієнтована на планові показники і зазвичай вирішує ситуаційні проблеми після їх виникнення), має забезпечити пошук і випереджувальне вирішення можливих майбутніх проблем.

У роботі [4] автором запропоновано процедуру оцінювання доцільності вкладання інвестицій у проєкт оновлення перевантажувального обладнання в морському порту і вибір найкращого варіанта інвестиційного проєкту.

У роботах [5-7] розглянуто сучасні тенденції розвитку вантажного обладнання на перспективу до 2030 року. Основним трендом виступає повна автоматизація терміналів, їхня автономність з мінімальним використанням людської праці.

Аналіз наведених робіт показує, що питання розвитку вантажного обладнання та особливості його використання є актуальним і потребує подальшого дослідження через появу нових трендів, пов'язаних із автоматизацією та роботизацією цих процесів, впровадження елементів штучного інтелекту, що значно посилюють проблему забезпечення кібербезпеки порту.

Визначення мети та завдання дослідження. Основна мета дослідження – визначення перспектив розвитку вантажного обладнання та особливостей його використання в умовах автоматизації портових терміналів. Для вирішення цієї мети поставлено і розглянуто такі завдання:

- перспективні напрями розвитку портового обладнання у світі;
- приклади автоматизації портів і терміналів;

- проаналізовано основні переваги і недоліки автоматизації портів і терміналів;
- визначено основні перешкоди щодо впровадження автоматизації в портову галузь.

Основна частина дослідження.

Протягом свого історичного розвитку порти мали як негативний, так і позитивний вплив на регіони і громади, у яких вони розташовані. З одного боку, вони сприяють розвитку регіону, його транспортній і логістичній інфраструктурі, стимулюють економічну продуктивність і зростання, а з іншого – їхня діяльність потребує енергії, створює негативні зовнішні ефекти, погіршує екологічну ситуацію в регіоні [1].

Ринок портового обладнання зростатиме на 2 % щорічно до 2030 року [5]. На додачу до наявного обладнання (контейнерні перевантажувачі, вилкові навантажувачі, різні крани, ричстакери та ін.) з'являться і нові технологічні інновації – автоматизовані керовані транспортні засоби та «розумна» перевантажувальна техніка. Значну частку інвестицій у майбутньому необхідно буде вкладати в програмне забезпечення та кібербезпеку такої техніки.

Слід зазначити, що автоматизоване перевантажувальне обладнання використовуватиметься як на новітніх терміналах, так і при оновленні та розширенні портів, що вже є. Процеси автоматизації, які також входять до останніх трендів розвитку портів [6] на період до 2030 року, стануть основою передових технологій і практик сталого розвитку і забезпечать «перетворення традиційних портів на розумні, адаптивні центри глобальної торгівлі» [7].

Сучасні автоматизовані контейнерні термінали кардинально змінюють парадигми портових операцій, використовують передові технології для підвищення ефективності, зниження загальних витрат і забезпечення високого рівня конкурентоспроможності.

Використання інтелектуальних систем і штучного інтелекту, робототехніки в процесі оптимізації обробки вантажів дає змогу значно скоротити загальні витрати, збільшити продуктивність, підвищити безпеку, зменшити втручання людини в процес перевалки, оптимізувати простір, зменшити забруднювальні викиди до атмосфери та відстежувати весь процес перевалки в режимі реального часу.

Так, у Норвегії компанія Yara International об'єдналася з Kongsberg Group, щоб побудувати перше у світі автономне судно-контейнеровоз із нульовими викидами – Yara Birkeland. 262-футове судно має вантажопідйомність 120 TEU і живиться від акумуляторної батареї ємністю 6,8 МВт·год. Заплановано використовувати його для транспортування мінеральних добрив між портами Норвегії, воно зможе замінити 40 000 поїздок вантажівок із дизельним двигуном, тим самим усуваючи 1000 т CO₂ щорічно [8]. Далі компанії планують побудувати повністю автоматизований термінал, перевантажувальна техніка якого також буде працювати на акумуляторах, що забезпечить повну відсутність шкідливих викидів (рис. 1).

Однак автоматизація має і свої негативні наслідки. У 2016 році термінал TraPac у Лос-Анджелесі став першим автоматизованим портом США. Частина терміналу АРМ у Лос-Анджелесі була напівавтоматизована, а на контейнерному терміналі Лонг-Біч (LBCT) проведено модернізацію та встановлено новітнє інноваційне обладнання (автоматичні крани-штабелери та перевантажувачі), що «передбачає мінімальне залучення людської праці» (рис. 2) [9, 10].

Але повна автоматизація терміналу призвела до протестів міжнародних профспілок портових робітників через неминучу втрату робочих місць, які вимагали розглянути фінансові та соціальні наслідки автоматизації в порту Лос-Анджелес [10].



Рис. 1. Проект автономного контейнеровозу і терміналу від компаній Yara International і Kongsberg Group [8]

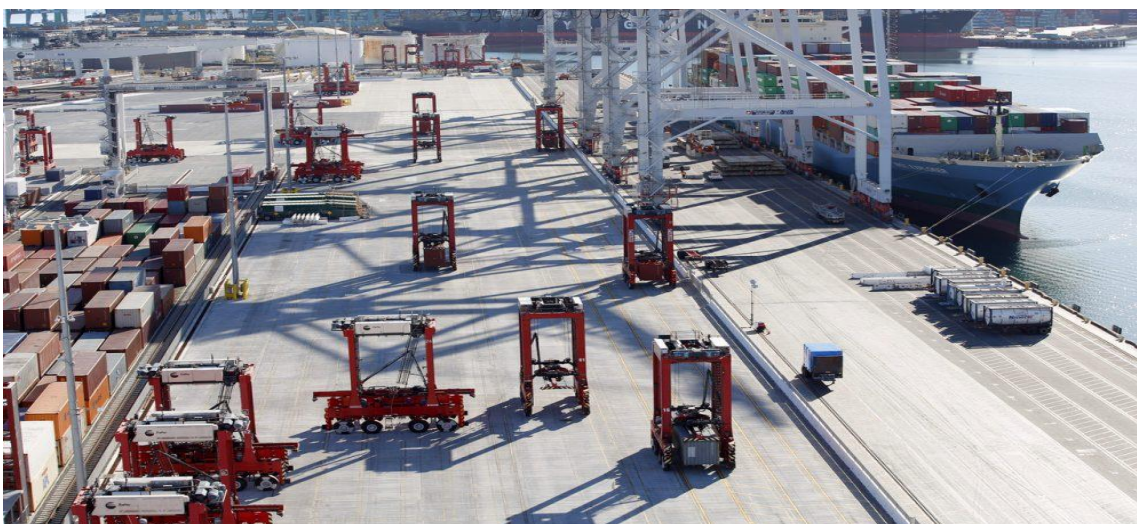


Рис. 2. Автоматизований термінал порту Лос-Анджелеса [9, 10]

Деякі експерти ставлять під сумнів ефективність автоматизації портів терміналів, наголошуючи, що такі проекти мають доволі тривалий термін окупності, і як приклад наводять порт Роттердам, «...автоматизація якого почалась ще в 1990-х і лише нещодавно почала приносити дивіденди» [10].

Ще одним негативним наслідком автоматизації можна вважати інвестиції в

інноваційний розвиток порту Вірджинія, який «...довелося продати, бо він не приносив доходів» [10].

Як і будь-який інноваційний процес, портова автоматизація має свої переваги і недоліки [11].

Переваги. По-перше, автоматизовані термінали працюють швидше, ефективніше, є безпечнішими, з екологічної точки зору. Процес перевалки відбувається в режимі

24/7, а персонал працює позмінно, що не призводить до втоми або відволікання операторів. По-друге, автоматизація дає змогу уникнути заторів і затримок при взаємодії різних видів транспорту, що значно покращує загальну кооперацію і співпрацю учасників транспортного процесу в порту. Крім того, як визначають водії та залізничники, автоматизація повністю виключає конфлікти, які раніше дуже часто відбувалися в пунктах перевалки. По-третє, новітня перевантажувальна техніка дає змогу працювати з більшими штабелями, іноді збільшуючи наявні потужності на третину. І останнє, автоматизація портів терміналів, окрім економії витрат на оплату праці, прискорення обробки суден та інших транспортних засобів, дає змогу значно заощадити на паливі, електроенергії, ремонті, зменшує рівень шуму і забезпечує високі стандарти безпеки [11].

Недоліки. По-перше, значне скорочення чисельності персоналу, особливо нижньої ланки. І хоча автоматизація створює нові робочі місця для диспетчеризації, нагляду та обслуговування обладнання, ці процеси потребують значно вищої кваліфікації, ніж була у звільнених працівників. Саме це і стає основною причиною протестів проти автоматизації. По-друге, автоматизація потребує значних початкових інвестицій, окупність яких має бути точно і обґрунтовано прорахована за різними сценаріями. По-третє, значні витрати на технічне обслуговування та інформаційні системи підтримки автоматизації. Це робить практично неможливим автоматизацію в регіонах із недостатнім рівнем розвитку або низькою інвестиційною привабливістю. І останнє – питання кібербезпеки. Злом системи захисту може повністю зупинити роботу порту, що є найбільш серйозною загрозою для автоматизації [11].

Окрім переваг і недоліків автоматизації портів терміналів існує низка перешкод для її впровадження [11]: по-перше, значний брак спеціалістів

інженерних професій, здатних обслуговувати і наглядати за інноваційним перевантажувальним обладнанням, «розумною» системою диспетчеризації та іншими процесами. Система стандартів для повністю автоматизованих портів терміналів перебуває ще на стадії розроблення і не охоплює всі необхідні процеси. По-друге, нестача даних (а іноді і їхня низька якість) для ефективної системи довгострокового планування та попереджувальної системи обслуговування та ремонту обладнання. І найголовнішою перешкодою є обробка виняткових процесів чи випадків. На жаль, спрогнозувати поведінку розумної системи у випадку якогось винятку чи нестандартної ситуації, яка не прописана, практично неможливо.

Традиційні порти і термінали зазвичай відокремлюють кожний етап обробки вантажу і приймають рішення щодо інших учасників процесу взаємодії іноді не зовсім логічно. Однак це дає змогу їм обирати найбільш прибутковий або ефективний варіант. Автоматизація побудована на інтеграції всього ланцюга постачання, а замкнені операції, навпаки, не дають змогу її впроваджувати [11]. Наприклад, якщо портів термінал не може дати вантажовласникам можливість стежити за вантажем у режимі онлайн, експедитори та вантажовласники будуть шукати інші транспортні маршрути.

Ще однією перешкодою на шляху автоматизації може стати автоматизація ручних процесів без їхнього попереднього спрощення [11], і на цьому етапі можна стикнутися зі спротивом працівників, які будуть намагатися відстоювати важливість кожного робочого місця та кожного процесу. У зв'язку з цим автоматизацію значно легше впровадити на новому терміналі, ніж автоматизувати той, що вже є.

Яскравим прикладом ефективності автоматизації можна вважати відкритий у травні 2017 році Qingdao New Qianwan Container Terminal (QQCTN), який став «..першим повністю автоматизованим

контейнерним терміналом в Азії» [11]. «Спочатку продуктивність обробки на терміналі складала 26,1 контейнера на один кран за годину; наприкінці 2018 року цей показник зріс до 33,1, що на 50 % вище середньосвітового показника» [11]. На причальному фронті для розвантаження судна в технологічних схемах було задіяно «...лише дев'ять портових працівників, тоді як у минулому їх було шістдесят» [11]. Завдяки автоматизації терміналу «...витрати на оплату праці зменшилися на 70 %, а ефективність зросла на 30 %, оскільки термінал може працювати вночі» [11]. Інвестиції в 468 млн дол. у будівництво терміналу окупилися досить швидко [11].

Необхідність переходу до більш екологічно стійкої економіки має величезний вплив на морські порти, які значною мірою залежать від вичерпного палива, особливо в умовах розташування портової інфраструктури в зоні міста. Тенденція «озеленення» та впровадження екологічно безпечних технологій стане основною проблемою портів, терміналів і транспортних комплексів вже найближчим часом. Біологічні альтернативи та практики циклічної економіки відкривають значні можливості для майбутнього портової інфраструктури, їхнього розвитку, залучення вантажопотоків, стійкості та конкурентоспроможності. Використання екологічної перевантажувальної техніки та інших екозасобів дасть змогу портам і терміналам вижити і ефективно працювати.

Сучасні автоматизовані портові термінали все частіше впроваджують передові технології моніторингу, щоб краще оцінювати стан і продуктивність своїх систем. Такі технології дають змогу вимірювати зношеність металу, тертя і поглинання енергії, вібрації, щоб приймати більш обґрунтовані рішення щодо технічного обслуговування і своєчасної заміни обладнання. Для оптимізації продуктивності та зниження ризику несподіваних збоїв у роботі обладнання використовують різні стратегії

прогнозованого технічного обслуговування перевантажувального обладнання [1].

Розвиток вантажного обладнання та ефективність його використання пов'язані з процесами автоматизації портів і терміналів. Автоматизація спричинила революцію портової галузі, відбулася зміна парадигм портових операцій на підставі передових технологій підвищення ефективності. Інноваційні термінали використовують автоматизовані крани та перевантажувачі, керовані транспортні засоби, інтелектуальні системи і штучний інтелект для оптимізації процесів обробки вантажів. Інтеграція роботів, датчиків і штучного інтелекту зменшує втручання людини, допомагаючи швидше переміщати вантажі, підвищує безпеку та оптимізує використання простору. Завдяки аналітиці даних у режимі реального часу та прогнозованому технічному обслуговуванню автоматизовані термінали забезпечують швидке, точне і стабільне виконання операцій із обробки вантажів. Ця технологічна еволюція знаменує значний прогрес у перетворенні традиційних портів на розумні глобальні торговельні центри, що швидко адаптуються до змін і плинності зовнішнього середовища [6].

Висновки

Автоматизація портів є вирішальним фактором розвитку сучасного портового обладнання, його інфраструктури та сприяє підвищенню ефективності діяльності не лише окремого терміналу чи порту, а і всього логістичного ланцюга.

Автоматизація відбувається по всьому світу від порту Роттердам до Лос-Анджелеса, від Сінгапуру до Ванкувера, включаючи мегатермінали в регіонах Близького Сходу та пілотні проєкти в Південній Африці.

Завдяки впровадженню інноваційних технологій, інтелектуальних систем, «розумного обладнання» відбувається трансформація традиційних портів в адаптивні центри глобальної торгівлі, що забезпечують швидкі, точні, стійкі,

ефективні операції з обробки вантажів, і різних транспортних засобів.

Як і будь-який інноваційний процес, автоматизація має свої переваги та недоліки, які і було висвітлено в роботі. Також існують значні перешкоди для автоматизації, особливо це стосується процесів модернізації портів, що вже є.

Екологічні стандарти та інноваційні технології доставлення вантажів, підвищення вимог щодо якості послуг із перевалки та необхідність зниження витрат із метою збереження конкурентоспроможності стануть причиною автоматизації традиційних портів перевантажувального обладнання з метою збільшення його ефективності.

Список використаних джерел

1. Four global trends that will change European seaports in the upcoming ten years. URL: <https://www.espon.eu/four-global-trends-will-change-european-seaports-upcoming-10-years>.
2. Lange Ann-Kathrin, Schwientek Anne, Jahn Carlos. Reducing Truck Congestion at Ports – Classification and Trends. URL: <https://d-nb.info/1147843724/34>.
3. Green vehicle technology to enhance the performance of a European port: A simulation model with a cost-benefit approach / Shayan Kavakeb, Trung Thanh Nguyen, Kay McGinley, Zaili Yang, Ian Jenkinson, Roisin Murray. URL: https://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/1894/1/TRC-D-15-00025R2_manuscript.pdf.
4. Малаксіано М. О. Особливості розробки проекту використання інноваційного перевантажувального устаткування в морському порту. *Ефективна економіка*. 2009. № 2. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=15>.
5. Port Equipment Market Size, Growth and Share 2023, Revenue, Trends, Competitive Analysis, Future Opportunities and Forecast 2030. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/port-equipment-market-size-growth-share-2023-revenue-trends-khan/>.
6. Global and national port trends 2030 Infrastructure Talks with Yuriy Gubankov, Anastas Kokkin, Egor Grebennikov, and other experts. URL: <https://www2.deloitte.com/ua/en/pages/press-room/expert/infrastructure-interview-port-trends.html>.
7. Port Automation Trends: Innovations in Container Handling. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/port-automation-trends-innovations-container-handling-mbhyec>.
8. Kongsberg and Wilhelmsen form the world's first autonomous shipping line. URL: <https://splash247.com/kongsberg-wilhelmsen-set-autonomous-shipping-jv/>.
9. On This Waterfront, Robot Longshoremen Are the New Contenders. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-04-25/on-this-waterfront-robot-longshoremen-are-the-new-contenders>.
10. Профспілки розпочали боротьбу з автоматизацією портів у Лос-Анджелесі. URL: https://logist.today/uk/dnevnik_logista/2019-04-09/profsojuzy-nachali-borbu-s-avtomatizaciej-portovyh-terminalov-v-los-andzhelese/.
11. A brief guide to container terminal automation. URL: <https://thetius.com/a-brief-guide-to-container-terminal-automation/>.

Мурад'ян Арсен Олегович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0002-6488-6627.

Демидюков Олексій Вікторович, аспірант кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеський національний морський університет. ORCID: 0000-0002-4791-3830.

Muradian Arsen Olegovich, Ph.d., docent Department of Port Operation and Cargo Work Technology, Odesa National Maritime University. ORCID: 0000-0002-6488-6627.

Demydiakov Oleksiy Viktorovych, postgraduate Department of Port Operation and Cargo Work Technology, Odesa National Maritime University. ORCID: 0000-0002-4791-3830.

Статтю прийнято 23.04.2024 р.

УДК 656.225:629.21

РОЗРОБЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ГАЛУЗІ

Канд. техн. наук Д. В. Арсененко, д-р техн. наук Д. В. Ломотько,
канд. техн. наук О. В. Ковальова

DEVELOPMENT OF THE OPTIMUM TECHNOLOGY FOR THE TRANSPORTATION OF GRAIN LOADS TAKING INTO ACCOUNT THE EXISTING TRENDS OF THE INDUSTRY

PhD (Tech.) D. Arsenenko, Dr. Sc. (Tech.) D. Lomotko, PhD (Tech.) O. Kovalova

Анотація. Розроблено процедуру управління розподілу зернових вантажів на припортових станціях. Створено перелік необхідних умов, за яких впровадження ступеневих маршрутів нівелює проблематику безпосереднього розподілу вантажів по місцях вивантаження в портовій інфраструктурі. Запропонована технологія розподілу масових вантажів дає змогу задіяти більшу кількість учасників перевізного процесу і створити умови для залучення інших попутних і паралельних вантажів.

Ключові слова: логістична технологія, зернові, масові вантажі, залізничний транспорт, логічний контроль, оператор інфраструктури, двоетапна транспортна задача, план перевезень.

Abstract. An algorithm and management procedure for the distribution of grain cargoes at port stations have been developed. A list of necessary conditions has been created under which the introduction of graded routes eliminates the problem of direct distribution of cargo by unloading points in the port infrastructure. The proposed technology for the distribution of bulk cargo allows to attract a larger number of participants in the transportation process and create conditions for the attraction of other accompanying cargo.

The above problems of railway transport, a significant reduction in the volume of transportation against the background of the existence of a fairly wide network of railways form a trend for route shipments, the vast majority of which, in turn, go to the port.

The introduction of staged loads as a compromise in the conditions of the trends acquired by the industry requires the creation of the necessary conditions along the entire route of the cargo. Market conditions as the main driver of the transportation process require a proactive response to variability. It is this approach with the use of transitional phases in the view of port stations that gives the technology such qualities that it becomes especially relevant when the operator of port stations becomes effective.

Areas of concentration of freight work, potential infrastructure facilities and port stations, where the formation of groups of wagons for unloading at the ports will take place, were determined by systematizing the collected information and identifying patterns that can be introduced taking into account the existing system of restrictions.

Looking directly at the composition of the transport sector for the above-mentioned period, it turns out that the share of cargo processed in Ukrainian ports is 159 million tons. For comparison, in the same period, rail transport was 314.3 million tons, road 222.6 million tons.

The above problems of railway transport, a significant reduction in the volume of transportation against the background of the existence of a fairly wide network of railways form a trend for route shipments, the vast majority of which, in turn, go to the port. Analyzing the above in the existing conditions, it is the ports that should set the vector for both the formation of sending and step routes based on the principles of resource conservation.

Keywords: *logistics technology, grain, bulk cargo, railway transport, logical control, infrastructure operator, two-stage transport task, transportation plan.*

Вступ. Аналіз роботи залізничного транспорту за останні роки свідчить про тенденцію скорочення обсягів перевезення, пов'язану з об'єктивними проблемами розвитку традиційної для кожного з регіонів країни промисловості, загальне скорочення обсягів транзитних вантажів. Кількісні та якісні експлуатаційні показники фіксують антирекорди. Так, обіг руху вагона зерновоза з вагонного відправлення може становити до 30 діб, і це випадки з вагонних відправлень, які мали місце до повномасштабної війни.

Зменшення обсягів вантажних перевезень в абсолютних числах становить, за різними оцінками, скорочення на 31 % за останні 10 років. Відправний на момент формування аналітики 2021 рік показує, що частка ВВП від аграрного, видобувного та переробного секторів, за різними оцінками, коливається в межах 25-27 %, і невід'ємну складову у формуванні таких показників становить транспортна система. Розглядаючи ситуацію стратегічно, частка вантажів, які були перероблені за встановлений період в українських портах, становить 159 млн т, у цей же період залізничний транспорт – 314,3 млн т, автомобільний – 222,6 млн т.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сформовано наукові підходи до формування організації роботи припортових станцій на базі новоутвореного структурного підрозділу «Оператор припортових станцій» [1] за рахунок упровадження оптимальної моделі роботи дослідного полігона, ринковий алгоритм роботи припортових станцій.

Зважаючи на постановку завдання в контексті реформування за сучасних умов,

розглянуто питання стратегічного оцінювання роботи галузі [2], способи нівелювання недоліків стану залізничної інфраструктури за рахунок впровадження СППР [3, 4] і формування принципів організації місцевої роботи в умовах скорочення обсягів перевезень [5]. Важливим аспектом у формуванні технології перевезень зернових вантажів залізницями України є розуміння процесів вантажоутворення, яке і формує попит на транспортну послугу [6, 9]. Необхідність формувати перевізний процес в умовах скорочення обсягів перевезень, стану інфраструктури та припортового характеру формування зернових відправлень [7] потребує враховувати ці чинники. Використання сучасних інформаційних та інтелектуальних технологій є необхідною складовою будь-якого логістичного процесу сьогодні, і врахування такого чинника має свої особливості на залізниці в наш час [8].

Серед недоліків слід визначити відсутність сучасних програм і наукових пропозицій, сумісних із ОПС. Визначені необхідністю ІКС також не мають наявних напрацювань.

Визначення мети та задачі дослідження. Формування технології перевезень зернових вантажів потребує враховувати наведені реалії сьогодення та водночас створювати відкрите інформаційне поле, яке дасть змогу не тільки оптимізувати експлуатаційні показники, а й залучити учасників перевізного процесу на всіх рівнях. Завданням дослідження є:

- провести аналіз місцевого вантажоутворення в умовах скорочення

обсягів перевезення, дефіциту інвестування і стану інфраструктури;

- провести аналіз вантажної та комерційної роботи припортових станцій;

- сформувати вимоги до єдиного інформаційного простору для всіх учасників перевізного процесу;

- оптимізувати технологічні процеси перевезення зернових вантажів на принципах ресурсозбереження.

Методологічною основою для аналізу сучасної системи місцевого вантажоутворення, варіативної маршрутизації та оптимальної роботи припортових станцій є системний аналіз, використання нечітких баз знань і методи математичної статистики. Райони концентрації вантажної роботи, потенційні інфраструктурні об'єкти і припортові станції, на яких відбуватиметься формування груп вагонів під вивантаження в порти, було визначено за допомогою систематизації зібраної інформації та виявлення закономірностей, які можна запровадити, зважаючи на наявну систему обмежень. За визначення економічної ефективності такого впровадження було використано метод середніх темпів.

Основна частина дослідження.

Практичним завданням дослідження є створення умов, за яких формування ступеневого маршруту не має у своїй системі обмежень критерію різних вантажоодержувачів або різних місць вивантаження в портовій інфраструктурі.

Ступеневий маршрут на сьогодні – це більше ніж альтернатива за вагонними відправленнями, що дає змогу зберегти клієнтів із невеликим обсягом навантаження і вивантаження. Увесь комплекс галузевих проблем має один із варіантів вирішення залучення інвестицій, і таке залучення повинно мати збалансований характер.

Розглядаючи принцип вантажоутворення зернових вантажів, слід зазначити, що в основі будь-якого рішення вантажовідправника або вантажоодержувача лежить комерційна складова, яка і є механізмом загального процесу. Процес експорту

зернових вантажів – це складна інтерпретація закупівельної та розподільчої логістики з визначеною системою обмежень у вигляді фінансового, складського і транспортного секторів. Нехтувати цими процесами, на думку монополіста, не є конструктивним, тим паче з огляду на роботу автомобільного транспорту, який за рахунок саме таких обґрунтованих підходів останні 10 років лише зміцнює свої позиції.

Розглянемо схему руху зернових вантажів із моменту формування залізничної відправки на пункті концентрації до безпосередньо відправної точки експорту (рис. 1).

Одним із рішень подібного практичного завдання є застосування двоетапної транспортної задачі – формування ступеневих або відправницьких маршрутів у пунктах комерційної концентрації з подальшим перерозподілом у припортових станціях до місць фактичного вивантаження.

Багатоетапна транспортна задача лінійного програмування може бути розв'язана з застосуванням стандартних алгоритмів, а наявність додаткової умови впливає лише на послідовність розв'язання задачі. У нашому випадку додаткова умова – це наявність у складі одного поїзда вантажів із призначенням у різні порти або термінали, які можуть бути як у ступеневих маршрутах, так і в складі збірного поїзда. Така потреба визначає ступінь впливу додаткових умов на послідовність розподілу вантажопотоків і етапність розв'язання задачі.

Для розв'язання задачі оптимізації розподілу зернових вантажів за типом двоетапного транспортного завдання лінійного програмування складають матрицю, до якої належать ресурси вантажовідправників і трейдерів аі, потреби експортерів, які купують зерно на терміналах накопичення і відвантажують зернові вантажі безпосередньо в корабель бj, і переробні можливості припортових станцій залежно від їхнього функціоналу dk.

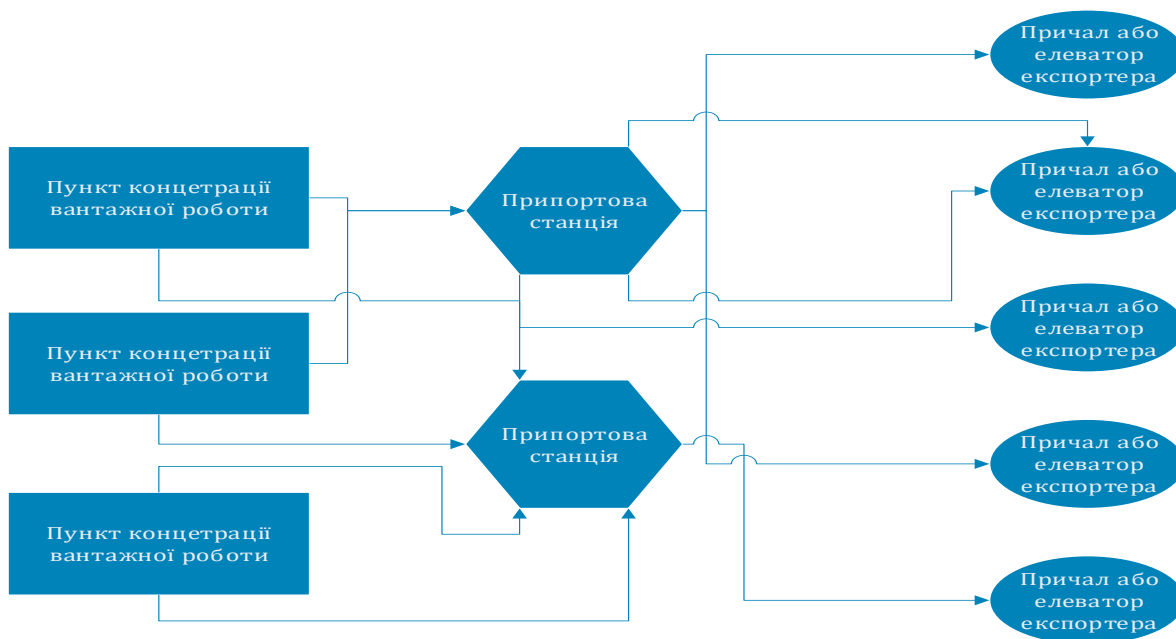


Рис. 1. Схема руху зернових вантажів із визначенням ключових інфраструктурних об’єктів, які впливають на формування залізничного відправлення

Розглянемо основні особливості послідовності розподілу вантажопотоків двоетапної транспортної задачі з прямими

поставками та наведемо її математичну модель (розв’язання за методом мінімального елемента):

$$C = \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^f y_{ik} z_{ik} + \sum_{k=1}^f \sum_{j=1}^v y_{kj} z_{kj} + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^v y_{ij} z_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^f z_{ik} + \sum_{i=1}^v z_{ij} = a_i; \quad (i = \overline{1, s}), \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^s z_{ik} \leq d_k; \quad (k = \overline{1, f}), \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^f z_{ki} + \sum_{i=1}^s z_{ij} = b_j; \quad (j = \overline{1, v}), \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^v z_{ki} \leq d_k; \quad (k = \overline{1, f}), \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i + b_j \leq d_k - \text{вантаж, прийнятий до перевезення } a_i, \text{ та вантаж, який перероблений} \\ \text{на припортовій станції } b_j, \text{ має відповідати потужностям } d_k \\ T_{Ai} + T_{Bj} \leq T_{\text{норм}} - \text{час доставлення вантажу має відповідати контрактним вимогам} \end{array} \right., \quad (6)$$

де (1) C_{min} – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування зернових вантажів із пунктів концентрації вантажної роботи на дільницях до причалів або терміналів через припортові станції;

(2) – обмеження повного вивезення вантажу з пунктів концентрації вантажної роботи на дільницях;

(3) – обмеження можливої пропускної спроможності кожної з припортових станцій під час прибуття вантажу;

(4) – обмеження обов'язкового задоволення потреб кожного експортера на причалі або терміналі;

(5) – обмеження можливої пропускної спроможності кожної з припортових станцій під час відправлення вантажу безпосередньо на причали або порти;

(6) – сучасна система обмежень перевезення зернових вантажів за ринкових умов.

Як і в класичній транспортній задачі, необхідною та достатньою умовою розв'язання задачі є вимога збалансованості обсягів виробництва обсягів споживання $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$. За класичного розуміння транспортної задачі, якщо сума ресурсів

більше (менше) суми потреб, то для перетворення відкритої транспортної задачі в закриту вводять стовпець фіктивного споживача (рядок фіктивного відправника), потреби якого дорівнюють надлишку ресурсів (запаси якого дорівнюють надлишку потреб), проте, зважаючи на визначені умови договірних зобов'язань між трейдером та експортером і оператором перевізного процесу, така ситуація в нашому випадку унеможливується, що окремо виражено в системі обмежень.

Для визначення послідовності розподілу вантажопотоків необхідно порівняти загальну пропускну спроможність припортових станцій $\sum_{k=1}^p d_k$ з обсягами заявок на перевезення $\sum_{i=1}^m a_i$ та обсягами потреб вантажоодержувача з урахуванням технологічної ситуації на об'єктах інфраструктури $\sum_{j=1}^n b_j$. Розглянемо оптимальний варіант розв'язання нашої двоетапної транспортної задачі (рис. 2).

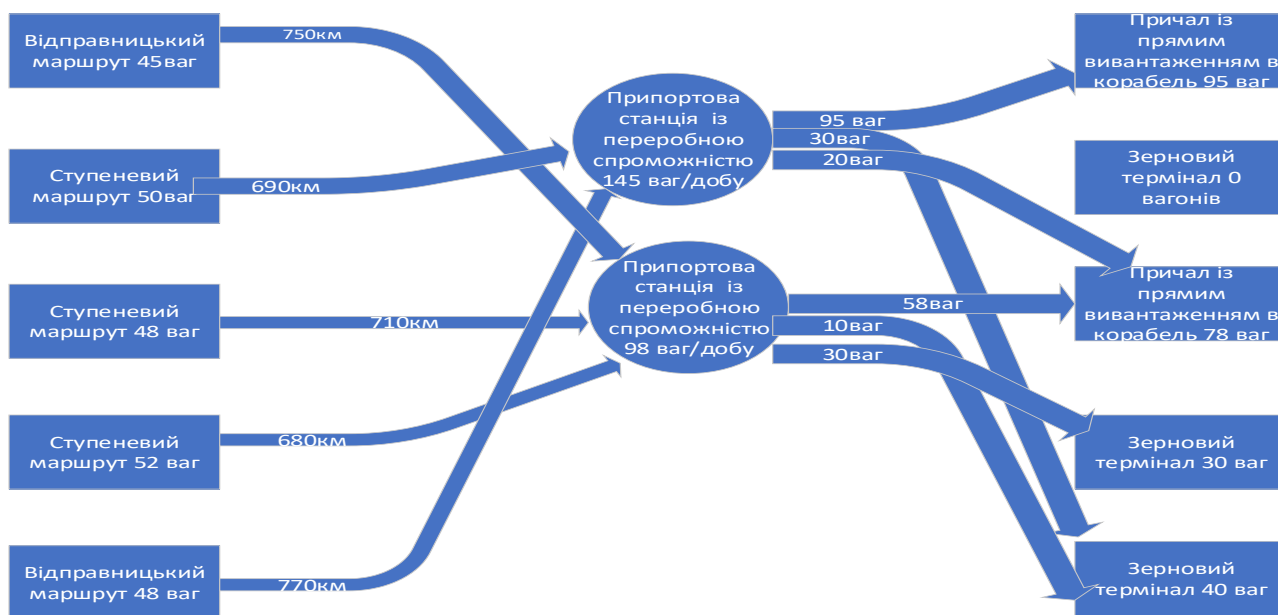


Рис. 2. Оптимальний план перевезення зернових вантажів у визначених умовах

Якщо загальна пропускна спроможність припортових станцій більше або дорівнює сумарним обсягам заявок на перевезення від вантажовідправників (трейдерів) і забезпечення потреб вантажоодержувачів (експортерів), це свідчить про те, що сумарні ємності припортових станцій можуть бути використані або повністю, або з резервом:

$$\sum_{k=1}^p d_k \geq \sum_{i=1}^m a_i \text{ та } \sum_{k=1}^p d_k \geq \sum_{j=1}^m b_j . \quad (7)$$

Послідовність розв'язання задачі в такому випадку та сама, як і в багатоетапній транспортній задачі без прямих поставчань. У класичному розумінні розв'язання двоетапної транспортної задачі існує варіант, за якого загальна пропускна спроможність перевалочних пунктів менше сумарних обсягів виробництва та споживання, і такий варіант потребує окремого розв'язання

ємність кожної припортової станції в будь-якому плані перевезень однорідного вантажу буде використана повністю.

У цьому випадку мають місце три окремі транспортні задачі, і загальний оптимум значень цільової функції C дорівнює сумі оптимумів на трьох частинах задачі:

$$C = C_{nn-nv} + C_{nn-nc} + C_{nc-nv} , \quad (10)$$

де C_{nn-nv} – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажу з пунктів відправлення до пунктів призначення;

$$\sum_{k=1}^p d_k < \sum_{i=1}^m a_i \text{ та } \sum_{k=1}^p d_k < \sum_{j=1}^m b_j . \quad (8)$$

Задачу розв'язують у рамках єдиної моделі, якщо після розподілу в блоці (відправницькі маршрути і ступеневі з призначенням на один об'єкт інфраструктури) сумарних потужностей припортових станцій стає більше, ніж решти обсягів заявлених перевезень. Розв'язання такої задачі в нашому випадку не потрібно, і причиною тому є великі затрати об'єктів інфраструктури у випадку невиконання контрактних домовленостей із морським господарством, а безпосередні залізничні експлуатаційні витрати, які будуть накопичуватися під час розв'язання цієї задачі, унеможливають такий варіант. У цьому випадку оператор інфраструктури не дає вагони під навантаження, навіть не приймає вагони до перевезення і залишає вже завантажені поїзди в статусі «кинуті», у такий спосіб розтягуючи розв'язання задачі по своїй залізничній мережі.

За рівності сумарних потужностей пунктів перевалки з рештою обсягів виробництва та споживання, коли

$$\sum_{i=1}^m a_i - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = \sum_{k=1}^p d_k \text{ та } \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = \sum_{k=1}^p d_k , \quad (9)$$

C_{nn-nc} – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажу з пунктів відправлення до пунктів перевалки;

C_{nc-nv} – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажу з пунктів перевалки до пунктів призначення.

Висновки. Необхідність залучення ефективної маршрутизації, в основі якої лежить завдання скорочення експлуатаційних витрат та оптимізації основних показників роботи залізничного транспорту, спричиняє зворотній відгук від районів, що тяжіють до вивантаження, – портів. Критерії визначення пункту концентрації вантажної та комерційної

роботи дають змогу стверджувати, що пункти концентрації на дільницях і припортові райони мають спільні орієнтири в оперативній роботі.

Стратегічне планування в умовах скорочення обсягів перевезення, критичного стану інфраструктури та дефіциту інвестування спонукає до формування шляхів ефективно маршрутизації і впровадження такого підходу в припортових станціях, що спростить формування ступеневих маршрутів із зерновими вантажами і дасть

змогу скоротити час на його формування, за попередніми підрахунками, на 10-15 % і обіг вагона-зерновоза.

Інструменти для вирішення поставленого питання суттєво обмежені, тому в подальшому використання запропонованого підходу полягає в його застосуванні у складі інформаційно-керуючої системи. Прийняття рішень, зокрема в умовах роботи припортових станцій при максимумі своїх потужностей, має зважати на стан вагонного, локомотивного господарств із залученням СППР.

Список використаних джерел

1. Проект положення про філію «Оператор припортових станцій» Акціонерного товариства «Українська залізниця». Із Києва СКЕДО НЗ-1, М, ДН регіональних філій АТ «Укрзалізниця» ЦМ, ЦРБ.
2. Lomotko D. V. Methodological Aspect of the Logistics Technologies Formation in Reforming Processes on the Railways. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 2762-2766. ISSN 2352-1465. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.482>.
3. Арсененко Д. В., Шер І. В., Шер О. М. Впровадження СППР як проміжної ланки між сучасними реаліями та необхідністю відповідати сучасним трендам в транспортній галузі. *Тези доповідей 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27–28 листопада 2023 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 178-179.
4. Ломотько Д. В. Формування нечіткої бази знань та системи підтримки прийняття рішення у підрозділах залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2006. № 2. С. 52-58.
5. Носко Н. А., Ломотько Д. В. Організація роботи залізничних станцій малодіяльних ділянок. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей 1-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (24-30 січня 2020 р.)*. Трускавець; Харків : УкрДУЗТ, 2020. С. 72-73.
6. Арсененко Д. В. Удосконалення організації перевезення зернових вантажів залізничними ступінчастими маршрутами. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 184. С. 92-101.
7. Арсененко Д. В. Удосконалення логістичного управління транспортуванням зернових вантажів залізничним транспортом: дис. ... канд. техн. наук. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 112-115.
8. Ломотько Д. В., Сморгісь І. В., Арсененко Д. В. Формування залізничних логістичних ланцюгів постачання контейнерних вантажів на базі когнітивних технологій. *Українська залізниця*. 2018. № 9 (63). С. 11-14.
9. De Faria, Carlos Henrique F., Almeida, João Flávio F., Pinto, Luiz Ricardo. Simulation–optimization approach for sustainable planning of intermodal logistics in the Brazilian grain export industry (2024) *Decision Analytics Journal*, 10, art. no. 100388. DOI: 10.1016/j.dajour.2023.100388.

Арсененко Данило Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7757-8706. Тел.: (050) 155-26-74. E-mail: arsenenkodanil@gmail.com.

Ломотко Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925.

Тел.: (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.

Ковальова Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. Тел.: (067) 252-31-85. E-mail: oksanazoom@ukr.net.

Arsenenko Danylo, PhD (Tech.). Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. E-mail: arsenenkodanil@gmail.com.

Lomotko Denis, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of transport systems and logistics Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. E-mail: den@kart.edu.ua.

Kovalova Oksana, PhD (Tech.). Associate Professor, department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. E-mail: oksanazoom@ukr.net.

Статтю отримано 06.05.2024 р.

УДК 621.314

ЗАСТОСУВАННЯ М'ЯКОЇ КОМУТАЦІЇ У ТРИФАЗНИХ ІНВЕРТОРАХ НАПРУГИ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Кандидати техн. наук О. І. Семененко, Ю. О. Семененко,
старш. викл. М. М. Одегов

APPLICATION OF SOFT SWITCHING IN THREE-PHASE VOLTAGE INVERTERS OF TRACTIONAL ROLLING STOCK

PhD (Tech.) O. Semenenko, PhD (Tech.) Y. Semenenko,
St. lecturer M. Odiegov

Анотація. У статті наведено результати дослідження тягового інвертора з м'якою комутацією силових ключів, реалізовані за допомогою вузлів м'якої комутації на IGBT. Застосування м'якої комутації дає змогу знижувати комутаційні втрати, підвищувати частоту ШІМ і поліпшувати інші показники перетворювача. Виконано синтез схеми та алгоритму реалізації м'якої комутації у ключах трифазного мостового інвертора напруги. Проаналізовано характеристики перетворювача з застосуванням модернізованого вузла м'якої комутації.

Ключові слова: м'яка комутація, IGBT, вузол м'якої комутації, частота ШІМ, трифазний мостовий інвертор напруги.

Abstract. Autonomous voltage inverters with PWM, which are used in electric drive systems with brushless motors, occupy an important place in the complex of electrical equipment of modern traction rolling stock of railways. The article presents the results of the research of the traction three-phase bridge voltage inverter with soft switching of power switches. Using the soft switching mode allows you to reduce the switching losses in the power transistors of the keys, increase the PWM frequency and improve other performance indicators of the converter. It is advisable to implement soft switching in the key transistors of the three-phase voltage inverter using soft switching nodes with fast-acting four-quadrant switches based on IGBT.

It is proposed to consider the possibility of using transistor switches of a voltage inverter with capacitive non-dissipative snubbers at high PWM frequencies. For this purpose, a synthesis of the scheme and algorithm for the implementation of soft switching in a three-phase bridge voltage inverter with bipolar sinusoidal PWM with soft switching nodes with high-speed four-quadrant switches based on IGBT was performed. An analysis of the characteristics of the three-phase voltage inverter was carried out when using high-speed switches in the soft switching nodes to implement soft switching in the power transistors of the inverter switches.

On the basis of the study, it is proposed to modernize the scheme of the soft switching unit in order to provide better preparation for the switching of the power transistors of the keys at large load currents. The improved soft switching unit includes low-voltage sources of constant voltage, which will compensate for energy losses in the recharging circuit of the snubber capacitors and contribute to the soft switching on of the power transistors of the voltage inverter keys. The performance test was carried out and the characteristics of the converter were analyzed when using a modernized soft switching node using simulation modeling in the MATLAB package.

Keywords: *soft switching, IGBT, soft switching node, PWM frequency, three-phase bridge voltage inverter.*

Вступ. У комплексі електрообладнання сучасного тягового рухомого складу залізниць важливими є автономні інвертори напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), застосовувані в системах електропривода з безколекторними двигунами. Відомо, що підвищення частоти ШІМ дає змогу поліпшити енергетичні та динамічні характеристики тягових перетворювачів, а також зменшити масу і розміри силових фільтрів [1, 2], що дуже важливо в умовах застосування на рухомому складі. При цьому слід ураховувати, що зростання частоти ШІМ викликає збільшення динамічних втрат енергії в напівпровідникових керованих приладах силових ключів при виконанні жорсткої комутації (англ. *Hard Switching*), яка є основним режимом комутації в тягових інверторах напруги. Зменшення втрат енергії при комутації може бути досягнуто використанням швидкодіючих приладів і застосуванням спеціальних схемотехнічних рішень та алгоритмів керування [3-7], що забезпечують реалізацію м'якої комутації (*Soft Switching*) у силових ключах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Досвід експлуатації тягових перетворювачів, створених на базі швидкодіючих силових ключів на *IGBT*,

крім їхніх суттєвих переваг виявив і деякі недоліки. Вони пов'язані з необхідністю формування комутаційних траєкторій із безпечним для напівпровідникових керованих приладів рівнем швидкості зростання напруги (du/dt) і струму (di/dt), а також обмеженням їхніх пікових значень при комутації. Круті фронти імпульсів напруги і струму в силовій схемі та на виході перетворювачів, крім небезпеки пошкодження напівпровідникових приладів, спричиняють значне шкідливе електромагнітне випромінювання та викликають прискорене старіння ізоляції тягових електродвигунів і з'єднувальних кабелів [2, 8-10].

З метою обмеження швидкості зростання напруги і струму, а також зниження комутаційних втрат у силових приладах використовують ланки комутаційного захисту, які прийнято називати снаберами (англ. *snubber* – амортизатор, демпфер). Фактично можна сказати, що в керованих напівпровідникових приладах при застосуванні снаберів реалізовано м'яку комутацію [1], а необхідність використання дисипативних елементів у складі ланок комутаційного захисту призводить до значних втрат енергії в них і зниження загального ККД тягових перетворювачів.

Крім того, дисипативні елементи (резистори), що розсіюють накопичену реактивними елементами снаберів енергію, за підвищених частот ШІМ мають досить значні масу і габаритні розміри, а також потребують охолодження, що ускладнює конструкцію силових блоків перетворювачів.

Для спрощення конструкції перетворювачів силові *IGBT* можна застосовувати в «безснаберному» режимі, коли самі керовані прилади беруть на себе функцію снабера [8]. При цьому вони обмежують швидкість зростання струму і напруги, перебуваючи під час комутації в активному режимі. У результаті застосування такого рішення спрощується силова схема, дещо знижено загальні втрати енергії в тягових перетворювачах, і в самих *IGBT* динамічні втрати значно зростають. Цей процес супроводжується зростанням тепловиділення в силових приладах, що ускладнює проблему охолодження та знижує надійність їхньої роботи. У більшості випадків вона може бути вирішена лише зниженням частоти перемикачів ключів, що потребує використання в перетворювачах важких і дорогих фільтрів.

Більш ефективно вирішують зазначені вище проблеми реалізацією м'якої комутації ключів – застосуванням у перетворювачах спеціальних схемотехнічних рішень і алгоритмів керування силовими ключами. До них належать алгоритми перемикачів силових приладів ключів за нульової напруги (*ZVS*), нульового струму (*ZCS*) та інші варіанти [2-7], де переважно реалізують два види м'якої комутації: резонансний і квазірезонансний. Причому в закордонних публікаціях [3-7] використання таких рішень розглянуто лише для діапазону малих і середніх потужностей перетворювачів.

У цій статті розглянуто використання м'якої комутації у ключах трифазних інверторів напруги тягового електропривода рухомого складу з

асинхронними двигунами застосуванням вузлів м'якої комутації (ВК) і спеціального алгоритму керування. У таких перетворювачах формуються комутаційні траєкторії з безпечним для силових приладів рівнем швидкості зростання струму та напруги, застосовано бездисипативні снабери, що дає змогу підвищувати частоту ШІМ та поліпшувати показники надійності роботи ключів [1, 2, 8-10].

Визначення мети та задач дослідження. Метою роботи є дослідження тягового трифазного інвертора напруги з ВК на підвищених частотах ШІМ. Основні завдання дослідження:

- синтез схеми та алгоритму реалізації м'якої комутації у трифазному мостовому інверторі напруги з ВК при застосуванні ключів комутатора з емнісними бездисипативними снаберами на підвищених частотах ШІМ;

- аналіз характеристик трифазного інвертора напруги за використання у ВК швидкодіючих чотириквadrантних ключів для реалізації м'якої комутації в силових *IGBT* комутатора, у тому числі з застосуванням імітаційного моделювання в пакеті *MATLAB*.

Основна частина. Для захисту силових приладів ключів від комутаційних перевантажень у перетворювачах із ВК використовують снабери, які називають бездисипативними, бо до їхнього складу не входять елементи розсіювання енергії [8-10]. У таких перетворювачах накопичена під час комутації реактивними елементами енергія не розсіюється, а з використанням ВК до наступної комутації повертається до силової ланки. Тобто застосування перетворювачів із ВК дійсно забезпечує підвищення ККД, адже динамічні втрати енергії в них практично відсутні й пов'язані переважно зі статичними втратами елементів силової ланки.

За допомогою ВК у трифазному мостовому інверторі напруги відбувається підготовка до комутації. Вона полягає в забезпеченні перезарядження снаберних

конденсаторів для реалізації м'якого увімкнення силового *IGBT* ключа за нульової напруги. Час підготовки до м'якого увімкнення силового *IGBT* інвертора включає не тільки час перезарядження цих конденсаторів, а й час комутації ключа ВК. Допоміжні чотириквADRантні ключі ВК в усіх запропонованих схемах, наведених у роботах [1, 2, 11] та інших публікаціях, для спрощення системи керування ключами ВК і зниження вартості конструкції перетворювача запропоновано виконувати на базі тиристорів. Через відносно низьку швидкодію тиристорів ВК виникає обмеження діапазону регулювання ширини імпульсів вихідної напруги, що виражено в обмеженні максимального значення коефіцієнта заповнення τ_{max} [9, 10]. Це означає, що обмежений і діапазон регулювання амплітудних значень вихідної

напруги тягового трифазного інвертора, адже максимальна лінійна напруга

$$U_{lmax} \sim \tau_{max} = \frac{t_{imax}}{T}, \quad (1)$$

де t_{imax} та T – максимальна ширина імпульсу і тривалість періоду ШІМ.

Особливо відчутно цей недолік проявляється при застосуванні в комутаторі тягового перетворювача силових ключів на *IGBT* за підвищених частот ШІМ. Щоб зменшити негативний вплив цього фактора, слід скоротити тривалість роботи ВК, виконавши його на базі швидкодіючого чотириквADRантного ключа на *IGBT*. У схемі такого швидкодіючого ВК, наведеній на рис. 1 [9, 10], використано комутаційний дросель насичення L_k , особливості застосування якого розглянуто в роботах [2, 11].

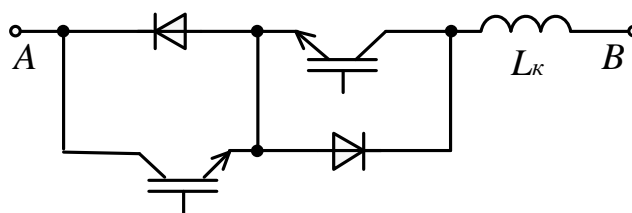


Рис. 1. Схема швидкодіючого вузла м'якої комутації на *IGBT*

Останніми роками відбувалося поступове удосконалення технології виробництва та поліпшення характеристик силових *IGBT*, що забезпечило підвищення їхньої надійності, здешевлення та розширення номенклатури. ЧотириквADRантний ключ ВК трифазного інвертора напруги працює лише під час перезарядження снаберних конденсаторів, тобто короткочасно, при цьому до нього прикладено напругу $U_d/2$. Отже, встановлена потужність ключа ВК порівняно з потужністю силових ключів основного комутатора значно нижче [2]. Крім того, у схемі ВК на базі швидкодіючих *IGBT* можна буде як комутаційні дроселі (L_k

на рис. 1) використати легші й менші за розмірами дроселі насичення. Це пов'язано з тим, що потрібен менший час затримки наростання струму за комутації *IGBT* ключа ВК порівняно з тиристорним варіантом. Враховуючи ці фактори, можна сказати, що застосування *IGBT* замість тиристорів забезпечить розширення діапазону регулювання ширини імпульсів вихідної напруги інвертора, зниження втрат енергії, спрощення конструкції, зменшення габаритних розмірів і маси елементів ВК і не призведе до суттєвого збільшення вартості тягового перетворювача.

Досліджували роботу трифазного інвертора напруги зі швидкодіючим ВК на

IGBT на базі схеми, запропонованої в роботі [2] і дещо доопрацьованої згідно з наведеними в роботі [1] пропозиціями, у

результаті чого отримано симетричну схему (рис. 2).

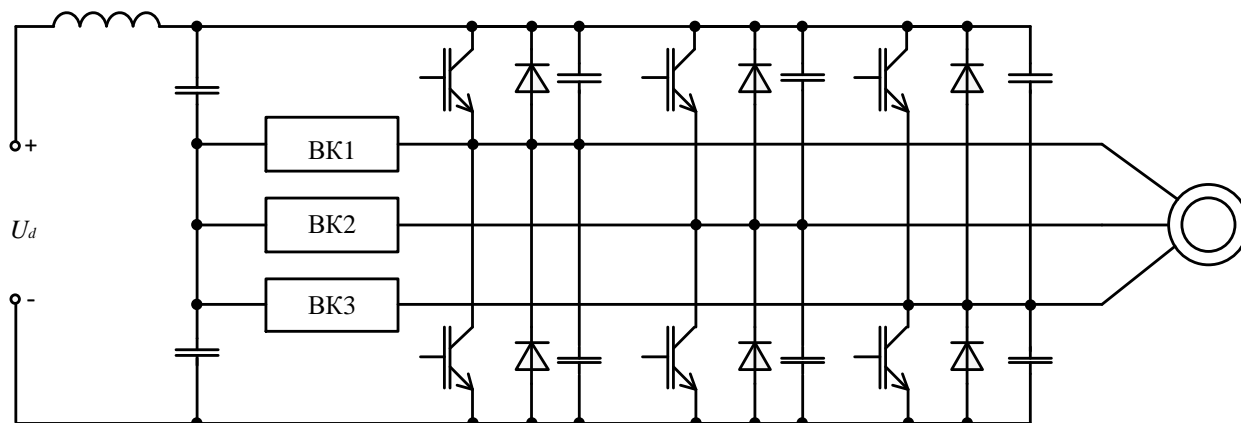


Рис. 2. Трифазний мостовий інвертор напруги з вузлами м'якої комутації

Однофазні напівмости інвертора напруги зібрані на базі двоквADRантних ключів знакозмінного струму, до складу яких входять зустрічно паралельно поєднані між собою *IGBT* і діод. Також до кожного ключа входить конденсатор бездисипативного снабера, що захищає транзистор від динамічних втрат при вимиканні. Така зміна у схемі забезпечить більш ефективний комутаційний захист силових *IGBT* від втрат при вимиканні на підвищених частотах ШІМ. Це пов'язано з тим, що в симетричній схемі інвертора (рис. 2) конструктивно легше реалізувати присіднання снаберних конденсаторів до кожного *IGBT* з мінімальним індуктивним опором порівняно зі схемою з роботи [2], яка є несиметричною через застосування спільного снаберного конденсатора для обох ключів напівмосту. При цьому слід ураховувати також те, що конденсатори снаберів двох ключів напівмосту підключені за змінним струмом паралельно, а їхня сумарна ємність визначена ємністю вказаного вище спільного снаберного конденсатора [2]. Через це зміна кількості конденсаторів у схемі забезпечить уніфікацію силових ключів інвертора та

поліпшення їхнього захисту і не вплине на розміри конструкції.

Як видно з рис. 2, усі ВК з одного боку (на рис. 1 точка *B*) приєднані до середньої точки однофазних напівмостів тягового трифазного інвертора напруги [2, 9]. З іншого боку (точка *A*) ВК приєднані до штучної нульової точки джерела живлення, утвореної ємнісним дільником напруги. Джерело енергії постійного струму напругою U_d забезпечує живлення трифазного інвертора напруги через вхідний аперіодичний *LC* фільтр, до складу якого входить ємнісний дільник напруги, що утворює штучну нульову точку.

Відомо, що у трифазному мостовому інверторі напруги ефективно може бути реалізована лише двополярна синусоїдальна ШІМ [1, 2], за якої верхній і нижній ключі однофазних напівмостів по чергово перемикаються, тобто коли один вимикається, інший відразу вмикається. Для реалізації м'якої комутації потрібно дещо змінити алгоритм керування ключами, щоб передбачити після кожного вимикання силового ключа короткочасну паузу для підготовки до увімкнення силового *IGBT* наступного ключа напівмосту за нульової

напруги на ньому. Виконання цього завдання, як уже зазначено вище, покладено на ВК, який має забезпечувати розряд снаберного конденсатора ключа перед увімкненням силового транзистора [1, 2].

Як відбуваються комутації протягом одного періоду ШІМ, розглянемо за схемою рис. 3. Тут показано частину трифазного

мостового інвертора: ємнісний дільник напруги $C1_\phi$, $C2_\phi$, однофазний напівміст на базі силових транзисторів $VT1$, $VT2$ і швидкодіючий ВК на $IGBT$ $VT1_\kappa$, $VT2_\kappa$ і діодах $VD1_\kappa$, $VD2_\kappa$. Діаграми струму і напруги, які пояснюють роботу схеми, наведені на рис. 4.

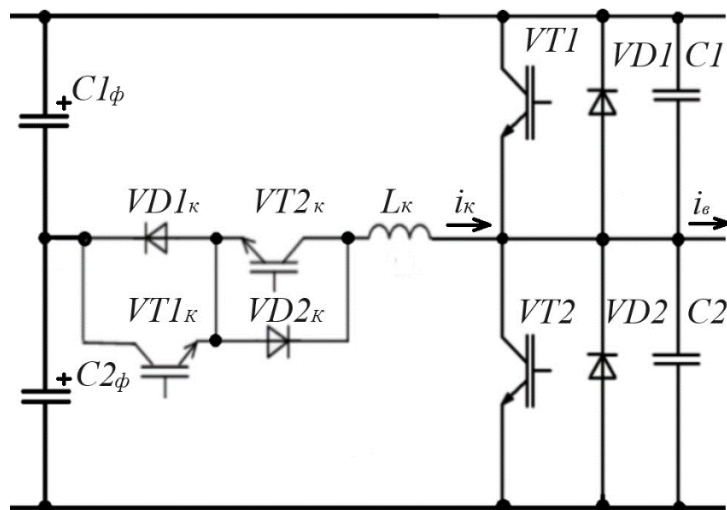


Рис. 3. Схема однофазного напівмосту тягового інвертора напруги з вузлом м'якої комутації

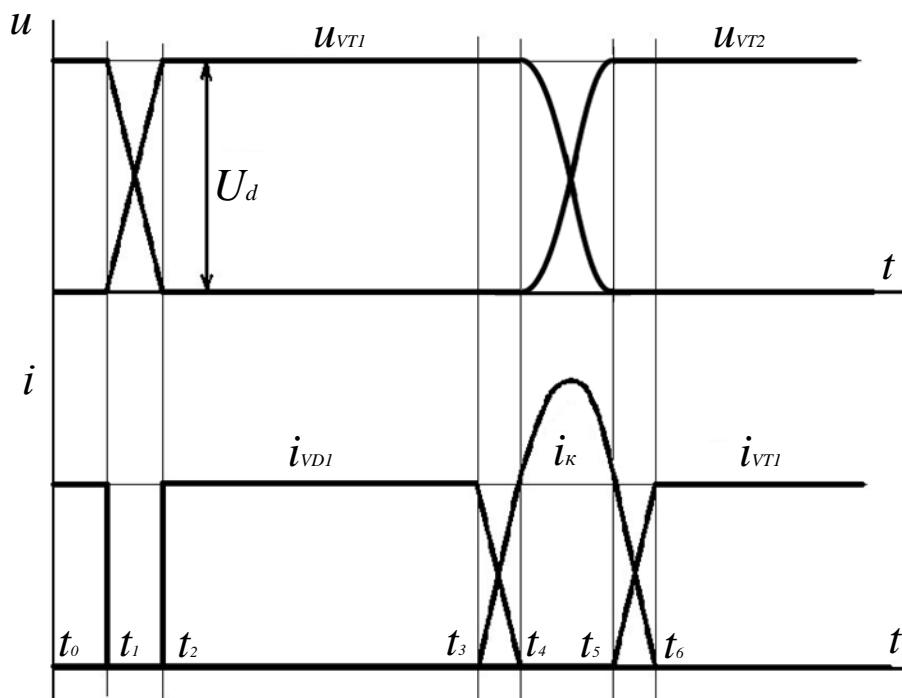


Рис. 4. Діаграми напруги і струму силових ключів однофазного напівмосту і вузла м'якої комутації

Нехай у момент t_0 (рис. 4) увімкнений силовий *IGBT* верхнього ключа $VT1$. При вимиканні $VT1$ у момент часу t_1 струм, що протікав через нього, переходить на паралельну гілку снаберного конденсатора $C1$, звільняючи від навантаження транзистор ключа, тому комутація відбувається м'яко за нульового струму. Заряджання конденсатора $C1$ верхнього ключа однофазного напівмосту інвертора відбувається від джерела енергії U_d струмом, що складає частину вихідного струму i_e . Цей процес супроводжується одночасним розряджанням конденсатора $C2$ нижнього ключа другою частиною струму i_e . Оскільки конденсатори мають однакову ємність, то під час перезаряджання у снаберних конденсаторах напівмосту протікають однакові за величиною струми, які дорівнюють $i_e/2$.

Зростання напруги на транзисторі верхнього ключа u_{VT1} і зниження напруги на транзисторі нижнього ключа u_{VT2} від моменту t_1 до моменту t_2 відбувається за лінійним законом (рис. 4), що пояснюється так. Протягом процесу перезаряджання снаберних конденсаторів завдяки великій індуктивності навантаження вихідний струм i_e практично не змінюється, отже, майже незмінною є і швидкість зміни напруги на ключах:

$$i_e = i_{C1} + i_{C2} = C_{12} \frac{du}{dt} \approx const, \quad (2)$$

де C_{12} – спільна ємність двох конденсаторів $C1$ і $C2$.

У момент часу t_2 заряджання конденсатора $C1$ і розряджання конденсатора $C2$ закінчується, внаслідок чого напруга на верхньому ключі досягне значення U_d , а на нижньому ключі буде нульова напруга. Закінчення цього процесу означає закінчення формування заднього фронту імпульсу вихідної напруги позитивної полярності. Після цього струм i_e почне перезаряджати конденсатор $C2$ напругою протилежної полярності, під дією

якої відкриється силовий діод нижнього ключа $VD2$. Далі вихідний струм i_e буде протікати через діод $VD2$, що продовжуватиметься до наступного увімкнення силового транзистора верхнього ключа.

Як було показано, швидкість протікання процесу перезаряджання, за рівнянням (2), прямо пропорційна вихідному струму i_e . Отже, самостійне перезаряджання снаберних конденсаторів за малого струму i_e відбуватиметься дуже повільно. Для того щоб обмежити тривалість процесу перезаряджання, його потрібно прискорювати за допомогою ВК [2]. Алгоритм керування чотириквadrантним ключем ВК має передбачати таку можливість лише за малих струмів i_e , що сприятиме економії витрат енергії та зниженню навантаження елементів ВК за великих значень вихідного струму напівмосту. За попередніми розрахунками, для тягових трифазних інверторів за напруг живлення $2\div 3$ кВ такими значеннями вихідного струму будуть струми більше 100 А.

Для підготовки до увімкнення силового *IGBT* верхнього ключа $VT1$ у момент часу t_3 вмикається транзистор $VT1_k$ і відкривається діод $VD2_k$ чотириквadrантного ключа ВК. До комутаційного дроселя L_k прикладено напругу $U_d/2$ від нижнього конденсатора дільника напруги $C2_\phi$ через відкритий силовий діод $VD2$. Комутаційний дросель затримує наростання струму вузла комутації i_k , за рахунок чого увімкнення транзистора $VT1_k$ і діода $VD2_k$ чотириквadrантного ключа ВК відбувається за нульового струму.

З моменту увімкнення транзистора $VT1_k$ струм вузла комутації i_k під дією напруги $U_{C1\phi}$ починає наростати, знижуючи струм у силовому діоді $VD2$. Коли він перевищує величину вихідного струму фази інвертора i_e , то змінює в діоді $VD2$ напрямок струму на протилежний. Після розсмоктування носіїв зарядів у діоді $VD2$ у момент t_4 він вимикається, і різницевий струм $(i_k - i_e)$, що з указаної вище причини поділений на дві рівні частини,

розпочинає заряджати конденсатор C_2 нижнього ключа та розряджати конденсатор C_1 верхнього ключа.

Після зниження напруги на конденсаторі C_1 до рівня напруги на верхньому конденсаторі дільника напруги $C_{1\phi}$, а на конденсаторі C_2 підвищення напруги до рівня напруги на нижньому конденсаторі дільника напруги $C_{2\phi}$ струм вузла комутації i_k досягає максимуму та продовжує протікати завдяки енергії, що накопичив комутаційний дросель L_k . Тобто протягом часу від t_4 до t_5 відбувається коливальний процес у розгалуженому $L_k C_{12}$ контурі, і спадання та зростання напруги на снаберних конденсаторах C_1 і C_2 мають відповідну форму косинусоїди (рис. 4). Якщо припустити, що елементи чотириквadrантного ключа ВК ідеальні, напруга на конденсаторі C_1 під час розряджання має відповідні постійну та змінну складові:

$$u_{C1} = U_{C1\phi} + u_L = U_d/2 + U_{C1n} \cos \omega t, \quad (3)$$

де $U_{C1\phi} = U_{C2\phi} = U_d/2$ – напруга на конденсаторах фільтра;

$u_L = U_{C1n} \cos \omega t$ – напруга на комутаційному дроселі, яка дорівнює змінній складовій напруги на конденсаторі снабера під час розряджання;

$U_{C1n} = U_{C2n} = U_d/2$ – початкова амплітуда змінної складової напруги на конденсаторі снабера під час розряджання;
 ω – колова частота коливальності.

Відповідно напруга на конденсаторі C_2 під час процесу заряджання

$$u_{C2} = U_{C2\phi} - u_L = U_d/2 - U_{C2n} \cos \omega t. \quad (4)$$

У момент t_5 конденсатор C_2 зарядиться до напруги джерела живлення U_d , одночасно з цим конденсатор C_1 повністю розрядиться, після чого реалізується м'яке увімкнення транзистора

VT_1 верхнього силового ключа за нульової напруги. Закінчення процесу ввімкнення транзистора VT_1 верхнього ключа означає закінчення формування переднього фронту імпульсу вихідної напруги позитивної полярності та початок протікання струму через транзистор i_{VT1} (рис. 4). Наступне наростання струму $IGBT$ призведе до того, що в момент t_6 він досягне значення вихідного струму i_e . У цей момент струм вузла комутації i_k спаде до нуля і короткочасно змінить напрямок на протилежний. Після розсмоктування носіїв зарядів у діоді VD_{2k} чотириквadrантного ключа ВК транзистор VT_{1k} слід вимкнути за нульового струму.

Через те що реальні чотириквadrантний ключ і дросель L_k ВК мають деякий, хоч і невеликий, резистивний опір, амплітуда змінної складової напруги снаберних конденсаторів у контурі перезаряджання буде мати загасання. У результаті аналізу встановлено, що в тяговому трифазному інверторі з ВК потужністю до 1200 кВт за напруги живлення 2÷3 кВ залежно від струму навантаження і тривалості процесу перезаряджання снаберних конденсаторів напруга на силовому $IGBT$ перед ввімкненням може складати до 10 В. За рахунок такої напруги при ввімкненні виникатиме різке зростання струму силового транзистора, що буде збільшувати втрати енергії в ньому. Для того щоб не допускати такої напруги на силових транзисторах перед увімкненням, запропоновано модернізований ВК, схема якого наведена на рис. 5 [12].

До складу модернізованого ВК уведено низьковольтні джерела постійної напруги E_1 та E_2 , які мають компенсувати втрати енергії протягом коливального процесу в розгалуженому $L_k C_{12}$ контурі перезаряджання. Тобто ці джерела напруги у ВК забезпечуватимуть більш повне розряджання снаберних конденсаторів і сприятимуть м'якому ввімкненню силових $IGBT$ перетворювача.

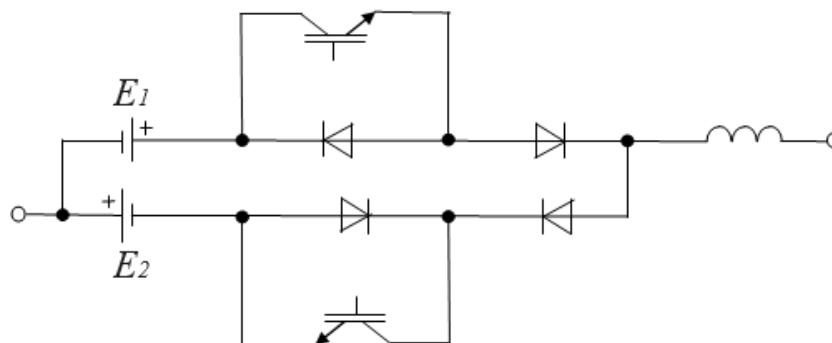


Рис. 5. Схема модернізованого вузла м'якої комутації

У результаті попереднього аналізу встановлено, що в тяговому трифазному інверторі напруги потужністю до 1200 кВт за напруги живлення 2÷3 кВ до складу модернізованих ВК слід ввести низьковольтні джерела напругою не менше 6 В.

Перевірка результатів аналітичних досліджень. Для проведення перевірки результатів аналітичних досліджень розроблено *MatLab* модель тягового трифазного інвертора напруги з модернізованими ВК (рис. 6).

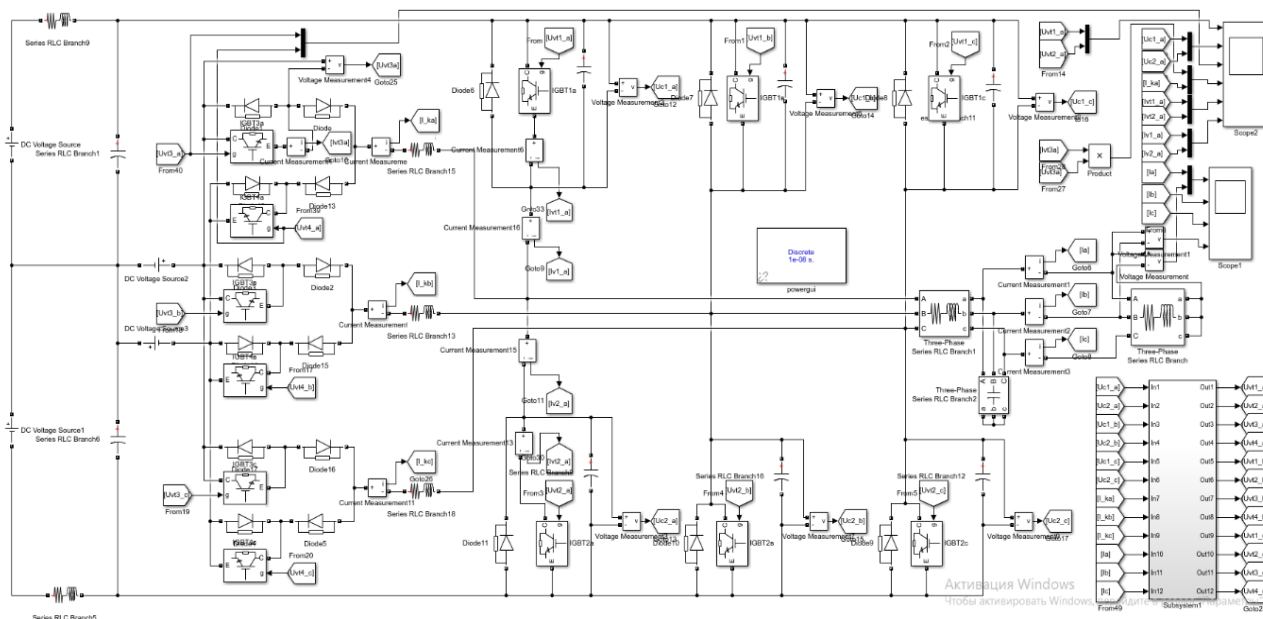


Рис. 6. Схема *MatLab* моделі трифазного інвертора напруги з модернізованими вузлами комутації

У моделі трифазного інвертора напруга живлення $U_d = 2400$ В; частота ШІМ $f_{шім} = 5$ кГц; джерела напруги у ВК

$E_1 = E_2 = 6$ В; фазне навантаження: $L = 0,4$ мГн; $R = 1,5$ Ом (осцилограми на рис. 7), $R = 20$ Ом (осцилограми на рис. 8).

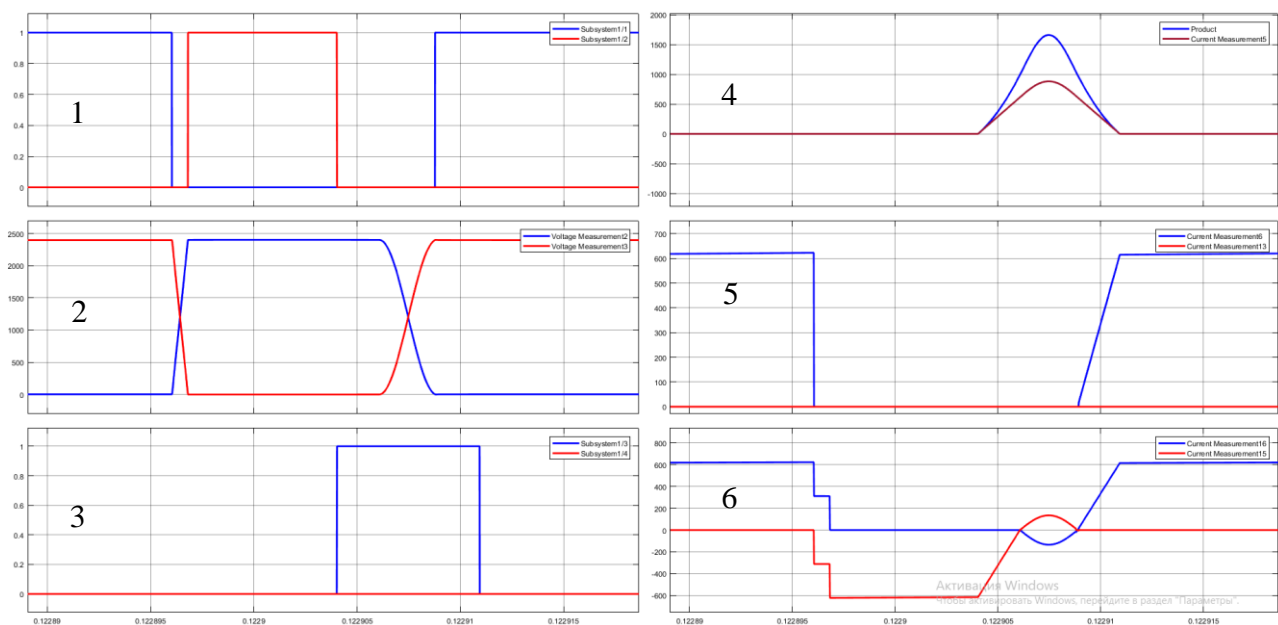


Рис. 7. Осцилограми напруги і струму за реалізації м'якої комутації IGBT трифазного інвертора напруги з ВК в умовах великих струмів навантаження

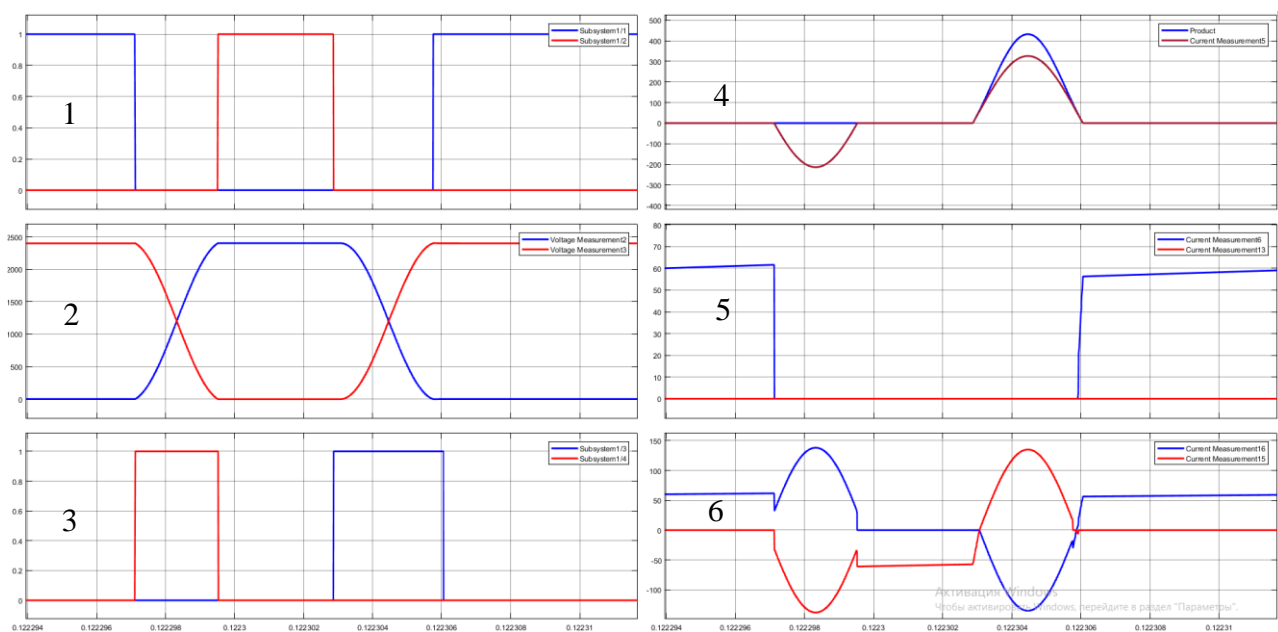


Рис. 8. Осцилограми напруги і струму за реалізації м'якої комутації IGBT трифазного інвертора напруги з ВК в умовах малих струмів навантаження

Осцилограми пронумеровані так:
 1) сигнали керування силовими транзисторами;
 2) напруга на силових транзисторах;

3) сигнали керування транзисторами ВК;
 4) струм ВК і потужність втрат у транзисторі $VT1_k$;

- 5) струм силових транзисторів;
- 6) повний струм силових ключів.

Блакитним кольором позначено сигнали верхнього ключа, червоним – нижнього, струм вузла комутації – коричневим кольором.

Протікання процесів м'якої комутації силових *IGBT* підтверджено осцилограмами роботи трифазного мостового інвертора напруги за імітаційного моделювання. За великих струмів навантаження ВК відпрацьовує лише для підготовки м'якого ввімкнення силових транзисторів ключів, за малих струмів навантаження ВК допомагає прискорити процес перезаряджання снаберних конденсаторів при вимиканні силових транзисторів.

Тривалість протікання імпульсів струму модернізованих ВК залежно від амплітудного значення струму навантаження складає не більше 6-8 мкс за тривалості періоду 200 мкс ($f_{\text{шім}} = 5$ кГц). За найбільшої потужності навантаження у 1200 кВт і напруги живлення інвертора 2400 В, коли амплітуда вихідного струму складає більше 600 А, амплітуда струму ВК може досягати майже 900 А. Це вказує на необхідність використання в потужних інверторах із ВК швидкодіючих *IGBT* із імпульсним допустимим струмом до 1000 А.

Висновки. Виконано синтез схеми та алгоритму реалізації м'якої комутації у трифазному мостовому інверторі напруги з ВК при застосуванні ключів комутатора з ємнісними бездисипативними снаберами на підвищених частотах ШІМ. Проаналізовано характеристики тягового трифазного інвертора напруги при використанні у ВК швидкодіючих чотириквadrантних ключів

на *IGBT* за реалізації м'якої комутації в силових транзисторах комутатора. У результаті аналізу виявлено, що за рахунок втрат у ВК амплітуда змінної складової напруги снаберних конденсаторів у контурі перезаряджання матиме загасання. Внаслідок цього за великих навантажень інвертора на силових транзисторах залишатиметься деяка напруга при ввімкненні, що призводитиме до збільшення втрат енергії в них. Для запобігання такому явищу запропоновано схему модернізованого ВК на *IGBT*. Перевірка результатів аналітичних досліджень за допомогою *MatLab* моделі повністю підтвердила працездатність тягового трифазного інвертора напруги з модернізованими ВК і його енергоефективність. Встановлено, що можна використовувати два низьковольтні джерела постійного струму напругою 6 В для модернізованих ВК, які для спрощення конструкції є спільними для всіх трьох фазних модулів тягового інвертора напруги.

У подальших дослідженнях необхідно розглянути систему захисту силових *IGBT* від перевантажень і пікових значень струмів, що можуть виникати при подаванні або відновленні напруги живлення тягового трифазного інвертора напруги у випадку відриву струмоприймача електрорухомого складу від контактного проводу. Під час роботи трифазного інвертора напруги від тягової мережі постійного струму через асиметрію імпульсів струму ВК може відбуватися відхід потенціалу нульової точки, що також потребує розроблення спеціальних заходів з вирівнювання напруги на конденсаторах ємнісного діляника напруги.

Список використаних джерел

1. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу: навч. посіб./ Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост; за ред. Ю. П. Гончарова. Харків: НТУ «ХПІ», 2007. 192 с.
2. Тягові інвертори з одноопераційною комутацією / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, М. В. Хворост та ін. *Зб. наукових праць. Харків: УкрДАЗТ*, 2003. Вип. 55. С. 31-40.

3. Divan D. The resonant DC link converter – a new concept in static power conversion. *IEEE Trans Ind Appl.* 25(2). 1989. P. 317-325.
4. Kim E. H. and Kwon B. H. Zero-voltage- and zero-current-switching full-bridge converter with secondary resonance. *IEEE Trans. Ind. Electron.* Mar. 2010. Vol. 57, no. 3. P. 1017-1025.
5. Khalilia M., Zadeh A. D. and Adib E. New Three Phase Zero-Voltage Switching PWM Inverter Using Resonant DC-Link. *The 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015)*. Iran, 2015. P. 521-526.
6. He N., Zhu Y., Xu D. Zero-voltage-switching SPWM method for three-phase four-wire inverter. In: *Proceedings of IEEE applied power electronics conference*. Tampa, USA. 26-30 March 2017. P. 3436-3443.
7. Deng J., Shi K., Zhao A. et al. A universal zero-voltage-switching technique for multi-phase AC/DC converter. In *Proceedings of IEEE applied power electronics conference*, Anaheim, USA. 17-21 March 2019. P. 1204-1211.
8. Семененко А. И. Улучшение характеристик бортовых систем питания электроподвижного состава: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.09. Харьков, 2003. 179 с.
9. Семененко О. І., Одегов М. М., Семененко Ю. О., Супрун О. Д. Реалізація м'якої комутації в силових ключах тягових перетворювачів електрорухомого складу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: 32-а міжнародна науково-практична конференція*. 2019. № 4 (Додаток). С. 66-68.
10. Семененко О. І., Карпенко Н. П., Одегов М. М. Трифазні тягові інвертори напруги з м'якою комутацією. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Стан та перспективи розвитку міського електричного транспорту»*. Харків: ХНУМГ, 2021. С. 94-96.
11. Нікулін В. С., Хворост М. В., Гончаров Ю. П., Семененко О. І. Комутуючі дроселі тягових автономних перетворювачів з вузлами двоступеневої одноопераційної комутації. *Зб. наукових праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2004. Вип. 57. С. 46-53.
12. М'яка комутація транзисторів силових ключів застосуванням удосконалених вузлів двоступеневої однорідної комутації / О. І. Семененко, М. М. Одегов, Ю. О. Семененко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: 34-а міжнародна науково-практична конференція*. 2021. № 3 (Додаток). С. 49-51.

Семененко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.

Семененко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Одегов Микола Миколайович, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3967-9009>. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: odegov@kart.edu.ua.

Semenenko Olexandr, PhD (Tech.) Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.

Semenenko Yurii, PhD (Tech.) Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Ph.D., assistant professor. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528> Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Odiegov Mykola, Senior Lecturer, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3967-9009>. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: odegov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 14.05.2024 р.

УДК 621.314

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКОВОГО АЛГОРИТМУ ВІДБОРУ
МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ПІДВИЩУВАЛЬНИМ
DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ**

Кандидати техн. наук О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький,
д-р техн. наук В. В. Івахно, канд. техн. наук В. В. Замаруєв,
аспіранти Д. А. Гордієнко, Д. А. Шелест

**STUDY OF THE EFFICIENCY OF SEARCH ALGORITHM FOR SELECTING THE
MAXIMUM POWER OF SOLAR PANELS USING A DC-DC BOOST CONVERTER**

Candidate of Technical Sciences O. A. Plakhtii,
Candidate of Technical Sciences V. P. Nerubatskyi,
Dr. Sc. (Tech.) V. V. Ivakhno, Candidate of Technical Sciences V. V. Zamaruiev,
postgraduate D. A. Hordiienko, postgraduate D. A. Shelest

***Анотація.** Наведено результати дослідження ефективності пошукового алгоритму відбору максимальної потужності від сонячних панелей підвищувальним імпульсним напівпровідниковим перетворювачем в умовах динамічної зміни освітленості. Проведено аналіз математичної моделі сонячних панелей, що визначає вольт-амперні характеристики та характеристики потужності сонячної панелі у функції її напруги. Розроблено пошуковий алгоритм визначення режиму роботи напівпровідникового перетворювача, який забезпечує режим відбору максимальної потужності від сонячних панелей. Цей алгоритм може бути застосований для різних типів перетворювачів, у яких значення вхідного струму залежить від коефіцієнта заповнення широтно-імпульсної модуляції. У програмному середовищі Matlab розроблено відповідну імітаційну модель підвищувального DC-DC перетворювача, що відбирає потужності сонячних панелей за різних рівнів сонячної радіації, за допомогою якої визначено ефективність розробленого алгоритму. У ході моделювання визначено, що розроблений алгоритм забезпечує досить високу ефективність відбору потужності сонячних панелей, що порівняно з описаними алгоритмами є досить високим показником. Визначено, що динамічні властивості напівпровідникового перетворювача, що відбирає потужність від сонячних панелей, безпосередньо впливає на час переходу в режим відбору максимальної потужності. Під час першого ввімкнення вихід на точку максимальної потужності складає близько 1,2 с, у подальшій роботі перехід відбувається практично миттєво за час, що відповідає сталій часу перетворювача. З урахуванням того, що процеси зміни рівня сонячного освітлення займають хвилини, цей час є прийнятним.*

***Ключові слова:** альтернативна енергетика, підвищувальний DC-DC перетворювач, вольт-амперна характеристика, математична модель, точка максимальної потужності, сонячна панель, широтно-імпульсна модуляція.*

***Abstract.** The results of the study of the effectiveness of the search algorithm for selecting the maximum power from solar panels by a step-up pulse semiconductor converter in the conditions of dynamic changes in illumination are presented. An analysis of the mathematical model of solar panels was carried out, which determines the volt-ampere characteristics and power characteristics of the solar panel as a function of its voltage. A search algorithm for determining the mode of operation of the semiconductor converter, which ensures the mode of maximum power selection from solar panels,*

has been developed. This algorithm can be applied to various types of converters, in which the value of the input current depends on the filling factor of pulse-width modulation. In the Matlab software, a corresponding simulation model of the DC-DC boost converter, which selects the power of solar panels at different levels of solar radiation, was developed, with the help of which the efficiency of the developed algorithm was determined. In the course of the simulation, it was determined that the developed algorithm provides a fairly high efficiency of solar panel power extraction, which is a fairly high indicator compared to the described algorithms. It was determined that the dynamic properties of the semiconductor converter, which takes power from solar panels, directly affects the time of transition to the mode of taking maximum power. During the first switch-on, the output to the point of maximum power is about 1.2 seconds, in further operation, the transition occurs almost instantaneously for a time that corresponds to the time constant of the converter. Given that the processes of changing the level of sunlight take minutes, this time is acceptable.

Keywords: alternative energy, DC-DC boost converter, volt-ampere characteristic, mathematical model, maximum power point, solar panel, pulse width modulation.

Вступ. Останнє десятиліття відбувається стрімке зростання частки альтернативної енергетики як у світі, так і в Україні. Це пов'язано насамперед із загальною тенденцією декарбонізації електроенергетики та бажанням відмови від використання вугілля і газу для отримання електроенергії. Ще однією причиною економічної ефективності генерації електроенергії від альтернативних джерел. Найбільш стрімке зростання має сонячна та вітрова енергетика [1, 2].

Частка сонячної енергетики у світі складає приблизно 3%. Однак для подальшого збільшення та її ефективного використання необхідно забезпечити такі умови, як створення сонячних панелей із більшим значенням ККД (наразі в сучасних сонячних панелях ККД становить 15...23%), покращення методів відбору максимальної потужності сонячних панелей; створення потужних накопичувачів електроенергії, які забезпечать компенсацію нерівномірності сонячної генерації, і розроблення енергоефективних накопичувачів електроенергії, що відповідають вимогам електромагнітної сумісності та забезпечують генерацію електроенергії до електричних мереж із високою якістю [3, 4].

Завдання синтезу методів відбору максимальної потужності сонячних панелей є досить актуальним. Це пов'язано з

особливостями технічних характеристик сонячних панелей. Потужність, генерована сонячними панелями, залежить від багатьох чинників, серед яких рівень сонячного випромінювання, температура і струм, що відбирається від сонячних панелей [5, 6].

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих у роботах [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо досить багато методів визначення точки максимальної потужності сонячних панелей. Так, у роботах [9, 10] наведено метод забезпечення відбору максимальної потужності сонячної панелі за рахунок забезпечення фіксованого значення напруги-струму. У міжнародній літературі цей метод отримав назву «Fractional Open Circuit Voltage». Суть його полягає в тому, що перетворювач, що відбирає потужність сонячної панелі, має зворотний зв'язок за входною напругою чи струмом сонячної панелі, який налаштовано на значення напруги 70...80% значення напруги холостого ходу. Цей метод досить простий, проте суттєвим недоліком є лише приблизна робота біля точки максимальної потужності, що визначає його недостатню ефективність. Але для випадків застосування в малопотужних пристроях, до яких не висуваються вимоги максимальної енергетичної ефективності, він є прийнятним.

Реалізація цього методу в потужних промислових електростанціях є неприйнятною.

У роботі [11] наведено покращений алгоритм «Fractional Open Circuit Voltage», у якому додатково ураховано оснащення датчиком сонячної радіації. Отже, алгоритм визначає точку напруги і струму сонячної панелі, що відповідає максимальній потужності з урахуванням поточного рівня сонячної радіації. Проте таке покращення має недоліки, оскільки не враховує температурний вплив, а також деградацію сонячної панелі, яка відбувається протягом експлуатації.

У роботі [12] подано результати дослідження фізичного зразка DC-DC перетворювача, що відбирає потужність від сонячних панелей за методом «Fractional Open Circuit Voltage». У роботі визначено, що алгоритм забезпечив ефективність 93 % відібраної від сонячної панелі потужності, що свідчить про можливість подальшого покращення.

У роботах [13, 14] з архітектурою розподіленого відстеження точок максимальної потужності є DC-DC перетворювач, призначений для відстеження точки максимальної потужності кожної фотоелектричної панелі. Щоб забезпечити максимальну гнучкість, перетворювачі повинні мати змогу підвищувати і знижувати напругу. Ще однією бажаною характеристикою перетворювачів є висока ефективність, але один із основних недоліків – вартість через велику кількість використаних перетворювачів.

У наукових дослідженнях деякі автори досягли високої ефективності за допомогою перетворювачів, які контролюють лише частину вихідної потужності, таких як послідовно з'єднані перетворювачі, паралельні перетворювачі потужності та перетворювачі з прямим передаванням потужності [15, 16]. Однак такі алгоритми керування перетворювачами є малоефективними для використання у фотоелектричних системах.

У роботах [17, 18] застосовано алгоритми, що можуть збільшити або зменшити потужність фотоелектричних панелей. Ці алгоритми мають ефект підвищення ефективності, однак ефективність самої системи обмежена, оскільки інтенсивність сонячного світла, що потрапляє на панелі, змінюється залежно від сезону, часу та погодних умов.

Більш перспективним є алгоритм, заснований на визначенні точки максимальної потужності, який у міжнародній літературі отримав назву «Perturb and Observe». Опис методу подано в роботах [19, 20]. Цей метод полягає у визначенні точки максимальної потужності за рахунок поступового збільшення струму та визначення потужності.

Отже, використання сонячних панелей із метою відбору максимальної потужності і збільшення їхньої ефективності, а також подальші дослідження високоефективних і недорогих перетворювачів енергії є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження ефективності пошукового алгоритму відбору максимальної потужності від сонячних панелей, що дасть змогу підвищити ефективність фотоелектричних систем в умовах динамічної зміни освітленості. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- визначити характеристики деградації генерованої потужності та розглянути математичну модель сонячних панелей;
- подати топологію пошукового алгоритму відбору максимальної потужності від сонячних панелей;
- навести результати імітаційного моделювання сонячної панелі, потужність від якої відбирається DC-DC перетворювачем.

Основна частина дослідження. *Характеристики деградації генерованої потужності сонячних панелей.* Розглянемо основні технічні параметри сонячної панелі типу PV-MJT250GB виробництва компанії Mitsubishi Electric (табл. 1) [21, 22].

Технічні параметри сонячної панелі типу PV-MJT250GB

Параметр	Значення
Матеріал панелі	Монокристалічний кремній
Розмір комірки, мм	156×156
Кількість комірок	60 клітин у серії
Максимальна потужність, Вт	250
Гарантований мінімум за потужністю, Вт	242,5
Допуск максимальної потужності, %	±3
Напруга холостого ходу, В	37,4
Струм короткого замикання, А	8,8
Максимальна напруга живлення, В	30,2
Максимальна потужність струму, А	8,28
Нормальна робоча температура комірки, °С	47
Максимальна напруга системи, В	1000
Номинальний струм запобіжника, А	15
Розмір панелі, мм	1658×994×46
Маса панелі, кг	20
ККД модуля, %	15,17

На рис. 1 наведено вольт-амперну характеристику, а також залежність потужності від напруги для сонячної панелі

типу PV-MJT250GB виробництва компанії Mitsubishi Electric.

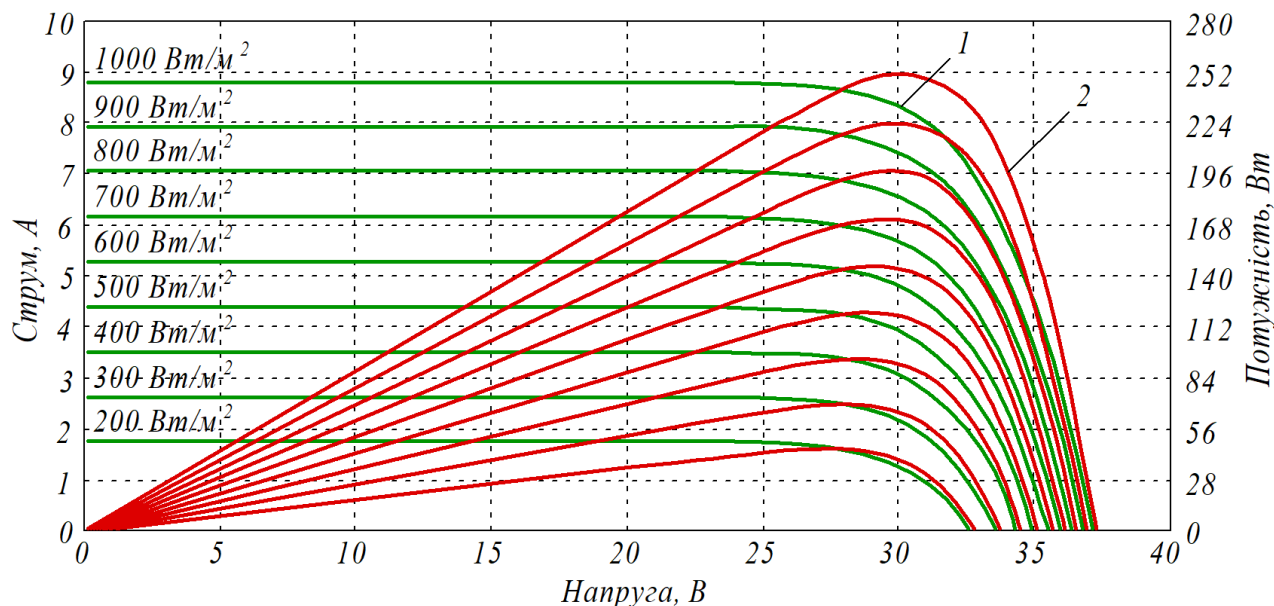


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика (1) і залежність потужності від напруги (2) для сонячної панелі типу PV-MJT250GB

Як видно з рис. 1, вольт-амперна характеристика сонячної панелі досить нелінійна і має характерну точку максимальної потужності, яку можна відібрати від сонячної панелі за споживання певної величини струму. Для розглянутої сонячної панелі точкою максимальної потужності за рівня сонячної радіації 1000 Вт/м^2 є напруга $30,2 \text{ В}$ і струм $8,28 \text{ А}$.

Однак при зміні рівня сонячної радіації, температури чи внаслідок старіння та деградації ця точка зміниться. Залежність максимальної потужності сонячної панелі типу PV-MJT250GB від температури наведено на рис. 2.

Характеристики деградації генерованої потужності сонячних панелей різних виробників наведено на рис. 3.

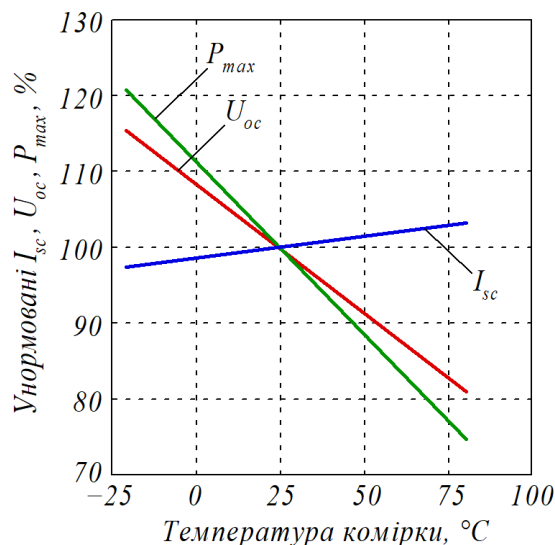


Рис. 2. Залежність максимальної потужності сонячної панелі типу PV-MJT250GB від температури

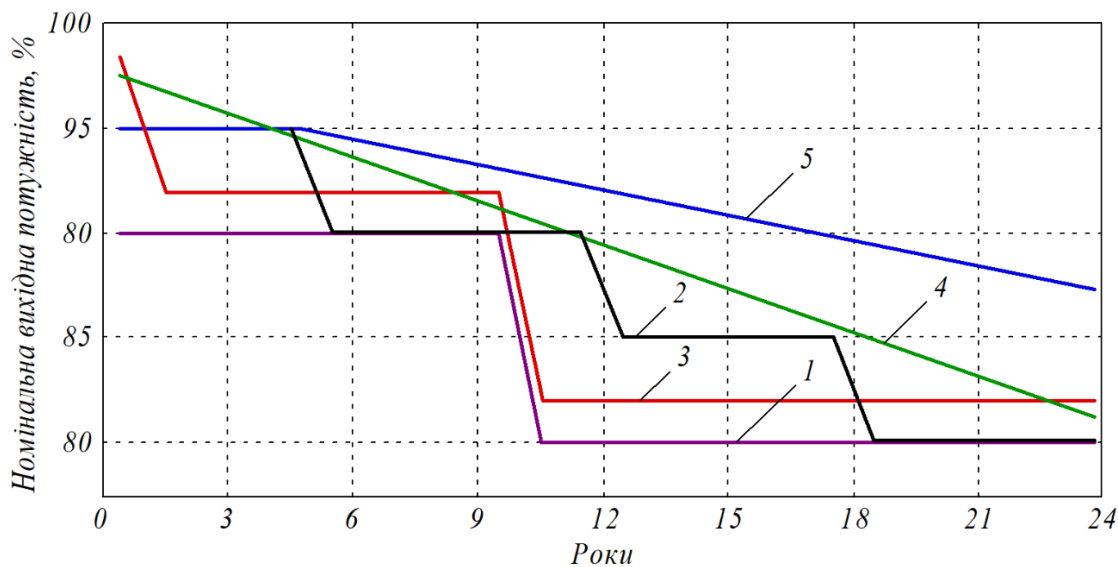


Рис. 3. Характеристики деградації сонячних панелей різних виробників:
1 – Standard; 2 – Suntech; 3 – Yingli Solar; 4 – Trina Solar; 5 – SunPower

З характеристик видно, що при тому самому рівні сонячної радіації сонячна панель може віддавати досить різну величину потужності, що визначено спожитим від неї струмом.

Математична модель сонячних панелей і підвищувального DC-DC перетворювача. Еквівалентна схема первинного сонячного елемента містить джерело струму з паралельно ввімкненим діодом, а також паразитні послідовний (R_s ,

відносно малий) і шунтувальний (R_{sh} , відносно великий) опори (рис. 4). На R_s здебільшого впливають такі чинники, як об'ємний опір напівпровідникового матеріалу, металевих контактів і міжз'єднань, а на R_{sh} неідеальність p - n -переходу і домішки поблизу переходу.

Спрощену еквівалентну схему фотоелектричного елемента наведено на рис. 5.

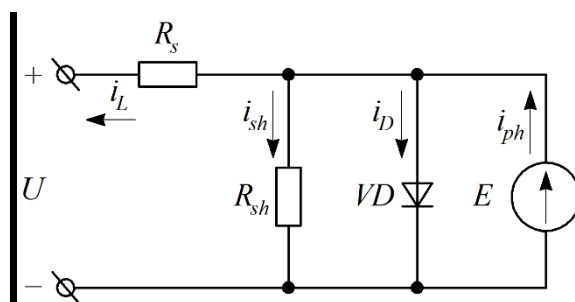


Рис. 4. Еквівалентна схема сонячного елемента

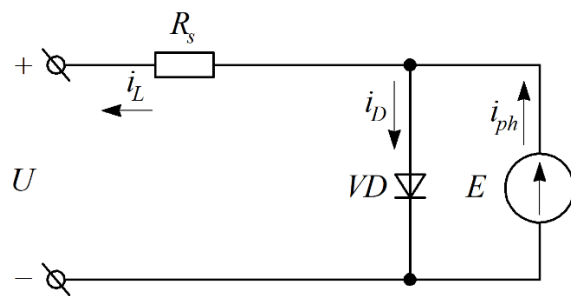


Рис. 5. Спрощена еквівалентна схема фотоелектричного елемента

Струм діода визначається рівнянням Шоклі як

$$I_D = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot U}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

де I_0 – зворотний струм насичення;
 q – носій заряду;
 k – постійна Больцмана;
 T – температура комірки;
 n – коефіцієнт ідеальності.

Фотоелектричний модуль має дві граничні складові: напруга розімкнутого кола (U_{oc}) і струм короткого замикання (I_{sc}).

Щоб визначити I_{sc} , прийmemo $U = 0$ і $I_{sc} = I_{ph}$, це значення змінюється пропорційно до опроміненості комірки. Щоб визначити U_{oc} , прийmemo струм комірки $I_L = 0$, тому з рівняння (1) впливає

$$U_{oc} = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[\frac{I}{I_0} \right]. \quad (2)$$

Фотоелектричний модуль також можна охарактеризувати точкою максимуму потужності, коли добуток напруги U_{tr} , за якої потужність максимальна, і струму I_{tr} , за якого потужність максимальна, має максимальне

значення. Максимальна вихідна потужність визначається як [23, 24]

$$\frac{d(U \cdot I)}{dt} = 0; \quad (3)$$

$$U_{tr} = U_{oc} - \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left[\frac{U_{tr}}{n \cdot k \cdot T / q} + 1 \right]. \quad (4)$$

Моделювання підвищувального DC-DC перетворювача – це подання диференціальних рівнянь першого порядку в математичній моделі фізичної системи, яка містить набір вхідних, вихідних і змінних стану [25, 26]. Таку модель можна застосувати до лінійних систем, інваріантних у часі. Загальне рівняння просторової моделі стану

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u; \quad (5)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u. \quad (6)$$

Системи, які містять компоненти з нелінійною поведінкою (наприклад діод,

перемикач і транзистор), не прийнятні для моделювання простору станів. Тому такі системи потребують усереднення простору стану для підвищувального DC-DC перетворювача.

Підвищувальний DC-DC перетворювач складається з котушки індуктивності, перемикача, діода, вихідного конденсатора та опору навантаження [27, 28]. Щоб подолати нелінійну поведінку діода і транзистора, необхідно перетворити схему на два операційні режими: увімкнення та вимкнення.

Щоб дослідити стабільність підвищувального перетворювача, необхідно визначити контрольований параметр (робочий цикл) для функції передавання напруги масиву:

$$G \cdot v_{pv} \cdot d(s) = \frac{U_o}{(L \cdot C_i) \cdot s^2 + \left(\frac{L}{R_L \cdot (1-D)^2} \right) \cdot s + 1}. \quad (7)$$

Порівнюючи наведене вище рівняння з загальною формою передавальної функції другого порядку, отримуємо

$$G(s) = \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s + k} = \frac{K_{DC} \cdot \omega \cdot n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}. \quad (8)$$

Коефіцієнт демпфування (ζ) і власну частоту (ω_n) можна реалізувати за допомогою таких рівнянь [29, 30]:

$$\zeta = \frac{\sqrt{L}}{2 \cdot R_{mpp} \cdot \sqrt{C_i}}; \quad (9)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{V_o}{L \cdot C_i}}. \quad (10)$$

Принцип роботи пошукового алгоритму визначення максимальної потужності сонячної панелі. Рівень сонячної радіації, температура і стадія деградації сонячної панелі є невідомими складовими в застосуванні класичних алгоритмів із регуляторами зі зворотним зв'язком.

Пошуковий алгоритм, що визначає принцип визначення точки максимальної

потужності, наведено на рис. 6. Алгоритм базований на вимірюванні миттєвих значень струму та потужності сонячних панелей і поступового збільшення струму, споживаного від сонячної панелі. Якщо за зростання спожитого струму потужність сонячної панелі збільшується, тоді струм продовжує зростати. У випадку зростання струму сонячної панелі потужність падає, струм зменшується.

Графічно принцип роботи пошукового алгоритму визначення точки максимальної потужності наведено на рис. 7.

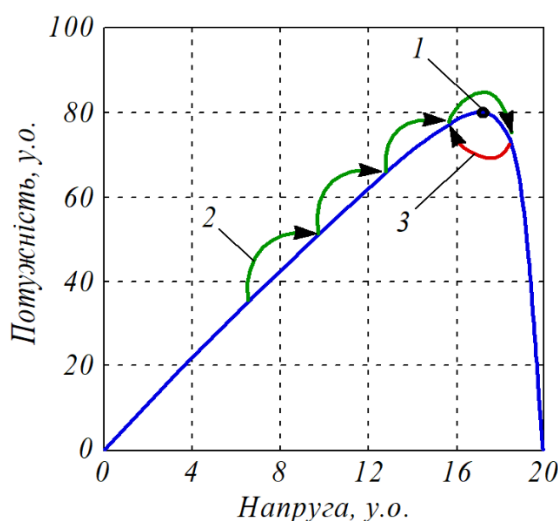


Рис. 6. Графічний принцип роботи пошукового алгоритму:

- 1 – точка максимальної потужності; 2 – постійне відстеження з фіксованим розміром кроку; 3 – за негативного приросту потужності відстеження відбуватиметься у зворотному напрямку

На практиці пошуковий алгоритм реалізується як частина системи керування напівпровідникових перетворювачів, що відбирають потужність сонячних панелей. Такими перетворювачами можуть бути знижувальні чи підвищувальні DC-DC перетворювачі, мережеві інвертори, зарядні пристрої чи інші топології. При цьому важливою вимогою до схеми перетворювача є мінімізація пульсацій вхідного струму, тобто струму сонячної панелі, які погіршують ефективність відбору потужності сонячної панелі, що

забезпечено встановленням ємнісного чи ємнісно-індуктивного фільтра.

Імітаційне моделювання сонячної панелі, потужність від якої відбирається підвищувальним DC-DC перетворювачем. Для визначення ефективності пошукового алгоритму відбору максимальної потужності сонячних панелей було розроблено імітаційну модель підвищувального DC-DC перетворювача з функцією відбору максимальної потужності. Розроблену імітаційну модель наведено на рис. 8.

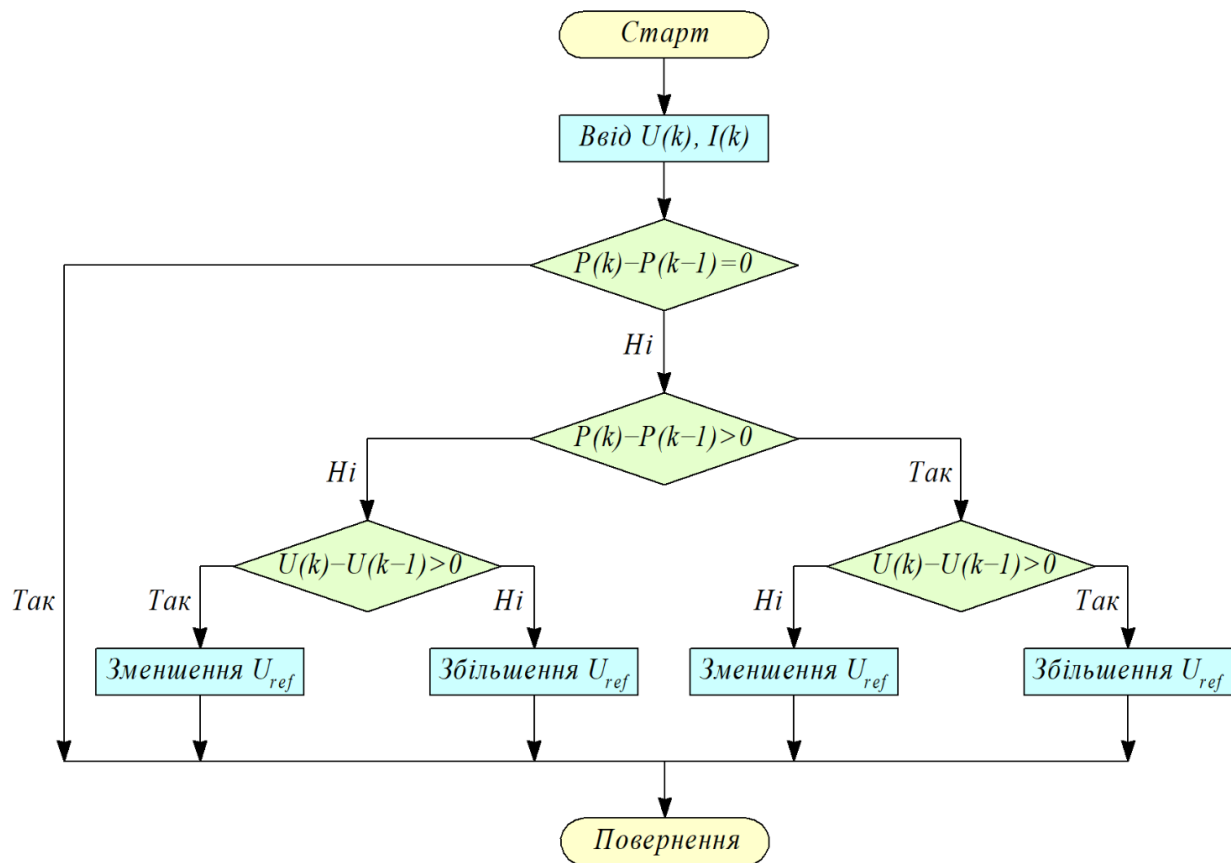


Рис. 7. Пошуковий алгоритм, що визначає принцип визначення точки максимальної потужності

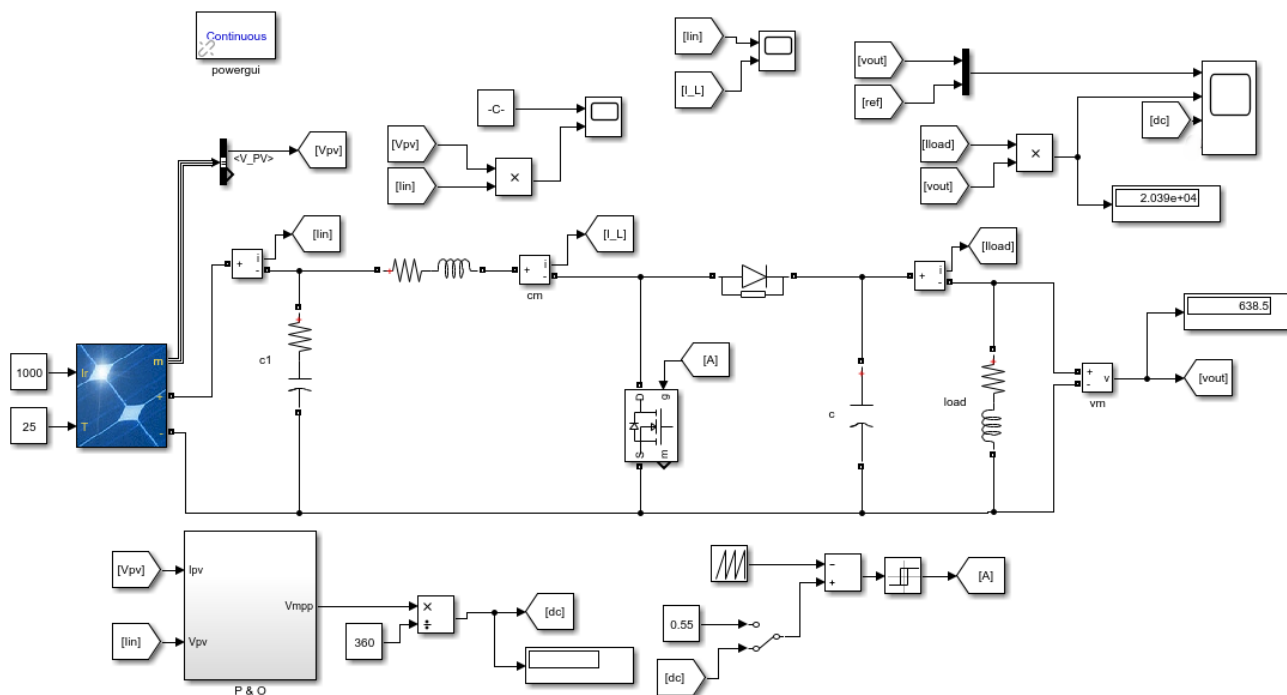


Рис. 8. Імітаційна модель підвищувального DC-DC перетворювача з функцією відбору максимальної потужності

Параметри силової частини підвищувального DC-DC перетворювача, що реалізує відбір максимальної потужності, наведено в табл. 2.

Як сонячні панелі застосовано блок зі 100 сонячних панелей типу 1Soltech 1STH-215-P, що з'єднані по 10 паралельних гілок,

у кожній гілці по одній послідовній сонячній панелі.

У табл. 3 наведено параметри однієї сонячної панелі типу 1Soltech 1STH-215-P.

Сімейство вольт-амперних і вольт-ватних характеристик описаного блока зі 100 сонячних панелей за температур 10 °С, 25 °С і 45 °С наведено на рис. 9.

Таблиця 2

Параметри силової частини підвищувального DC-DC перетворювача

Параметр	Значення
Частота модуляції, кГц	5
Опір навантаження, Ом	20
Вихідна ємність, мФ	20
Буферна індуктивність, мГн	1
Вхідна ємність, мФ	5

Таблиця 3

Параметри сонячної панелі типу 1Soltech 1STH-215-P

Параметр	Значення
Максимальна потужність, Вт	213,15
Напруга холостого ходу V_{oc} , В	36,3
Напруга в точці максимальної потужності V_{mp} , В	29
Температурний коефіцієнт (%/°С)	-0,36099
Кількість ланок на модулі	60
Струм короткого замикання I_{sc} , А	7,84
Струм у точці максимальної потужності I_{mp} , А	7,35
Температурний коефіцієнт I_{sc} (%/°С)	0,102

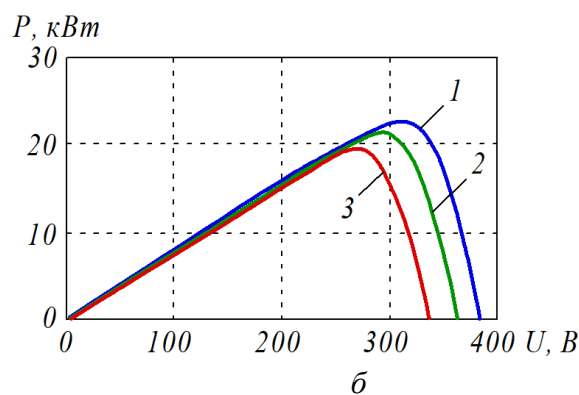
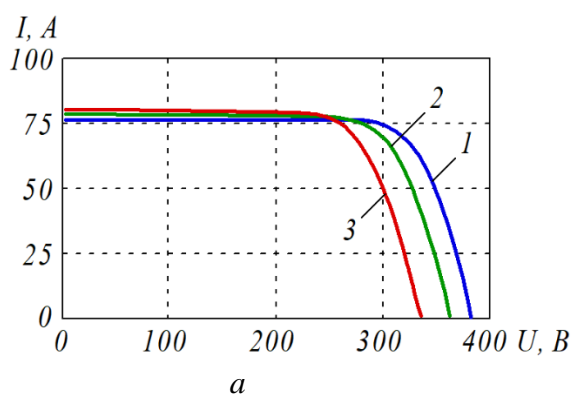


Рис. 9. Сімейство вольт-амперних (а) і вольт-ватних характеристик (б):
1 – 10 °С; 2 – 25 °С; 3 – 45 °С

Як видно з рис. 9, за зниження температури сонячної панелі відбувається збільшення максимальної генерованої потужності. Моделювання сонячної панелі виконано за такими рівняннями:

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{U_d}{U_T}\right) - 1 \right]; \quad (11)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \cdot n_l \cdot N_{cell}, \quad (12)$$

де I_d – струм діода схеми заміщення, А;
 U_d – напруга на діоді, В;
 I_0 – струм насичення діода, А;

n_l – коефіцієнт ідеальності діода, $n_l \approx 1,0$;
 k – стала Больцмана, $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
 q – заряд електрона, $q = -1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 T – температура комірки;
 N_{cell} – кількість комірок, з'єднаних послідовно в модулі.

Розроблений підвищувальний DC-DC перетворювач працює за принципом широтно-імпульсної модуляції з частотою 5 кГц.

Субмодель, що реалізує алгоритм «Perturb and Observe» пошуку максимальної потужності сонячних панелей, зображена на рис. 10.

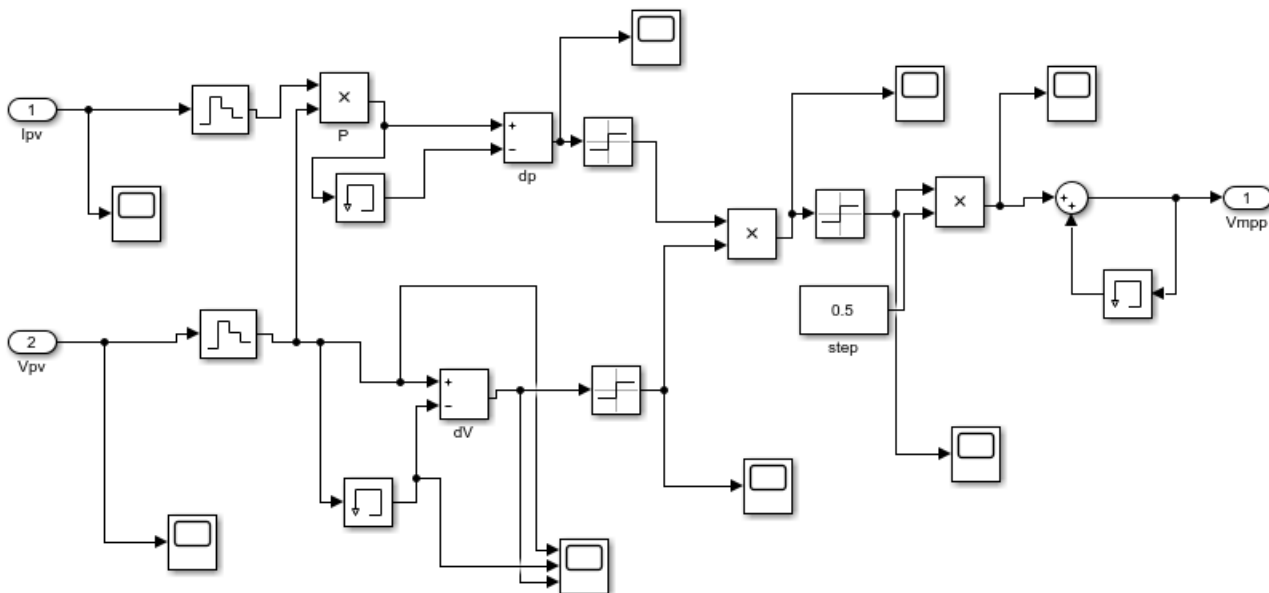


Рис. 10. Субмодель, що реалізує пошуковий метод відбору максимальної потужності

У моделі реалізовано час дискретизації порівняно з попереднім значенням, що становить 1 мс. Дискретність зменшення скважності широтно-імпульсної модуляції становить 0,5 %.

Розроблений пошуковий алгоритм дає змогу визначити напругу сонячної панелі, за якої відбуватиметься відбір максимальної потужності сонячних панелей.

Моделювання проводилося при задаванні ступінчастої зміни рівня сонячної радіації з 1000 до 500 Вт/м² і за температури 25 °С, при яких блок сонячних панелей має точку максимуму генерованої потужності 21,3 і 10,65 кВт відповідно.

Результат роботи пошукового алгоритму, знаходження напруги, струму та потужності, генерованих сонячними пане-

лями під час реалізації алгоритму пошуку максимальної потужності за рівнів сонячної

радіації 1000 і 500 Вт/м², наведено на рис. 11.

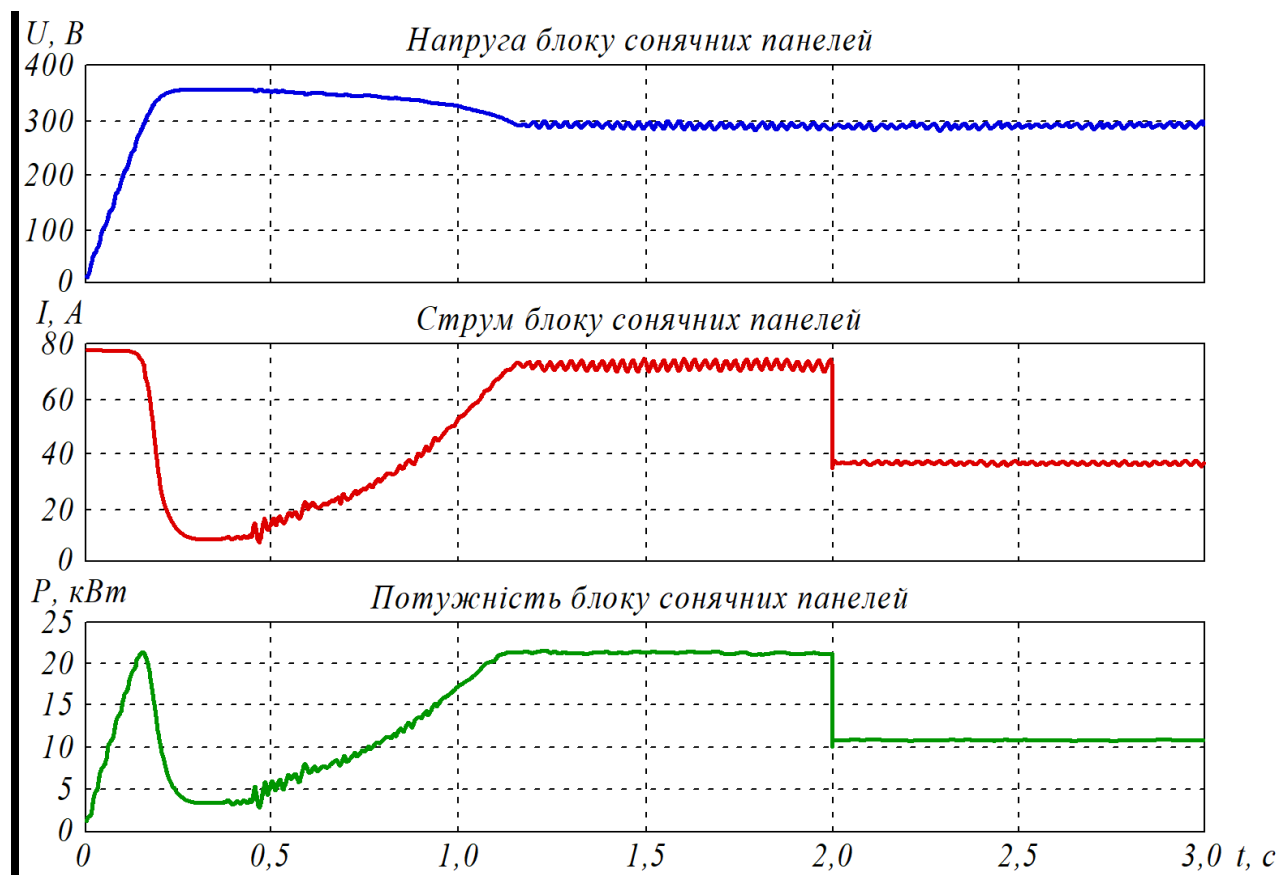


Рис. 11. Параметри, генеровані сонячними панелями під час реалізації алгоритму пошуку максимальної потужності

Відповідні осцилограми коефіцієнта заповнення широтно-імпульсної модуляції, визначеного пошуковим алгоритмом і вихідною напругою перетворювача за постійного значення опору навантаження та зміни рівня сонячної радіації з 1000 до 500 Вт/м², наведено на рис. 12.

З результатів моделювання випливає, що внаслідок дії розробленого пошукового алгоритму підвищувальний DC-DC перетворювач при першому запуску має час відстеження точки максимальної потужності 1,2 с, проте за динамічної зміни рівня сонячної радіації знаходить точку максимальної потужності за час приблизно рівний постійній часу перетворювача і

становить декілька мс.

Аналіз ефективності пошукового алгоритму наведено в табл. 4.

Отже, робота пошукового алгоритму викликає пульсації значення коефіцієнта модуляції, визначені часом дискретизації та амплітудою дискрети зростання або спадання керуючого сигналу. Для зниження цього ефекту рекомендовано застосування фільтра низьких частот у каналі керування скважністю перетворювача.

Для підвищення ефективності відбору потужності сонячних панелей рекомендовано мінімізацію пульсацій струму сонячної панелі.

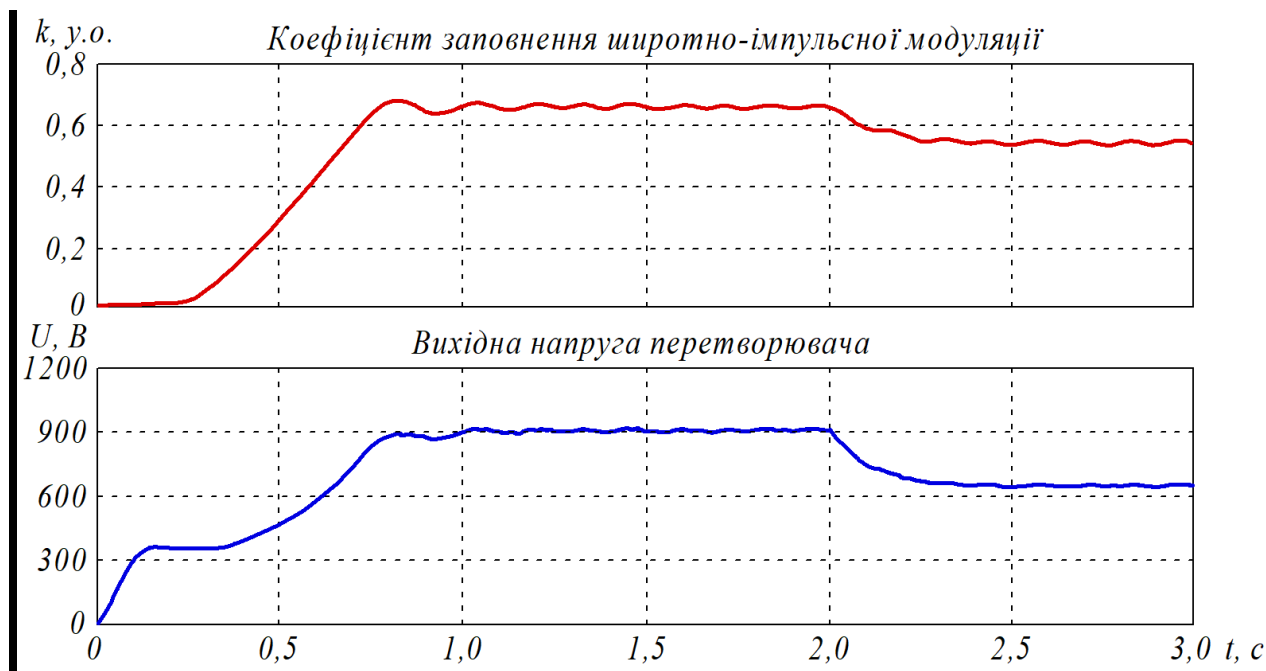


Рис. 12. Осцилограми коефіцієнта заповнення широтно-імпульсної модуляції, визначеного пошуковим алгоритмом і вихідною напругою перетворювача

Таблиця 4

Аналіз ефективності пошукового алгоритму

Параметр	Рівень радіації, Вт/м ²		
	100	500	1000
Максимальна можлива потужність, кВт	2,13	10,65	21,3
Потужність, що відбирається перетворювачем, кВт	2,067	10,45	21,22
Ефективність алгоритму, %	0,97	0,982	0,994

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

– проведено аналіз математичної моделі сонячних панелей, що визначає вольт-амперні характеристики та характеристики потужності сонячної панелі у функції її напруги. Вольт-амперна характеристика сонячної панелі досить нелінійна і має характерну точку максимальної потужності, яку можна відібрати від сонячної панелі за споживання певної величини струму. Однак при зміні

рівня сонячної радіації, температури чи внаслідок старіння та деградації точка максимальної потужності змінюється;

– поданий алгоритм забезпечує досить високу ефективність відбору потужності сонячних панелей (більше 97%), що порівняно з описаними є досить високим показником, проте, теоретично, і його можна покращити;

– динамічні властивості напівпровідникового перетворювача, що відбирає потужність від сонячних панелей, безпосередньо впливає на час переходу в режим відбору максимальної потужності.

Під час першого ввімкнення вихід на точку максимальної потужності становить близько 1,2 с, у подальшій роботі перехід відбувається практично миттєво за час, що

відповідає постійній часу перетворювача. З урахуванням того, що процеси зміни рівня сонячного освітлення займають хвилини, цей час є прийнятним.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за європейським грантом EURIZON FELLOWSHIP PROGRAMME «Remote Research Grants for Ukrainian Researchers» 2023. Grant Agreement #EU-3032. Project: «Increasing Energy Efficiency and Improving the Electromagnetic Compatibility of On-grid Power Converters of Solar Energy Systems».

Список використаних джерел

1. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
2. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Improving the energy efficiency of traction power supply systems by means the implementation of alternative power sources. *26th International Scientific Conference Transport Means 2022*. 2022. Part I. P. 459–464. DOI: 10.5755/e01.2351-7034.2022.P1.
3. Nedeltcheva S., Matsankov M., Hassan M. Study of the options for joining decentralized electricity generation to the power distribution grid. *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279073.
4. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Study of the energy parameters of the system «solar panels – solar inverter – electric network». *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012092. P. 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012092.
5. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of topology of the autotransformer forward-flyback converter for photovoltaic panel. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2024. No. 1. P. 81–85. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2024.297579.
6. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskyi A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. Is. 19. Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.
7. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
8. 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.
9. Rajendran M. K., Kansal S., Mantha A., Priya V., Priyamvada Y. B., Dutta A. Automated environment aware nW FOCV — MPPT controller for self-powered IoT applications. *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2016. P. 1818–1821. DOI: 10.1109/ISCAS.2016.7538923.
10. Madhavadas M., Thomas V. C. FOCV based MPPT control for PV, and sine reference-feedback oriented control for single phase grid tied solar inverter. *2018 Second International*

Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). 2018. P. 1547–1551. DOI: 10.1109/ICICCT.2018.8473142.

11. Frezzetti A., Manfredi S., Suardi A. Adaptive FOCV-based control scheme to improve the MPP tracking performance: an experimental validation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. Vol. 47, No. 3. P. 4967–4971. DOI: 10.3182/20140824-6-za-1003.02464.

12. Uprety S., Lee H. 22.5 A 93 %-power-efficiency photovoltaic energy harvester with irradiance-aware auto-reconfigurable MPPT scheme achieving >95 % MPPT efficiency across 650 μ W to 1 W and 2.9 ms FOCV MPPT transient time. *2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 2017. P. 378–379. DOI: 10.1109/ISSCC.2017.7870419.

13. Sheela A., Logeswaran T., Revathi S., Rajalakshmi K. Distributed MPPT configuration for improving solar energy production. *2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9824131.

14. 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.

15. Cheng L., Wu W., Qiu L., Liu X., Ma J., Zhang J., Fang Y. An improved data-driven based model predictive control for zero-sequence circulating current suppression in paralleled converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 143. P. 108401. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108401.

16. Moghassemi A., Rahman S., Ozkan G., Edrington C., Zhang Z., Chamarthi P. Power converters coolant: past, present, future, and a path toward active thermal control in electrified ship power systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 91620–91659. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3308523.

17. Kareem M., Kurnaz S. Improving the efficiency of solar photovoltaic power generation using improved MPPT method. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/HORA49412.2020.9152882.

18. Hegazy E., Saad W., Shokair M. Studying the effect of using a low power PV and DC-DC boost converter on the performance of the solar energy PV system. *2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICCES51560.2020.9334581.

19. Chaieb H., Sakly A. Comparison between P&O and P.S.O methods based MPPT algorithm for photovoltaic systems. *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*. 2015. P. 694–699. DOI: 10.1109/STA.2015.7505205.

20. Mohapatra A., Nayak B., Mohanty K. B. Current based novel adaptive P&O MPPT algorithm for photovoltaic system considering sudden change in the irradiance. *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/PEDES.2014.7042032.

21. Takruri M., Farhat M., Barambones O., Ramos-Hernanz J. A., Turkieh M. J., Badawi M., AlZoubi H., Abdus Sakur M. Maximum power point tracking of PV system based on machine learning. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 3. 692. DOI: 10.3390/en13030692.

22. Mishra V. K., Varshney L., Dohare G. S., Kumar K. Comparison and performance analysis of solar PV panel configurations. *2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*. 2022. P. 2249–2253. DOI: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823561.

23. Tsamaase K., Sakala J., Rakgati E., Zibani I., Matlotse E. Simulation-based solar PV module maximum output power and dust accumulation profiles. *2021 International Conference on Smart City and Green Energy (ICSCGE)*. 2021. P. 30–35. DOI: 10.1109/ICSCGE53744.2021.9654290.
24. Tsamaase K., Sakala J., Rakgati E., Zibani I., Motshidisi K. Solar PV module voltage output and maximum power yearly profile using Simulink-based model. *2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*. 2021. P. 31–35. DOI: 10.1109/ICRERA52334.2021.9598794.
25. Qin Y., Yang Y., Li S., Huang Y., Tan S.-C., Hui S. Y. A high-efficiency DC/DC converter for high-voltage-gain, high-current applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2020. Vol. 8, No. 3. P. 2812–2823. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2908416.
26. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Study of the influence of sliding mode regulator on spectrum higher harmonics of the SEPIC converter. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402454.
27. Hasanpour S., Siwakoti Y. P., Blaabjerg F. A new high efficiency high step-up DC/DC converter for renewable energy applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70, No. 2. P. 1489–1500. DOI: 10.1109/TIE.2022.3161798.
28. Rosas I. P., Agostini E., Nascimento C. B. Single-switch high-step-up DC-DC converter employing coupled inductor and voltage multiplier cell. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 82626–82635. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3196563.
29. Maalandish M., Hosseini S. H., Pourjafar S., Nouri S., Hashemzadeh S. M., Ghavipankeh Marangalu M. A Non-isolated high step-up DC-DC converter recommended for photovoltaic systems. *2021 12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/PEDSTC52094.2021.9405925.
30. Ashique R. H., Salam Z., Ahmed J. An adaptive P&O MPPT using a sectionalized piecewise linear P-V curve. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*. 2015. P. 474–479. DOI: 10.1109/CENCON.2015.7409591.

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.

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.

Івахно Володимир Вікторович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри промислової і біомедичної електроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (066) 710-99-36. E-mail: v-ivakhno@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-2122-6151.

Замаруєв Володимир Васильович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри промислової і біомедичної електроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (050) 524-88-29. E-mail: vvz1@ukr.net. ORCID iD: 0000-0003-0598-5673.

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.

Шелест Дмитро Андрійович, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6095-658X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, Candidate of Technical Sciences, 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.

Nerubatskiy Volodymyr Pavlovych, Candidate of Technical Sciences, 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.

Ivakhno Volodymyr Viktorovych, Doctor of Science, Associate Professor, Professor of Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Tel.: +38 (066) 710-99-36.

E-mail: v-ivakhno@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-2122-6151.

Zamaruiev Volodymyr Vasylyovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».

Tel.: +38 (050) 524-88-29. E-mail: vvz1@ukr.net. ORCID iD: 0000-0003-0598-5673.

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.

Shelest Dmytro Andriiovych, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Tel.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com.

ORCID iD: 0000-0001-6095-658X.

Статтю прийнято 11.06.2024 р.

УДК 656.212.5

НАУКОВИЙ ПІДХІД ДО ЗМЕНШЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ПАРКОВОЇ ГАЛЬМОВОЇ ПОЗИЦІЇ СОРТУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ З ГРАВІТАЦІЙНО-ПРИЦІЛЬНИМ ГАЛЬМУВАННЯМ ВІДЧЕПІВ

Д-р техн. наук О. М. Огар, аспіранти А. О. Левченко, І. В. Кондратьєв, магістранти Р. В. Кустов, М. І. Зав'ялов

SCIENTIFIC APPROACH TO REDUCING THE ENERGY OF THE PARKING RETARDER POSITION OF A SORTING DEVICE WITH TARGET GRAVITY BRAKING OF CUTS

Dr. Sc. (Tech.) O. Ohar, Ph.D. Student A. Levchenko, Ph.D. Student I. Kondratiev, master R. Kustov, master M. Zavialov

Анотація. Для зменшення потужності паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів запропоновано встановлення на його спускній частині допоміжної гальмової позиції з перенесенням на неї частини роботи з регулювання швидкості скочування вагонів певної маси. Визначено для заданих умов експлуатації потрібну потужність цих позицій, оптимальні конструкційні параметри сортувального пристрою і розроблено рекомендації щодо гальмування відчепів на допоміжній гальмовій позиції на основі результатів імітаційного моделювання скочування розрахункових бігунів.

Ключові слова: сортувальний пристрій, поздовжній профіль, гальмування відчепів, гальмова позиція, вагонний уповільнювач.

Abstract. The main disadvantage of a sorting device with target gravity braking of cuts is the necessity to use a powerful parking retarder position. In order to reduce the energy of this position, it is proposed to install an auxiliary brake position on the descending part of the device to transfer there part of the work on regulating the rolling speed of cuts of a certain mass. For the given

operating conditions, the required energy of these positions and the optimal design parameters of the sorting device were determined, and recommendations were developed for braking the cuts at the auxiliary brake position based on the results of simulation modeling of the rolling of the design runners. The structural parameters were optimized using the developed mathematical model, where the height of the sorting device is the optimization criterion. The optimization calculations were performed both for favorable and unfavorable conditions of the runners rolling. The results of the simulation modeling of the rolling of the design runners proved that the maximum braking value at the auxiliary brake position (0.74 m e. h.) for the specified operating conditions is provided when braking the cuts weighing more than 34.8 tons. To simplify the process of braking such cuts at the auxiliary braking position, it is proposed to use low-energy retarders whose rated energy is less than the maximum possible braking value at this position. The reason of it is that when more powerful retarders are used at the auxiliary braking position, not only the degree of braking of each cut should be determined, but also the duration of their braking, which to some extent complicates the process of speed control and may require automation of operation of this position. If low-energy retarders UVSK-11 with the rated energy of 0.6 m e. h. are used at the auxiliary brake position, the required energy of the park brake position is reduced by 0.57 m e. h. At the same time, all cuts weighing more than 30.8 tons should be braked at the auxiliary brake position. Based on the studies, it was concluded that the installation of an auxiliary brake position on the descending part of the sorting device with target gravity braking of cuts would reduce capital investments in construction and mechanization, as well as the costs associated with the operation of this device.

Keywords: *sorting device, longitudinal profile, braking of cuts, braking position, car retarder.*

Вступ. Зменшення витрат сортувальних пристроїв протягом розрахункового періоду є одним із актуальних завдань залізничної галузі. На сьогодні в багатьох країнах світу велику увагу приділяють модернізації конструкції і технічному оснащенню сортувальних пристроїв. Найбільш популярними заходами є впровадження нових та удосконалення наявних гіркових автоматизованих комплексів, систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень, засобів і режимів гальмування відчепів, алгоритмів керування вагонними уповільнювачами. Отже, за рахунок додаткових капіталовкладень можна досягти підвищення ефективності функціонування цих пристроїв.

До непопулярних заходів підвищення ефективності роботи сортувальних пристроїв належить застосування раціональних конструкцій плану і поздовжнього профілю таких пристроїв. Це пов'язано з тим, що згадані заходи передбачають реконструкцію наявних пристроїв з дуже великими

капіталовкладеннями. Замовники, можливо, недооцінюють економічний ефект, який можна отримати від впровадження таких заходів. А цей ефект дійсно може бути вагомим, оскільки зміна конструкційних параметрів в окремих випадках дає змогу застосовувати, наприклад, нові технології гальмування відчепів, які менш чутливі до впливу різних випадкових факторів (гальмових характеристик засобів регулювання швидкості скочування відчепів, їхніх ходових властивостей, метеорологічних умов, стану колісних пар вагонів, темпу роботи операторів гірки тощо) і дають можливість зменшити потужність паркової гальмової позиції.

Отже, формування нових науково-обґрунтованих конструкційних і технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування сортувальних пристроїв, є одним із важливих завдань залізничного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення ефективності функціонування сортувальних пристроїв присвячено велику кількість

праць в Україні і за її межами. Загальною особливістю є удосконалення сучасних конструкційних, технічних і технологічних параметрів сортувальних пристроїв. При цьому принципово нових конструкцій таких пристроїв на сьогодні не розроблено.

Так, достатньо уваги приділено автоматизації керування вагонними уповільнювачами, розробленню нових конструкцій засобів регулювання швидкості скочування відчепів і удосконаленню технічних параметрів наявних уповільнювачів, оптимізації режимів розформування составів на гірках, удосконаленню конструкцій плану і профілю сортувальних пристроїв. У роботі [1] запропоновано процедури керування процесами сортування вагонів на основі використання експертної інформації та ітеративного навчання машини прийняття рішень. У роботі [2] розроблено методику дослідження і алгоритмічні основи побудови цифрових систем керування уповільнювачами гальмових позицій, принципи ідентифікації параметрів об'єктів і регулятора, метод розрахунку впливів, що задають, у системах автоматизованого регулювання швидкості на сортувальній гірці та запропоновано технічну реалізацію цих систем. У статті [3] визначено техніко-експлуатаційні характеристики нового вагонного уповільнювача вітчизняного виробництва УВСК. У роботах [4-9] обґрунтовано раціональні режими гальмування відчепів на основі оптимізації інтервалів між відчепами, що скочуються з гірки, і з урахуванням нечіткості інформації про їхні ходові властивості. У статтях [10, 11] запропоновано метод розрахунку кінцевої швидкості відчепів і досліджено моделі просторово-інтервального контролю швидкості їх скочування на основі нейронної мережі. У роботах [12-15] визначено раціональні конструкційні параметри поздовжнього профілю сортувальних гірок і плану колійного розвитку гіркових горловин.

Запропоновані наукові підходи, безумовно, підвищують ефективність

сортувального процесу, але не дають змогу вирішити проблеми, пов'язані з точністю реалізації розрахункових швидкостей виходу відчепів із гальмових позицій унаслідок наявності множини стохастичних параметрів. І навіть використання елементів штучного інтелекту для визначення параметрів гальмування відчепів не виключає помилки в роботі систем комплексної автоматизації сортувального процесу.

Також при визначенні раціональних режимів гальмування відчепів доцільно було б вибирати значущі критерії оптимізації, оскільки енерговитрати на регулювання швидкості їх скочування складають невелику частку витрат сортувальних гірок.

Крім того, бажано було б оцінювати загальносистемний ефект за впровадження конструкційних параметрів сортувальних пристроїв, що отримані шляхом оптимізаційних розрахунків і впливають на потужність гальмових засобів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цього дослідження є зменшення потужності паркової гальмової позиції сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів шляхом перенесення частини роботи з регулювання їхньої швидкості на спускну частину зазначеного пристрою.

Основними завданнями дослідження є визначення для заданих умов експлуатації потрібної потужності гальмових позицій сортувального пристрою, його оптимальних конструкційних параметрів і розроблення рекомендацій щодо гальмування відчепів на гальмовій позиції, що розміщується на спускній частині пристрою.

Основна частина дослідження. Основним недоліком сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів (рис. 1) є необхідність застосування потужної паркової гальмової позиції (ПП) [16]. Наявна потужність такої позиції може бути у два-три рази більшою, ніж потужність ПП сортувальної гірки з традиційною конструкцією.

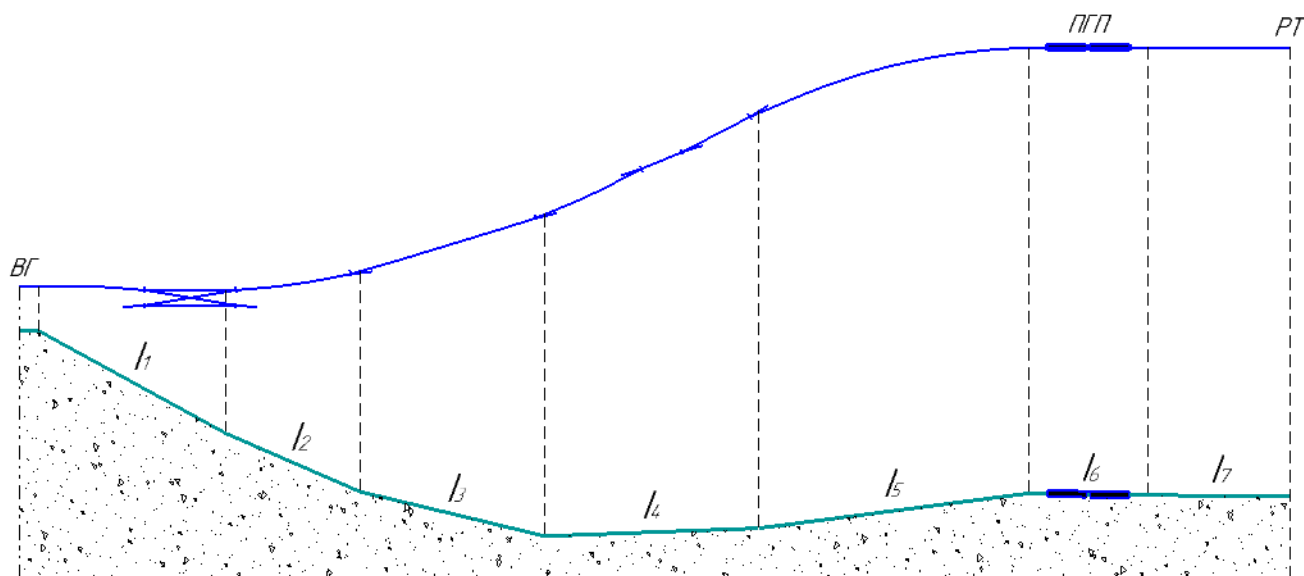


Рис. 1. Конструкція сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відцепів

Одним із можливих рішень цієї проблеми є застосування на спускній частині сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відцепів допоміжної гальмової позиції (ДГП), технологічним призначенням якого є гальмування за будь-яких метеорологічних умов відцепів тільки певної маси.

Отже, для заданих умов експлуатації необхідно встановити такі параметри:

1) граничну масу відчепа ($Q_{гр.}$) – масу, за якої забезпечені такі умови:

– якщо $22 \leq Q_{відч.} < Q_{гр.}$, відцеп на ДГП не гальмується;

– якщо $Q_{відч.} \geq Q_{гр.}$, відцеп на ДГП гальмується.

У наведених умовах $Q_{відч.}$ – маса відчепа, що скочується з сортувального пристрою;

2) максимально можливу величину гальмування відцепів на ДГП ($H_z^{ДГП}$), за якої будуть забезпечені достатні інтервали на розділових стрілочних переводах, що розміщені після вказаної позиції (для такого сортувального пристрою лімітуючим є

останній стрілочний перевід на маршруті скочування відцепів).

Визначення $Q_{гр.}$ і $H_z^{ДГП}$ має базуватися на результатах імітаційного моделювання скочування бігунів у найбільш складних розрахункових сполученнях ПЛ-Ш і П-ШВ, де ПЛ – повільний легкий бігун, маса якого складає 22 т, основний питомий опір – 4,5 Н/кН, Ш – швидкий бігун, основний питомий опір якого складає 0,5 Н/кН, а маса не перевищує $Q_{гр.}$, П – повільний бігун, маса якого дорівнює або перевищує $Q_{гр.}$, а основний питомий опір має найбільше значення залежно від маси бігуна, ШВ – швидкий важкий бігун, маса якого складає 100 т, основний питомий опір – 0,5 Н/кН.

Виходячи з викладеного вище, технологічні розрахунки слід здійснювати без гальмування ПЛ і Ш і з гальмуванням П і ШВ.

Оптимальні конструкційні параметри сортувального пристрою (висоту і крутизну елементів профілю) можна визначити з використанням такої моделі з урахуванням припущення, що ухил першого елемента

профілю (I_1) – 50 ‰, ухил елемента профілю, на якому розміщено ПГП, (I_6) – 1,5 ‰, ухил сортувальних колій від кінця ПГП до розрахункової точки (РТ) (I_7) – 0,6 ‰,

різниця ухилів другого (I_2) і третього (I_3), третього і четвертого (I_4) елементів профілю максимальна (25 ‰):

$$H = \left(\begin{array}{l} 50 \cdot l_1 + I_2 \cdot l_2 + (I_2 - 25) \cdot l_3 + (I_2 - 50) \cdot l_4 + \\ + I_5 \cdot l_5 + 1,5 \cdot l_6 + 0,6 \cdot l_7 \end{array} \right) \cdot 10^{-3} \rightarrow H_{\min}, \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 25 \leq I_2 \leq 105; \\ I_4 - I_5 \leq 25; \\ h_{\omega}^{ПЛ}(I_2, I_5) = H + h_o^{ПЛ}; \\ H_{\text{ДГП ШВ}}^{ДГП} > 0; \\ T_{ПЛ-ШВ}^{СТР}(I_2, I_5) \geq 1, \end{array} \right. \quad (2)$$

де I_5 – ухил п'ятого елемента поздовжнього профілю, ‰;

l_1, \dots, l_7 – довжина першого, ..., сьомого елементів поздовжнього профілю, м;

H_{\min} – мінімально можлива висота сортувального пристрою, м;

$h_{\omega}^{ПЛ}(I_2, I_5)$ – витрачена енергетична висота ПЛ на подолання всіх видів опору при скочуванні за несприятливих метеорологічних умов від вершини гірки (ВГ) до РТ важкої за опором руху колії, м ен. в.;

$h_o^{ПЛ}$ – початкова енергетична висота ПЛ на ВГ, м ен. в.;

$H_{\text{ДГП ШВ}}^{ДГП}$ – величина гальмування ШВ на ДГП, м ен. в.;

$T_{ПЛ-ШВ}^{СТР}(I_2, I_5)$ – інтервал на останньому стрілочному переводі при скочуванні ПЛ на важку за опором руху колію і ШВ на суміжну з нею колію, с.

Результати оптимізації конструкційних параметрів сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів за різних значень $H_{\text{ДГП ШВ}}^{ДГП}$ наведено в таблиці. Оптимізаційні розрахунки виконано за таких вихідних даних:

– кількість колій у сортувальному парку – 32;

– розрахункова температура зовнішнього повітря за несприятливих умов скочування вагонів – -15 °С, сприятливих – +32 °С;

– розрахункова швидкість вітру за несприятливих умов скочування вагонів – 5 м/с, сприятливих – 8 м/с;

– розрахунковий напрямок вітру відносно осі сортувального парку за несприятливих умов скочування вагонів – 36°, сприятливих – 175°;

– кут між віссю колії на ВГ і поздовжньою віссю сортувального парку – 0,41°.

Результати імітаційного моделювання скочування розрахункових бігунів у розрахункових сполученнях ПЛ-ШВ і П-ШВ показують, що за величини гальмування П і ШВ на ДГП 0,5 м ен. в. достатні інтервали на останньому розділовому стрілочному переводі забезпечені при масі П більше 28,6 т (рис. 2), величини гальмування 0,6 м ен. в. – маса П більше 30,8 т (рис. 3), величини гальмування 0,7 м ен. в. – маса П більше 33,5 т (рис. 4). Також у цих трьох випадках достатніми є інтервали на останньому стрілочному переводі при скочуванні бігунів у розрахунковому сполученні ПЛ-Ш без їх гальмування на ДГП.

Таблиця

Оптимальні конструкційні параметри сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відцепів і величини гальмування ШВ на ПГП за умови його зупинки

$H_{\Sigma ШВ}^{ДГП}$, м ен. в.	h_2 , м	I_1 , ‰	I_2 , ‰	I_3 , ‰	I_4 , ‰	I_5 , ‰	I_6 , ‰	I_7 , ‰	$H_{\Sigma НУ}^{ПГП}$, м ен. в.	$H_{\Sigma СУ}^{ПГП}$, м ен. в.
0,5	4,93	50	47,6	22,6	-2,4	-15,1	1,5	0,6	2,37	2,83
0,6	4,86	50	46,2	21,2	-3,8	-13,0	1,5	0,6	2,28	2,74
0,7	4,79	50	44,8	19,8	-5,2	-11,0	1,5	0,6	2,19	2,64
0,8	4,73	50	43,4	18,4	-6,6	-8,9	1,5	0,6	2,11	2,55

Примітки: 1. h_2 – висота гірки, м; $H_{\Sigma НУ}^{ПГП}$, $H_{\Sigma СУ}^{ПГП}$ – величина гальмування ШВ на ПГП за умови його зупинки відповідно за несприятливих і сприятливих умов скочування вагонів, м ен. в.

2. За $H_{\Sigma ШВ}^{ДГП} = 0$ м ен. в. $h_2 = 5,26$ м, $H_{\Sigma НУ}^{ПГП} = 2,8$ м ен. в., $H_{\Sigma СУ}^{ПГП} = 3,31$ м ен. в.

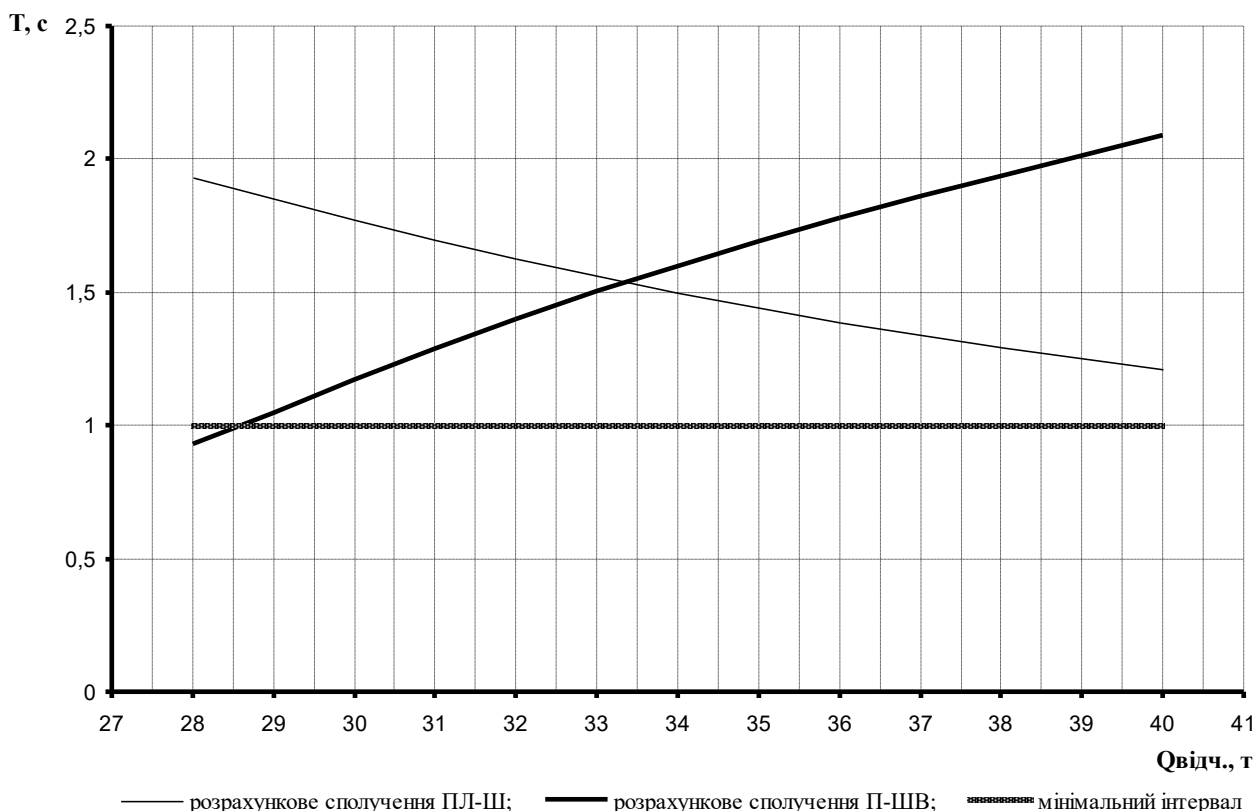


Рис. 2. Залежність інтервалу на останньому розділовому стрілочному переводі за маршрутом скочування розрахункових бігунів при величині гальмування П і ШВ на ДГП 0,5 м ен. в.

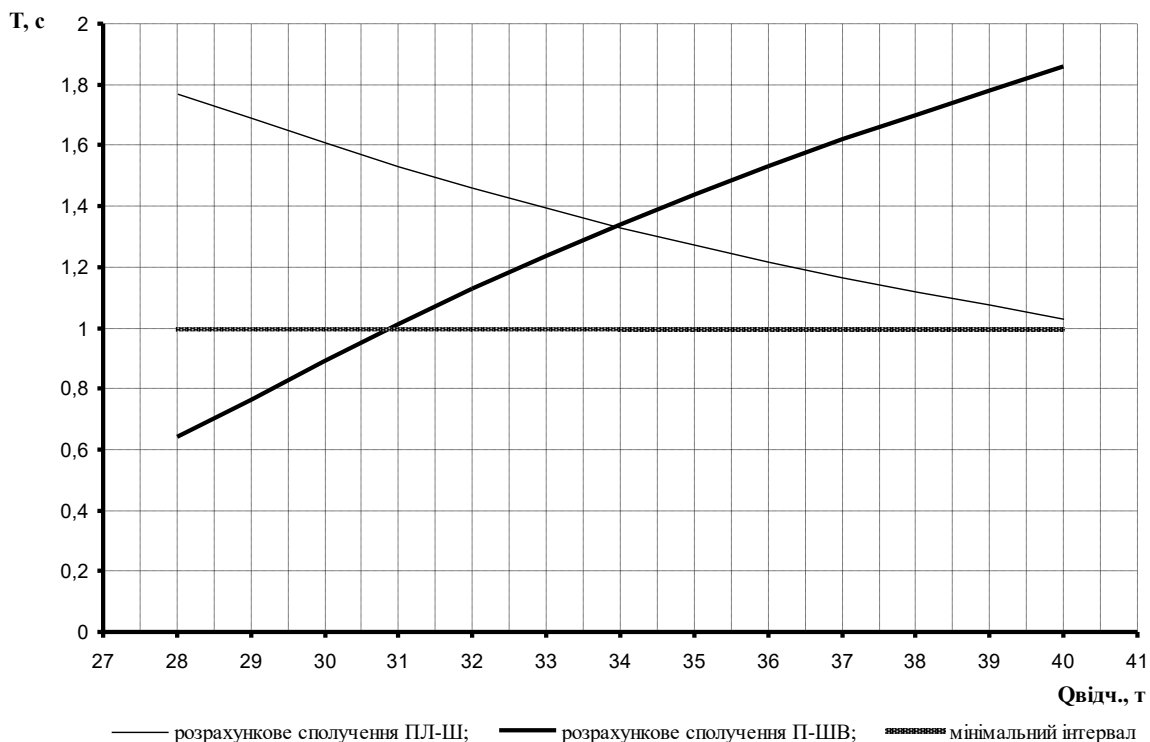


Рис. 3. Залежність інтервалу на останньому розділовому стрілочному переводі за маршрутом скочування розрахункових бігунів при величині гальмування П і ШВ на ДГП 0,6 м ен. в.

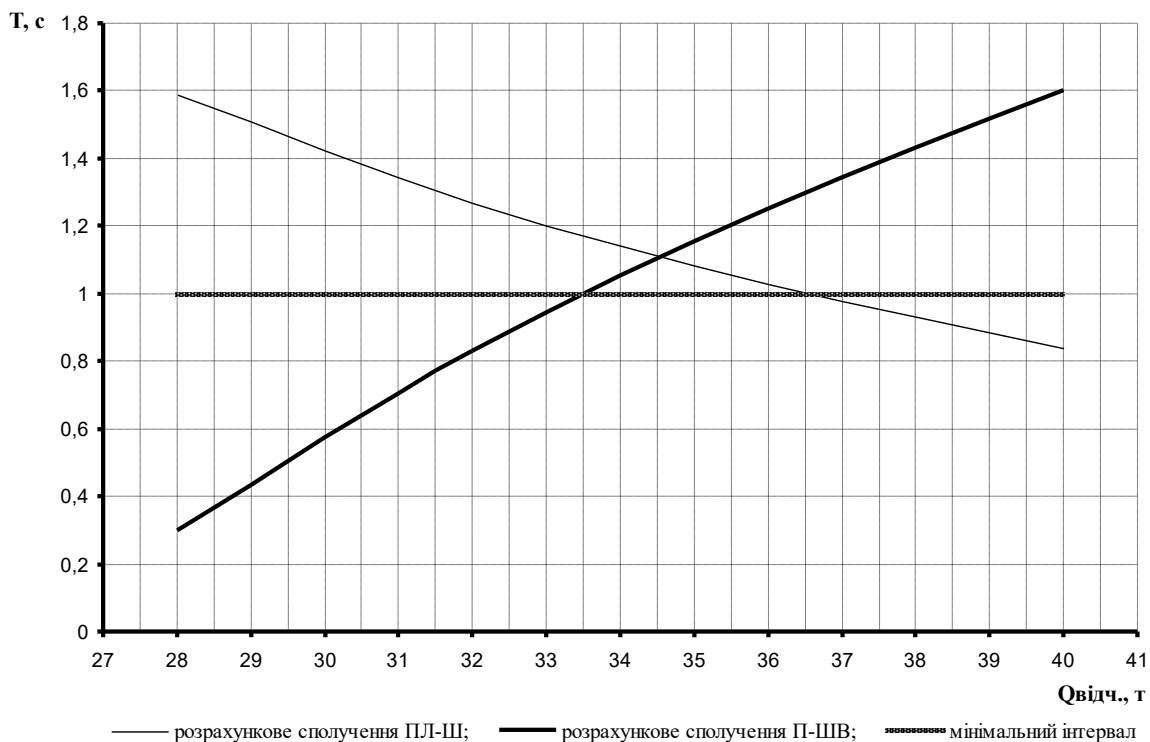


Рис. 4. Залежність інтервалу на останньому розділовому стрілочному переводі за маршрутом скочування розрахункових бігунів при величині гальмування П і ШВ на ДГП 0,7 м ен. в.

За величини гальмування П і ШВ на ДГП 0,8 м ен. в. і скочування бігунів ПЛ і Ш без гальмування ситуація інша: достатні інтервали на останньому розділовому стрілочному переводі при скочуванні бігунів у розрахункових сполученнях ПЛ-Ш і П-ШВ не забезпечені при масі Ш більше 33 т і масі П менше 36,7 т, тобто, якщо маса бігуна буде в діапазоні від 33 до 36,7 т, то матиме місце нагін відчепів (рис. 5).

Найбільша величина гальмування П і ШВ на ДГП, яку можна реалізувати для заданих умов експлуатації за умови забезпечення достатніх інтервалів на розділових елементах, складає 0,74 м ен. в. (рис. 6). Гранична маса відчепа при цьому складає 34,8 т, висота сортувального пристрою – 4,76 м і потрібна потужність ПГП 2,6 м ен. в.

Для реалізації величини гальмування відчепів на ДГП 0,74 м ен. в., маса яких перевищує 34,8 т, можна застосувати триланкові вагонні уповільнювачі (УВСК-10 (номінальна потужність – 1,3 м ен. в.), ЗВУ-05 (номінальна потужність – 1,3 м ен. в.), НК 114-02 (номінальна потужність – 1,2 м ен. в.) тощо). Однак у цьому випадку, окрім задачі визначення ступеня гальмування кожного відчепа, необхідно ще визначити тривалість їхнього гальмування. Це дещо ускладнює процес регулювання швидкості на ДГП і може потребувати автоматизації роботи цієї позиції, що відповідно призведе до збільшення капітальних вкладень і експлуатаційних витрат сортувального пристрою. Крім того, не виключені помилки в реалізації величини гальмування відчепів 0,74 м ен. в.

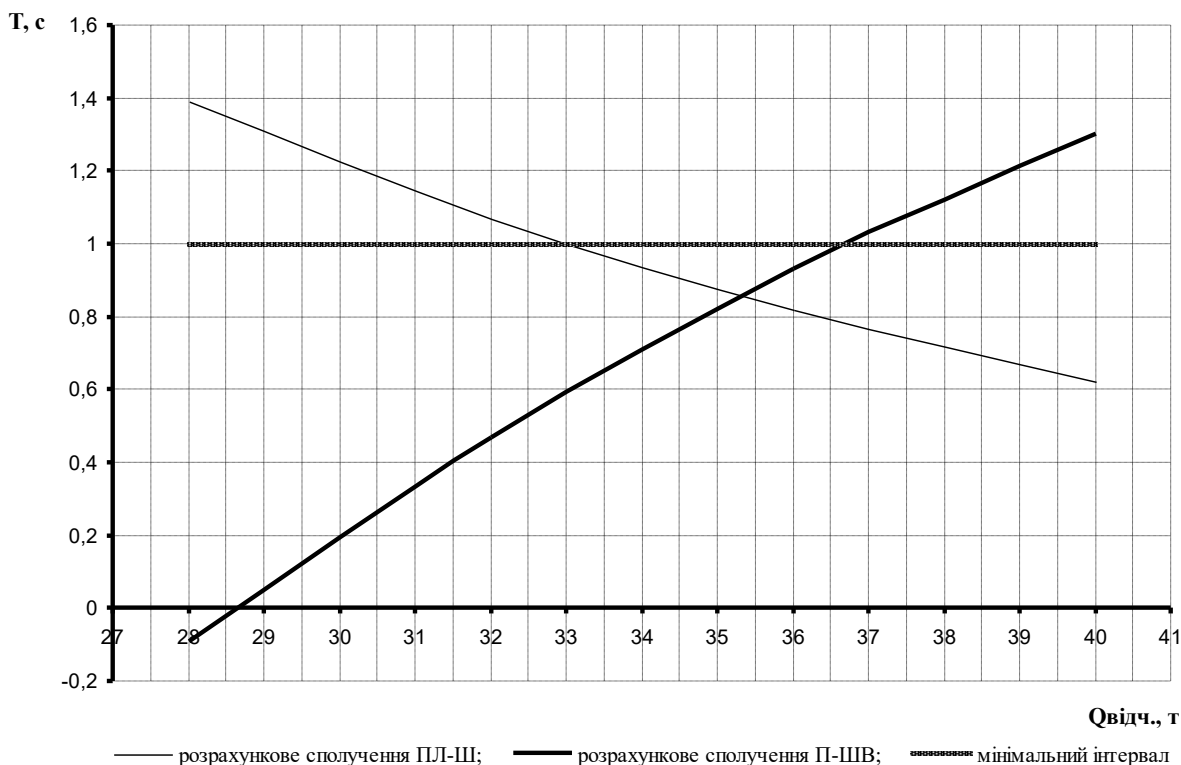


Рис. 5. Залежність інтервалу на останньому розділовому стрілочному переводі за маршрутом скочування розрахункових бігунів при величині гальмування П і ШВ на ДГП 0,8 м ен. в.

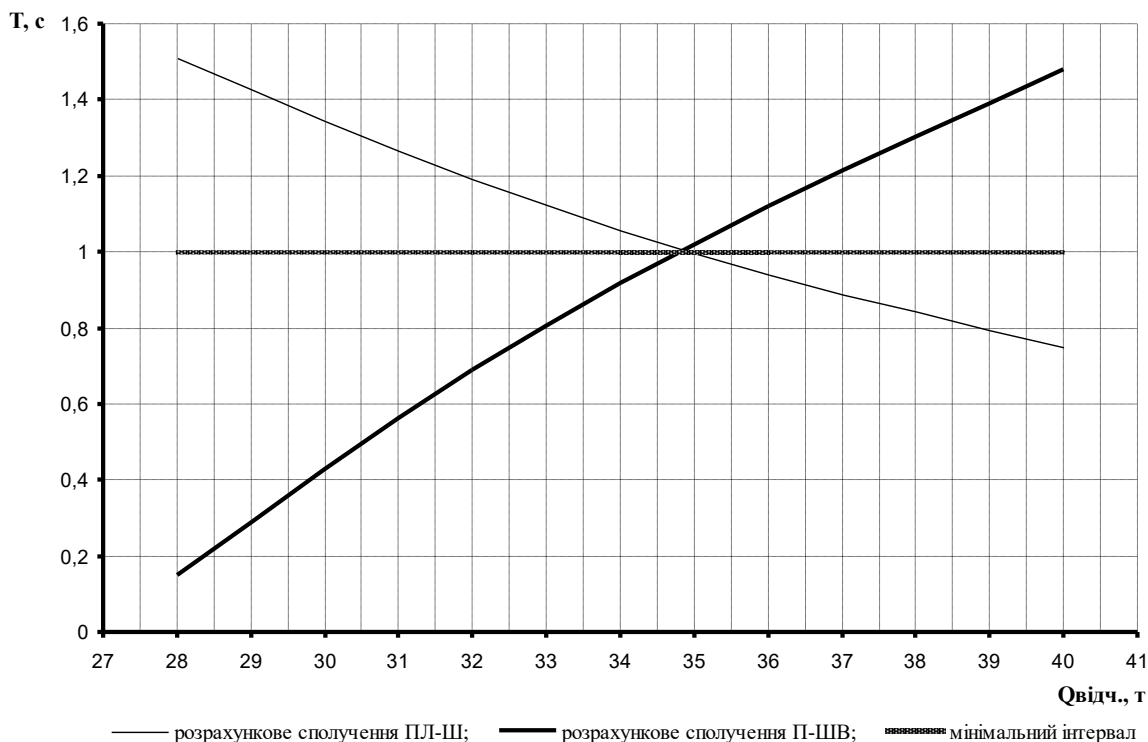


Рис. 6. Залежність інтервалу на останньому розділовому стрілочному переводі за маршрутом скочування розрахункових бігунів при величині гальмування П і ШВ на ДГП 0,74 м ен. в.

Виходячи з цього можна розглянути варіант застосування на ДГП малопотужних вагонних уповільнювачів з допустимою швидкістю входу на них більше 8 м/с (наприклад УВСК-11, номінальна потужність якого складає 0,6 м ен. в.). У цьому випадку нема необхідності розраховувати тривалість гальмування відцепів, достатньо тільки визначити ступінь гальмування кожного з них, що значно спрощує регулювання їхньої швидкості і дає змогу керувати вагонними уповільнювачами ДГП в ручному режимі. Недоліком такого варіанта є тільки зменшення величини гальмування відцепів (з 0,74 м ен. в. до 0,60 м ен. в. за умови застосування вагонних уповільнювачів УВСК-11), унаслідок чого буде потрібна більша потужність ПГП.

Разом із тим слід зазначити, що номінальна потужність вагонних уповіль-

нювачів ($H_{ун.}$) нормується для повновантажних вагонів. Гальмова потужність, реалізована уповільнювачами для гальмування вагонів довільної маси, буде залежати від тиску робочого тіла в гальмових циліндрах ($P_{ГЦ}$). В. І. Бобровським у роботі [17] було запропоновано цю потужність розраховувати за формулою

$$H_{ун.}^Q = \frac{H_{ун.} \cdot Q_{П} \cdot (P_{ГЦ} - P_0)}{Q \cdot (P_{НГЦ} - P_0)}, \quad (3)$$

де $Q_{П}$ – маса повновантажного вагона, т;

P_0 – частина $P_{ГЦ}$, витрачена на підйом (переміщення) маси гальмової системи, кгс/см²;

Q – маса вагона, що гальмується уповільнювачем, т;

$P_{НГЦ}$ – номінальний тиск у гальмових циліндрах, якому відповідає номінальна потужність, кгс/см².

На першому ступені гальмування тиск робочого тіла в гальмових циліндрах складає від 1,24 до 1,86 кгс/см² (середнє значення – 1,55 кгс/см²), на другому – від 2,27 до 3,31 кгс/см² (середнє значення – 2,79 кгс/см²), на третьому – від 3,93 до 4,96 кгс/см² (середнє значення – 4,45 кгс/см²), на четвертому – повний тиск у гальмовій магістралі (розраховували, наприклад, потужність вагонних уповільнювачів УВСК-11 за тиску в гальмовій магістралі 0,65 кПа або 6,6 кгс/см²) [18].

Наказом АТ «Укрзалізниця» дано такі рекомендації щодо гальмування відцепів [19]:

– вагони важкої і середньо-важкої вагових категорій мають починати гальмувати на четвертому ступені, а зі зниженням швидкості відчепа переходити на нижчий ступінь;

– вагони легкої, середньо-легкої і середньої вагових категорій мають гальмувати на меншому ступені, а за необхідності переходити на більш високий ступінь. Гальмування уповільнювачами натискного типу порожніх і легковагонних вагонів, навантажених на вісь у яких становить менше 12 т (усі вагони легкої і середньо-легкої вагових категорій і частина вагонів середньої вагової категорії), необхідно здійснювати з використанням першого або другого ступеня гальмування.

З урахуванням наведених вище даних і рекомендацій при гальмуванні на четвертому ступені вагонів масою 80 т уповільнювачами УВСК-11

$H_{ун.}^0 = 0,69$ м ен. в., вагонів масою 70 т –

$H_{ун.}^0 = 0,79$ м ен. в., тобто зі зменшенням маси відчепа, гальмова потужність на четвертому ступені збільшується, що призведе до збільшення інтервалу в розрахунковому сполученні ПГ-ШСВ, де ПГ – повільний бігун, маса якого відповідає

граничній масі відчепа, визначеній розрахунками за величини гальмування на ДГП 0,6 м ен. в. (30,8 т); ШСВ – швидкий бігун середньо-важкої категорії.

При гальмуванні ПГ на ДГП на другому ступені при середньому значенні тиску (2,79 кгс/см²) $H_{ун.}^0$ складе 0,67 м ен. в., що на 11,7 % більше, ніж величина гальмування повновантажного вагона на четвертій позиції. Оскільки в цьому випадку інтервал на останньому розділовому стрілочному переводі може бути недостатнім при скочуванні бігунів у сполученні П-ШВ, для гальмування П, маса якого буде близькою до граничної маси, можна використовувати перший ступінь гальмування. Слід зазначити, що вже при масі П 35 т можна гальмувати на другому ступені за середнього значення тиску робочого тіла в гальмових циліндрах ($H_{ун.}^0 = 0,59$ м ен. в.).

Отже, для застосування ДГП в конкретних умовах експлуатації, у тому числі з урахуванням фактичних гальмових характеристик вагонних уповільнювачів, необхідно на підставі результатів імітаційного моделювання визначити ступінь гальмування відцепів залежно від їхньої маси.

Висновки. Результати виконаних досліджень довели, що зменшення потужності ПГП за рахунок застосування на спускній частині сортувального пристрою ДГП є можливим. Максимальна величина гальмування на ДГП (0,74 м ен. в.) для заданих умов експлуатації забезпечена при гальмуванні відцепів, маса яких більше 34,8 т. Для спрощення процесу гальмування таких відцепів на ДГП (тобто регулювання їхньої швидкості шляхом повного використання потужності вагонних уповільнювачів на заданому ступені гальмування) доцільним є застосування малопотужних уповільнювачів, номінальна потужність яких менше максимально можливої величини гальмування на цій позиції.

У разі використання на ДГП вагонних уповільнювачів УВСК-11 їхня номінальна потужність на 0,14 м ен. в. менше за максимально можливу величину гальмування на зазначеній позиції. При цьому порівняння потрібної потужності ППП при $H_{\text{ДГП}}^{\text{ДГП}}=0$ м ен. в. і $H_{\text{ДГП}}^{\text{ДГП}}=0,6$ м ен. в. показує її зменшення на 0,57 м ен. в. Крім того, при $H_{\text{ДГП}}^{\text{ДГП}}=0,6$ м ен. в. висота сортувального пристрою зменшується на 0,4 м, а гранична маса відчепа складає 30,8 т, що на 4,0 т менше, ніж за максимально можливою величиною гальмування на ДГП.

За попередньою оцінкою, встановлення ДГП на спускній частині сортувального пристрою з гравітаційно-прицільним гальмуванням відчепів дасть змогу зменшити витрати за розрахунковий період 10 років із приведенням вартісних оцінок результатів і витрат різних років до першого року на 15 %.

Для отримання додаткового економічного ефекту подальші дослідження слід спрямувати на визначення раціональних параметрів плану колійного розвитку сортувального пристрою та удосконалення алгоритмів розрахунку керуючих впливів на вагонні уповільнювачі паркової гальмової позиції.

Список використаних джерел

1. Shabelnikov A. N., Lyabakh N. N. Intellectualization of sorting processes control on the basis of instrumental determination of analogies. *2nd International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, IITI 2017, Varna, Bulgaria*. 2017. P. 138–145. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68324-9_15.
2. Жуковицкий И. В. Цифровые системы управления скоростью скатывания отцепов на сортировочных горках: монография. Днепропетровск : изд-во Маковецкий, 2012. 203 с.
3. Новий вагонний уповільнювач УВСК українського виробництва / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, М. І. Березовий, А. А. Гарбузов. *Залізничний транспорт України*. 2010. № 2. С. 34–38.
4. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках: монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко и др. Днепропетровск: изд-во Маковецкий, 2010. 260 с.
5. Kozachenko D., Bobrovskiy V., Demchenko Y. A method for optimization of time intervals between rolling cuts on sorting humps. *Journal of Modern Transportation*. 2018. 26(3). P. 189–199. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40534-018-0161-2>.
6. Probabilistic approach for the determination of cuts permissible braking modes on the sorting humps / V. Bobrovskiy, D. Kozachenko, A. Dorosh et al. *Transport Problems*. 2016. 11(1). P. 147–155. URL: <http://dx.doi.org/10.20858/tp.2016.11.1.14>.
7. Дорош А. С. Оптимізація режимів гальмування відчепів на сортувальній гірці. *Транспортні системи та технології перевезень: збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2021. Вип. 22. С. 28–35.
8. Kozachenko D., Grevtsov S., Titova A. Determination of the Optimal Cars Exit Speeds from the Retarders on Sorting Humps. *Proceedings of 27th International Scientific Conference Transport Means 2023. Part II*. 2023. P. 966–971.
9. Kozachenko D. M., Bobrovskiy V. I., Grevtsov C. V., Berezoviy M. I. Controlling the speed of rolling cuts in conditions of reduction of brake power of car retarders. *Science and Transport Progress*. 2021. 3(63). P. 28–40. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74710>.
10. Calculating Exit Speed of Rolling Cuts Based on Fuzzy Neural Networks / XU Wan-an, SHI Xuan, LIN Tong-yuan. *China Railway Science*. 2001. No. 03. P. 161–165.

11. Study on Neural Network Based Space-interval Speed-control Model / YAO Jing ming, LI Xue ren, LIU Hu xing. *China Railway Science*. 2001. No 02. P. 127–133.
12. Research on profile optimization design method for coupling area in marshalling yard under application of heavy haul freight car / H. Zhang , H. Yang, S. Xia, J. Wang, R. Li. *Journal of the China Railway Society*. 2016. 38(10). P. 14–19. URL: <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/tdxb201610002>.
13. Бобровский В. И., Колесник А. И. Определение рациональной конструкции продольного профиля сортировочной горки. *Транспортні системи та технології перевезень: збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012. Вип. 4. С. 19–24.
14. Бобровский В. И., Колесник А. И., Дорош А. С. Совершенствование конструкции плана путевого развития горочных горловин. *Транспортні системи та технології перевезень: збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011. Вип. 1. С. 27–33.
15. Розсоха О. В. Эффективность работы сортувальних гірок при застосуванні нових гіркових горловин. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2008. 5/3(35). С. 51–59.
16. Огар О. М., Таратушка К. В. Дослідження ефективності застосування технології гравітаційно-прицільного гальмування відцепів. *Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2015. Вип. 9. С. 49-56.
17. Бобровский В. И. Теоретические основы совершенствования конструкции и технологии работы железнодорожных станций: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.20. Днепропетровск, 2002. 534 с.
18. Бобровський В. І. , Козаченко Д. М. , Коробйова Р. Г. Моделювання роботи вагонних уповільнювачів в задачах дослідження сортувального процесу. *Залізничний транспорт України*. 2010. № 1. С. 5–8.
19. Методичні рекомендації операторам сортувальних гірок щодо управління пристроями на механізованих і автоматизованих сортувальних гірках: Наказ Укрзалізниці від 22.02.2013 р. № 042-Ц/од. Київ: ТОВ «Інпрес», 2013. 108 с.

Огар Александр Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1967-5828.

Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua.

Левченко Антон Александрович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: Anton.Levchenko.post@gmail.com.

Кондратьев Игорь Викторович, аспірант кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-42. E-mail: oves.prod@gmail.com.

Кустов Рубен Валерійович, магістрант, група 221-ОПУТ-Д22, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: kustov@kart.edu.ua.

Зав'ялов Макар Ігорович, магістрант, група 221-ОПУТ-Д22, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: zavyalov@kart.edu.ua.

Ohar Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1967-5828. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: ogar.07.12@kart.edu.ua.

Levchenko Anton, Ph.D. Student, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: Anton.Levchenko.post@gmail.com.

Kondratyev Ihor, Ph.D. Student, department of Railroad stations and junctions, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-42. E-mail: oves.prod@gmail.com.

Kustov Ruben, master, group 221-OPUT-D22, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: kustov@kart.edu.ua.

Zavialov Makar, master, group 221-OPUT-D22, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: zavyalov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 17.06.24 р.

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

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

Випуск 208

«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 28.06.2024 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 18,75. 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.