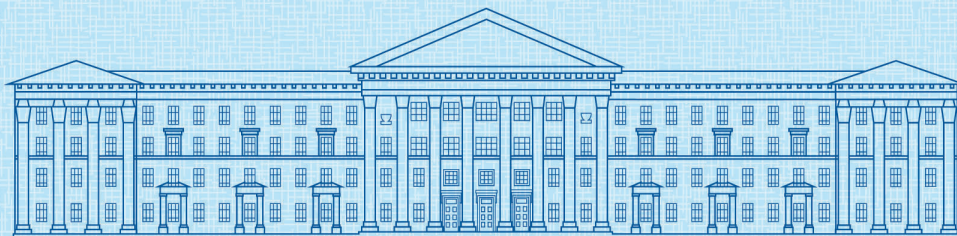




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№2(98)

.. 2022 ..

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 2 (98) 2022

Виходить 4 разів на рік ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2022

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук
Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляев М. М., УДУНТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Бондаренко І. О., УДУНТ (Україна); Вакуленко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., УДУНТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мацюк В. І., Державний університет інфраструктури та технологій (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковські А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 26.09.2022 р., протокол № 1

Видавець Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:
1936–1993 рр. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 2 (98) 2022

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2022

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Chairman of the Editorial Board of the University
Editor-in-Chief
Deputy Chief Editor
Executive Secretary

Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., USUST (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Matsiuk V. I., State University of Infrastructure and Technology (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., USUST (Ukraine)

Journal
was registered

by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.
Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012

Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).

Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.

Published according to the Academic Council decision of the University from 26.09.2022, Protocol no. 1

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address
of Founder

Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua; journal site: <http://stp.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;

1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175),

since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 656.225.073.436:504.5

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО^{1*}, М. В. КАЛИМБЕТ²

^{1*}Каф. «Хімія та інженерна екологія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 774 04 64, ел. пошта j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

²Каф. «Хімія та інженерна екологія», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 431 19 69, ел. пошта kalimbet.nicolay@gmail.com, ORCID 0000-0002-2209-6395

Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності взаємодії складових системи «відправник – перевізник – одержувач»

Мета. Дослідження спрямоване на розробку рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи відповідних підрозділів системи «відправник – перевізник – одержувач» із забезпеченням безпеки на залізничному транспорті під час перевезення небезпечних вантажів або/та в разі виникнення аварійної ситуації. **Методика.** На основі графічних, аналітичних інструментів та за допомогою теорії вірогідності проведено аналіз оцінки виникнення аварійної ситуації. **Результати.** Шляхом побудови комбінованої діаграми Ісікави дерева ключової події та карти ризиків ключової події проведено аналіз оцінки ризиків виникнення аварійної ситуації. Виявлено можливі причини та фактори виникнення аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом (влучання ракетного снаряда, ожеледиця, перевищення швидкості, перешкоди на залізничній колії). Розроблено рекомендації для зниження ризиків виникнення аварійної ситуації (співпраця АТ «Укрзалізниця» та відповідних центрів, що проводять спеціальне навчання з питань перевезення небезпечних вантажів, ефективна взаємодія всіх учасників системи «відправник – перевізник – одержувач», а також досконалий контроль за дотриманням правил безпеки). Подано пропозиції щодо вдосконалення процедури взаємодії відповідних підрозділів системи «відправник – перевізник – одержувач», що можуть бути задіяні в ліквідаційних заходах (використання універсальних сорбційних полотен (USC) для локалізації розливів небезпечних вантажів, використання як прикриття вагонів моделей 19–795 та 19–795–01 для перевезення USC, регенерація та повторне використання USC). **Наукова новизна.** Розроблено рекомендації для мінімізації негативних наслідків аварій на базі системного аналізу й оцінки ризиків їх виникнення під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом. **Практична значимість.** У сфері безпеки застосування цих рекомендацій сприятиме зниженню ризиків на залізничному транспорті з точки зору недопущення ситуацій, що загрожуватимуть екологічному стану довкілля й життєдіяльності людини, особливо в умовах воєнного стану, що має місце на теренах нашої країни, а також оновленню матеріально-технічних засобів ліквідації аварійних наслідків.

Ключові слова: оцінка виникнення ризиків; аналіз причин і наслідків; діаграма Ісікави; дерево ключової події; екологічні технології; небезпечні вантажі; локалізація аварій; ліквідація аварій; універсальне сорбційне полотно

Вступ

У наш час [3] у багатьох країнах світу, у тому числі в державах Євросоюзу та в Україні, зростає розуміння важливості вирішення глобальних проблем транспортних комплексів. Це перш за все пов'язано зі збільшенням процесів виготовлення продукції та обсягів перевезень

небезпечних вантажів. А це потребує підвищення безпеки та ефективності перевезень, зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище.

Через швидкий розвиток мобільності суспільства заходи щодо забезпечення безпеки процесів перевезень небезпечних вантажів усіма видами транспорту, на жаль, не розвиваються

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

так стрімко, як це потрібно. Іноді дуже складно аналізувати причини й наслідки виникнення аварійної ситуації. Саме тому розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності взаємодії в системі «відправник – перевізник – одержувач» є актуальним завданням.

Ефективність роботи відповідних підрозділів в разі виникнення аварійних ситуацій під час перевезень небезпечних вантажів досліджували як зарубіжні дослідники B. Drzewieniecka & M. Nowak [10], A. A. Conca [9], L. Szaciłło, M. Jacyna з колегами [12], M. Šolc, M. Hovanec [11], F. Borghetti, G. Malavasi [8], так і вітчизняні науковці: Д. М. Козадою [8], О. В. Лаврухін [13], А. М. Огороков, В. М. Самсонкін [5] та багато інших. Отже, аналіз ефективності роботи відповідних підрозділів транспорту протягом багатьох років є предметом численних наукових публікацій по всьому світу.

Аналіз літературних даних свідчить про те, що ефективність ліквідаційних заходів залежать не тільки від методики, яку застосовують, а й пов'язана з відсутністю чіткої скоординованої роботи і відповідальності в системі «відправник – перевізник – одержувач», що також впливає на безпеку під час перевезень небезпечних речовин.

У роботах [8, 10, 12] розглянуто проблеми перевезення небезпечних вантажів та причини, що призводять до виникнення аварійних ситуацій. Так, у роботі [8] описано кількісну модель для аналізу доступності відкритих ділянок залізничної лінії в надзвичайних умовах із використанням дорожньої системи (Borghetti, 2014). У дослідженні [12] описано особливості формування ризику, пов'язаного з перевезенням небезпечних вантажів, для врахування якого потрібні стратегії та інструменти, що дозволять знизити рівень ризику для суспільства, власників та навколишнього середовища. Акцентовано на відсутності в тактичному та оперативному плануванні додатків для підтримки перевізників небезпечних вантажів.

У роботі [10] розглянуто проблему перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом та дотримання правил міжнародних перевезень, що регламентують дії всіх учасників. Проте питання, порушені дослідниками в роботах [8, 10, 12], розглянуто не в розрізі

функціональної системи «відправник – перевізник – одержувач», а як окремі її елементи, що ніяк не взаємодіють між собою. А це є актуальним завданням.

Мета

Ураховуючи вищезазначене, ми передбачаємо розробити рекомендації щодо підвищення ефективності роботи відповідних підрозділів системи «відправник – перевізник – одержувач» із забезпечення безпеки на залізничному транспорті під час перевезення небезпечних вантажів або/та в разі виникнення аварійної ситуації.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- 1) аналіз оцінки ризиків виникнення аварійної ситуації;
- 2) виявлення можливих причин і факторів виникнення аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом;
- 3) розробка рекомендацій для мінімізації негативних наслідків у разі виникнення аварійної ситуації під час перевезення небезпечних вантажів окремих класів;
- 4) розробка пропозицій щодо вдосконалення процедури взаємодії відповідних підрозділів системи «відправник – перевізник – одержувач».

Методика

Ризики на залізничному транспорті розуміють як ймовірність втрат, збитків у процесі здійснення перевезень. Такі ризики характеризуються складністю та різноманітністю, тому їх необхідно класифікувати за окремими ознаками [5]. Найважливішими ознаками класифікації ризиків на залізничному транспорті є:

- об'єкт прояву;
- джерела виникнення;
- етапи транспортування;
- різновиди перевезень;
- можливість впливати на ризики;
- час виникнення;
- розмір збитків тощо.

Оцінка ризиків дозволяє організації враховувати, якою мірою події можуть вплинути на досягнення її цілей. Оцінка ризику складається з ідентифікації ризику, його аналізу та порівняль-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ної оцінки. Для цього використовують кількісні чи якісні методи або досить часто їх поєднання.

Під час оцінювання ризику існує проблема вибору, що стосується прийняття рішення щодо ризику небезпечної поведінки зі знанням того, що може статися аварія, або спробами обмежити, зменшити чи усунути ризик виникнення аварії відповідно до наявних умов. Також виявлено, що ризик на транспорті є поєднанням імовірності активації небезпечної події та спричинених у зв'язку з цим збитків.

Метод суб'єктивної оцінки та метод побудови дерева рішень є незамінними інструментами прогнозування та оцінки ризиків виникнення аварійної ситуації, корегування роботи відповідних підрозділів з керування безпекою на залізничному транспорті під час перевезень небезпечних вантажів, коли неможливо точно аналізувати всі обставини чи проводити спостереження й вимірювання. Неповним даним тоді дають оцінку досвідчені експе-

рти. У результаті колективних обговорень і доповнень професійних знань експертів можна сформулювати досить точну оцінку досліджуваного явища, на базі якої сконструювати реальну модель цього явища.

Автори на основі графічних, аналітичних інструментів та за допомогою теорії вірогідності провели аналіз оцінки виникнення аварійної ситуації. Для цього спочатку було здійснено ідентифікацію небезпечного вантажу, оцінку потенційних ризиків перевезення та зберігання небезпечного вантажу у 1511 в умовах населеного міста, ідентифікацію потенційних сценаріїв небезпечної події. Автори обрали небезпечну речовину карбамід як таку, яку буде перевозити залізничний транспорт, для оцінки ризиків виникнення аварійних ситуацій. Оцінку ризиків виникнення аварійної ситуації проводили біля населеного пункту Кам'янське, а саме на залізничній станції Воскобійня з радіусом імовірного ураження 1,5 км (див. рис. 1).

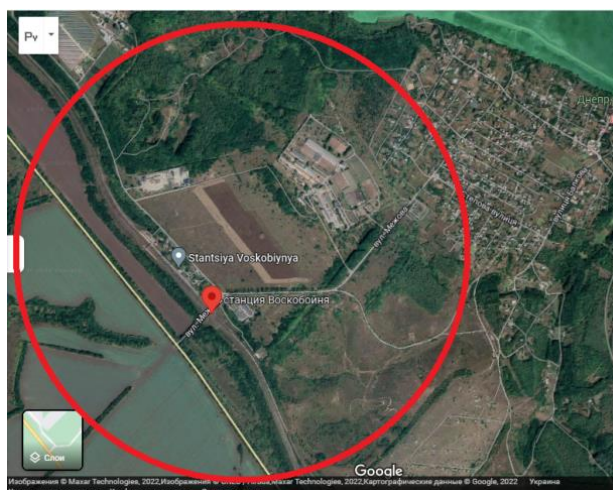


Рис. 1. Геопросторова характеристика залізничної станції Воскобійня, на якій проведено моделювання (червоне коло – це зона ймовірного ураження, що складає 1,5 км)

Fig. 1. Geospatial characteristics of the Voskobiyiia railway station, where the simulation was carried out (the red circle is the zone of probable damage, which is 1.5 km)

Орієнтовна кількість небезпечного вантажу, яка умовно розлилась під час створення моделі, – це 160 т, тобто приблизно 2 цистерни з карбамідом. Ключова подія, яку було взято для моделювання, – це розгерметизація цистерн на під'їзних коліях через порушення правил маневрових робіт. Далі на основі аналізу при-

чин та наслідків ключової події було побудовано комбіновану діаграму Ісікави дерева ключової події (див. рис. 2), яка дає нам змогу виявити причинно-наслідкові зв'язки для більш точної оцінки ризиків виникнення аварійної ситуації.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

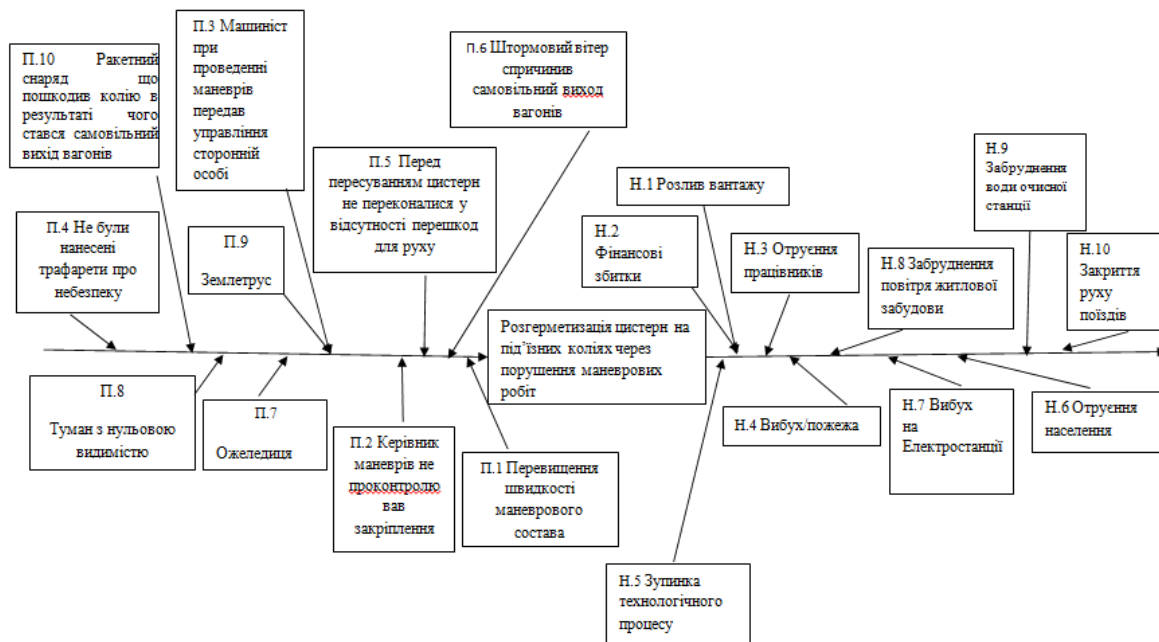


Рис. 2. Комбінована діаграма Ісікави дерева ключової події

Fig. 2. Combined Ishikawa diagram of the key event tree

Наступним кроком була розробка карти ризиків ключової події (внутрішня експертна самооцінка), у табл. 1 представлено ключ шкали оцінювання для цієї карти.

Далі ми проводили аналіз прямих і прихованих пріоритетів. Це дозволяє виробити основну стратегію та рекомендації щодо зниження ризиків виникнення аварійних ситуацій.

На базі проаналізованих даних запропоновано технологію з використанням універсального сорбційного полотна (USC), що не тільки підвищить рівень безпеки під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом, а й дозволить зменшити наслідки розливання небезпечних вантажів, якщо все ж таки виникла аварійна ситуація. Ця технологія базується на виготовленні універсального сорбційного полотна (USC), а також використанні його як засобу для локалізації та ліквідації наслідків аварійного розливання небезпечної речовини.

Варто зазначити, що сорбенти використовують для ліквідації аварійних наслідків тільки під час перевезення рідких небезпечних речовин. Саме тому ліквідація не всіх класів небезпечних вантажів сорбційними методами буде ефективною.

Ураховуючи акцент на економічність і технологічність ліквідаційних заходів, автори зорієнтували увагу на розробці універсального сорбенту, який можна використовувати для локалізації та ліквідації аварійних наслідків під час перевезення деяких небезпечних вантажів таких класів:

- Клас 3 Легкозаймисті рідини;
- Клас 5.1 Речовини, що окислюють;
- Клас 5.2 Органічні пероксиди;
- Клас 8 Корозійні речовини.

Запропоновано використовувати сорбент у вигляді сорбційного полотна.

Використання сорбційного матеріалу є можливим у різних технологічних варіаціях. Перший варіант – це використання у вигляді дрібнозернистої фракції. Другий варіант – завантаження вугілля, у спеціальні кофри з фільтрувального матеріалу для виготовлення сорбційних бонів [6], сорбційних матів чи сорбційних подушок.

Найбільш перспективним із техніко-економічних міркувань виявилось використання у вигляді сорбційного полотна.

Розроблене універсальне сорбційне полотно (USC) характеризується щільністю 1 200 г/м²,

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

складається з універсального сорбенту з композитних матеріалів (відходи кави та деревинна стружка), а також мішків, у яку засипають

універсальний сорбент із композитних матеріалів. Для виготовлення кофру застосовували фільтрувальну тканину ТГФ–8.

Таблиця 1

Ключ шкали оцінювання для карти ризиків ключової події

Table 1

Rating scale key for key event risk map

		Тиск впливу наслідків				
		Мінімальний	Невеликий	Помірний	Значний	Великий
Оцінка вірогідності настання наслідку	Напевно	Нижча за середню	Середня	Вища за середню	Висока	Висока
	Вірогідно	Низька	Нижча за середню	Середня	Вища за середню	Висока
	Можливо	Низька	Нижча за середню	Середня	Вища за середню	Вища за середню
	Маловірогідно	Низька	Нижча за середню	Нижча за середню	Середня	Вища за середню
	Мінімально	Низька	Низька	Нижча за середню	Середня	Середня
Якісна оцінка (експертне судження)		Низька	Нижча за середню	Середня	Вища за середню	Висока
Кількісна шкала		5 – 10 – 15 – 20	25 – 30 – 35 – 40 – 45	50 – 55 – 60 – 65	70 – 75 – 80 – 85	90 – 95 – 100

Тканина фільтрувальна поліпропіленова ТГФ–8 – це міцна, стійка до агресивного середовища тканина білого кольору з поліефірної нитки для фільтрації, характеризується щільністю 470 г/м² та температурним діапазоном від –100 °С до +90 °С. Використовується в гірничорудній, хімічній, будівельній промисловості. Склад – 100 % нитка ПП [7].

Запропоноване сорбційне полотно містить мішок із фільтрувальної тканини, кавові відходи (до 70 %), деревинна стружка (до 70 %), його щільність становить 1 200 г/м² і більше. Рекомендовані оптимальні розміри комірок сорбційного полотна – 200 × 250 мм.

Контактування сорбційного полотна відбувається спочатку поверхнею фільтрувальної тканини, а далі активованими продуктами карбонізації (сумішшю карбонізату кавових відходів та деревинної стружки).

Застосування запропонованого методу з використанням USC дозволить значно скоротити час на розгортання та реалізацію ліквідаційних заходів у разі емісії небезпечних вантажів під час аварії, перевезення їх будь-якими видами транспорту.

Результати

Аналіз зони ймовірного ураження, представленої на рис. 1, показує, що в ній знаходяться такі об'єкти, що можуть значно посилити масштаб і негативні наслідки аварії:

- 1) багатоквартирна житлова забудова;
- 2) будівлі соціального призначення;
- 3) водосховище;
- 4) землі сільськогосподарського призначення.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Аналіз потенційних сценаріїв небезпечних подій та комбінованої діаграми Ісікави дерева ключової події представленої на рис. 2, вказує на те, що саме людський фактор – порушення безпеки руху, маневрової роботи або неправи-

льне інформування перевізника про вантаж – є основною причиною їх виникнення.

На основі ключа оцінювання шкали (табл. 1) було розроблено карту ризиків ключової події (табл. 2).

Таблиця 2

Карта ризиків ключової події (внутрішня експертна самооцінка)

Table 2

Key event risk map (internal expert self-assessment)

		Наслідки внутрішнього середовища						Наслідки зовнішнього середовища						
		Н.1	Н.2	Н.3	Н.4	Н.5	ΣНВ	Н.6	Н.7	Н.8	Н.9	Н.10	ΣНЗ	ΣП
Причини внутрішнього середовища	П.1	80	90	60	65	65	360	30	65	35	75	65	270	630
	П.2	50	70	20	20	50	210	20	50	40	70	50	230	440
	П.3	50	90	20	20	50	230	30	10	10	50	40	140	370
	П.4	50	80	60	20	90	300	50	45	35	70	45	245	545
	П.5	30	70	70	80	85	335	70	60	35	70	75	310	645
	ΣПВ	260	400	230	205	340	1 435	200	230	155	335	275	1 195	
Причини зовнішнього середовища	П.6	40	30	10	10	20	110	30	60	40	60	55	245	355
	П.7	80	50	60	65	45	300	40	70	30	60	75	275	575
	П.8	30	80	40	60	35	245	30	10	10	40	40	130	375
	П.9	70	50	50	60	40	270	50	90	20	40	60	260	530
	П.10	90	90	55	70	90	395	55	90	45	85	80	355	750
	ΣПЗ	310	300	215	265	230	1 320	205	320	145	285	310	1 265	
	ΣН	570	700	445	470	570		405	550	300	620	585		5 215

Ця карта ризиків дає змогу провести аналіз прямих і прихованих пріоритетів (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Результати зваженої оцінки пріоритету причин і наслідків (прямі пріоритети)

Table 3

Results of a weighted assessment of the priority of causes and consequences (Direct priorities)

Причина	Розрахункова вага	Пріоритет (ранг)	Наслідок	Розрахункова вага	Пріоритет (ранг)
П.1	0,12	2	Н.1	0,11	3
П.2	0,08	5	Н.2	0,13	1
П.3	0,07	6	Н.3	0,09	4
П.4	0,10	4	Н.4	0,09	4

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Продовження табл. 3

Continuation of Table 3

Причина	Розрахункова вага	Пріоритет (ранг)	Наслідок	Розрахункова вага	Пріоритет (ранг)
П.5	0,12	2	Н.5	0,11	3
П.6	0,07	6	Н.6	0,08	5
П.7	0,11	3	Н.7	0,11	3
П.8	0,07	6	Н.8	0,06	6
П.9	0,10	4	Н.9	0,12	2
П.10	0,14	1	Н.10	0,11	3

Таблица 4

Виявлені приховані пріоритети

Table 4

Revealed hidden priorities

Критерій порівняння			Запропонована стратегія подолання ризику
1	П.1–Н.2	0,070	Локомотивна бригада повинна проходити позапланові, повторні та цільові інструктажі, під час яких детально ознайомитися з вимогами безпеки в поточній роботі та в аварійних ситуаціях.
2	П.5–Н.9	0,073	
3	П.10–Н.1	0,070	Проведення інструктажів, контролю знань щодо правил маневрової роботи, перевезення небезпечних вантажів в умовах ракетного обстрілу з детальним аналізом усіх можливих наслідків НС
4	П.10–Н.7	0,071	
5	П.10–Н.10	0,069	

Проаналізувавши результати виявлених прямих і прихованих пріоритетів, доходимо висновку, що найбільш вірогідними причинами виникнення аварійної ситуації є такі: ракетний снаряд, що пошкодив колію, у результаті чого сталося самовільне сходження вагонів із рейок; перевищення швидкості; ожеледиця, що призвела до збільшення гальмівного шляху.

Відповідно до схеми, процедура перевезення небезпечних вантажів, локалізації та ліквідації аварійних розливів відбувається таким чином. До локомотива 1 приєднують комбінований вагон 2 з контейнерами 3 з універсальними сорбційними полотнами 8. У разі виникнення аварійної ситуації під час перевезення рідкого небезпечного вантажу 10 з комбінованого вагона 2 дістають контейнери 3 з USC 8. Сорбційними полотнами 8 закидають зону утворення дзеркала 11 витоку 7, щоб запобігти

потраплянню небезпечного вантажу 10 у товщу ґрунту та зменшити зону ураження товщі ґрунту 9. Потім відпрацьовані сорбційні полотна 8 поміщають, назад у контейнери 3, а після прибуття локомотива 1 до місця його постійної дислокації сорбційні полотна 8 регенерують, і їх можна використовувати знову.

Таким чином, використання запропонованого універсального сорбційного полотна дозволяє локалізувати та/або ліквідувати рідкі небезпечні речовини 3, 5 й 8-го класів небезпеки на рівні адсорбційної активності більше ніж 90 %. Важливо зазначити, що дана методика використання USC під час масштабної аварії буде не ефективною, але у такому випадку сорбційне полотно можна застосовувати для локалізації небезпечної речовини до прибуття аварійно-ліквідаційних підрозділів.

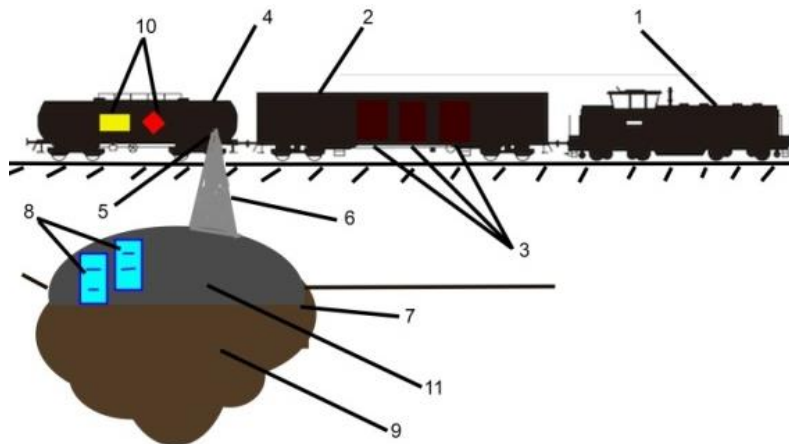


Рис. 3. Візуалізація процедури ліквідації наслідків аварії під час перевезення небезпечних вантажів (нафтопродуктів) [1, 2]:

- 1 – локомотив; 2 – вагон із сорбційним полотном (8); 3 – контейнери з сорбційним полотном (8); 4 – цистерна з рідким небезпечним вантажем (10); 5 – отвір, через який відбувається витік небезпечного вантажу (10); 6 – поверхневе стікання рідкого небезпечного вантажу (10) за рельєфом місцевості; 7 – зона утворення дзеркала витіку (11); 8 – сорбційне полотно; 9 – зона ураженої товщі ґрунту

Fig. 3 Visualization of the procedure for eliminating the consequences of an accident during the transportation of dangerous goods (petroleum products) [1, 2]:

- 1 – locomotive; 2 – wagon with sorption cloth (8); 3 – containers with sorption cloth (8); 4 – tank with liquid dangerous cargo (10); 5 – hole through which leakage of dangerous cargo occurs (10); 6 – surface flow of liquid dangerous cargo (10) according to the topography of the area; 7 – zone of leakage mirror formation (11); 8 – sorption cloth; 9 – zone of the affected soil layer

Реалізація представленої технологічної схеми дозволяє отримати оперативний доступ до ліквідаційних матеріалів у зоні утворення й локалізації розливу, та і в значній мірі зекономити час на організацію забезпечення необхідними матеріалами.

Високу ефективність запропонованого методу забезпечує вибір відповідного сорбенту. Як зазначено вище, ефективний вибір сорбенту є складним організаційним завданням, яке важко реалізувати в оперативних умовах проведення ліквідаційних заходів. Представлена технологічна схема дозволяє вирішити цю проблему завчасно: вибір, придбання й накопичення сорбентів відбувається задовго до виникнення аварійної емісії.

Як видно на схемі, сорбційне полотно заплановано перевозити у вагоні одразу за локомотивом. Щоб не використовувати додатковий вагон, сорбційне полотно передбачено перевозити в так званих вагонах прикриття, які встановлюють між рухомих складом та локомотивом (відповідно до рекомендованих нормами

прикриття). Для перевезення сорбційних полотен запропоновано використовувати комбіновані вагони моделей 19–795 та 19–795–01 (рис. 4).

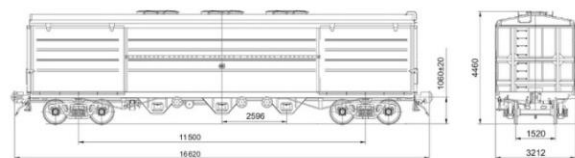


Рис. 4. Вигляд комбінованих вагонів моделей 19–795 та 19–795–01 [3]

Fig. 4. View of combined wagons models 19–795 and 19–795–01 [3]

Ці вагони призначені для перевезення по всій мережі залізниць із колією 1 520 мм сипких вантажів із завантаженням через верхні люки й гравітаційним розвантаженням у міжрейковий простір через нижні розвантажувальні люки.

Технічні характеристики вагона представлені в табл. 5.

Таблиця 5
Технічні характеристики вагона (за [3])

Table 5

Technical characteristics of the car (according to [3])

Технічні характеристики		
Вантажопідйомність, не більше, т	64,0	
Об'єм кузова для сипких вантажів, м ³	74,0	
Об'єм кузова для тарних вантажів, м ³	70,0	
Маса тари, не більше, т	29,1	
Розрахункове статичне навантаження від колісної пари на рейки, кН(тс)	230,5	23,5
База вагона, мм	11 500	
Довжина вагона по осях автозчеплень, мм	16 620	
Габарит за ГОСТ 9238	1–ВМ	
Число люків:		
– завантажувальних	3	
– розвантажувальних	6	
Візок	18–7055	
Конструкційна швидкість, км/год	120	
Міжремонтний пробіг, км	210 000	
Строк служби, років	26	

Комбіновані вагони моделей 19–795 та 19–795–01 було обрано тому, що вони мають не тільки завантажувальні верхні та розвантажувальні нижні люки, а й бокові двері, через які також можна завантажувати та вивантажувати сорбційне полотно.

До того ж ці вагони виготовляє ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», один із національних виробників, що значно спрощує логістику з їх закупівлі й доставки на місце експлуатації.

Також додатково проаналізовано динамічні характеристики комбінованого вагона у складі поїзда, що довело можливість його викорис-

тання як вагона-прикриття без впливу на характеристики рухомого складу.

Після використання сорбційних полотен їх необхідно регенерувати для повторного використання або утилізувати.

Існує багато методів регенерації, проте найбільш перспективною є механічна обробка (віджимання) полотна. Хоча ефект від такої регенерації невеликий і сягає < 40 %, цей метод не потребує значних фінансових затрат і дозволяє повторне використання сорбційного полотна й мінімізацію втрати вантажу.

У деяких випадках, у тому числі й після багаторазового використання, сорбційні полотна потрібно буде утилізувати як відходи, беручи до уваги їх клас небезпеки за Державним класифікатором відходів 005–96. Утилізацію відходів (сорбційних полотен) як одного з економічних методів можна проводити такими способами:

1. Поховання у ґрунті. Для цього потрібно забезпечити дренажні канали. Щоб переробка нафтоокисними бактеріями пройшла успішно, потрібно перевірити кислотно-лужний баланс ґрунту.

2. Поховання на сміттєзвалищах.

3. Спалювання. Найчастіше зібрані нафтопродукти змішують із вугіллям, яке використовують на ТЕЦ.

Зараз існує багато компаній, які відповідно до нормативних вимог мають право на проведення утилізації відходів та до яких може звернутись АТ «Укрзалізниця» щодо утилізації сорбційних полотен.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено рекомендації щодо мінімізації негативних наслідків аварій на базі системного аналізу й оцінки ризиків їх виникнення під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом. Практичне застосування цих рекомендацій сприятиме зниженню ризиків на залізничному транспорті з точки зору недопущення ситуацій, що загрожуватимуть екологічному стану довкілля та життєдіяльності людини, особливо в умовах воєнного стану, що має місце на теренах нашої країни, а також онов-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

лення матеріально-технічних засобів для ліквідації аварійних наслідків. Усе це має призвести до чіткої скоординованої та взаємопов'язаної роботи й відповідальності в системі «відправник – перевізник – одержувач».

Висновки

Мету й завдання дослідження реалізовано шляхом розробки та впровадження таких науково-технічних рішень:

1) на основі комбінованої діаграми Ісікави дерева ключової події та карти ризиків ключової події проведено аналіз оцінки ризиків виникнення аварійної ситуації;

2) виявлено можливі причини та фактори виникнення аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом (влучання ракетного снаряда, ожеледиця, перевищення швидкості, перешкоди на залізничній колії);

3) розроблено рекомендації для зниження ризиків виникнення аварійної ситуації (співпраця АТ «Укрзалізниця» та відповідних центрів, що проводять спеціальне навчання з питань перевезення небезпечних вантажів, ефективна взаємодія всіх учасників системи «відправник – перевізник – одержувач», а також досконалий контроль за дотриманням правил безпеки);

4) розробка пропозицій щодо вдосконалення процедури взаємодії відповідних підрозділів

системи «відправник – перевізник – одержувач», що можуть бути задіяні в ліквідаційних заходах, а саме:

– використання USC як засобу локалізації та ліквідації аварійних розливів, що забезпечує швидкість розгортання, охоплення значної площі емісії та мінімізацію екологічних наслідків і втрат вантажу;

– використання окремих типів вагонів (комбіновані вагони моделей 19–795 та 19–795–01) для перевезення USC у складі вантажного потяга, що забезпечить зручний доступ до ліквідаційних матеріалів і зменшить витрати часу на ліквідаційні заходи за рахунок швидкого розгортання полотна – до 30–35 хв;

– регенерація та повторне використання відпрацьованого полотна (віджимання USC за допомогою механічних методів, при цьому кількість виділеної із сорбційного полотна речовини складає 10–40 %).

Отримані результати сприятимуть мінімізації негативних наслідків під час перевезення небезпечних вантажів та підвищенню безпеки інфраструктури. Розвиток досліджень у цьому напрямі може полягати в удосконаленні технологій локалізації і ліквідації аварійних розливів небезпечних вантажів та оптимізації виготовлення і застосування USC як економічно вигідного високоефективного сорбційного матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Козодой Д. С., Барбашин В. В. Оцінка надзвичайних подій під час перевезення небезпечних вантажів у контексті техногенного навантаження регіонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 3 (75). С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/134347>
2. Зеленько Ю. В., Калимбет М. В. Виготовлення сорбційного полотна з композитних матеріалів як засіб для ліквідації розливів небезпечних речовин на транспорті. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія : Транспортні системи і технології*. 2021. Вип. 38. С. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-24-3>
3. Зеленько Ю. В., Калимбет М. В. Удосконалення методу ліквідації розливів небезпечних речовин шляхом використання «універсального сорбційного полотна». *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2022. Т. 4, № 10 (118). С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263583>
4. *Комбіновані вагони моделей 19-795 та 19-795-01*. URL: <https://cutt.ly/1NAm048>
5. Самсонкін В. М., Ніколаєнко І. В., Булгакова Ю. В., Вернигора Р. В., Гненний О. М., Горобець В. Л., ... Юрченко О. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг* : колективна монографія. Київ : Талком, 2021. 312 с.
6. Сорока М., Ярышкина Л. Технология ликвидации разливов нефтепродуктов с превентивным накоплением сорбентов в зоне образования и локализации разлива. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. Т. 42. С. 45–55. DOI: <http://stp.diit.edu.ua/article/view/9275/8035>

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: <https://doi.org/10.15802/stp2022/267937>

© Ю. В. Зеленько, М. В. Калимбет, 2022

7. Ткань фильтровальная ТГФ-8 (56035). URL: <https://cutt.ly/JNAvCRK>
8. Borghetti F., Malavasi G. Road accessibility model to the rail network in emergency conditions. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2016. Vol. 6. Iss. 3. P. 237–254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.10.001>
9. Conca A., Ridella C., Saponi E. Risk Assessment for Road Transportation of Dangerous Goods : A Routing Solution. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 2890–2899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.407>
10. Drzewieniecka B., Nowak M. Safety Aspect in Carriage of Dangerous Goods by Railway Transport. *New Trends in Production Engineering*. 2018. Vol. 1. Iss. 1. P. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.2478/ntpe-2018-0004>
11. Šolc M., Hovanec M. The Importance of Dangerous Goods Transport by Rail. *Naše More*. 2015. Vol. 62. Iss. 3. P. 181–186. DOI: <https://doi.org/10.17818/nm/2015/si17>
12. Szaciłło, L., Jacyna, M., Szczepański, E., Izdebski, M. Risk assessment for rail freight transport operations. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2021. Vol. 23. Iss. 3. P. 476–488. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.3.8>
13. Panchenko S., Lavrukhin O., Shapatina O. Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1, No. 3 (85). P. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92203>

Y. V. ZELENKO^{1*}, M. V. KALYMBET²

¹Dep. «Chemistry and Ecological Engineering», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 774 04 64, e-mail j.v.zelenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5551-0305

²Dep. «Chemistry and Ecological Engineering», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 431 19 69, e-mail kalimbet.nicolay@gmail.com, ORCID 0000-0002-2209-6395

Development of Recommendations for Improving the Interaction Efficiency Between the Components of the «Sender-Carrier-Recipient» System

Purpose. The study is aimed at developing recommendations for improving the efficiency of the relevant units of the «sender-carrier-recipient» system for correcting their work on railway safety management during the transportation of dangerous goods and/or during an emergency situation. **Methodology.** On the basis of graphic, analytical tools and with the help of the probability theory, the assessment of the emergency situation occurrence was analyzed. **Findings.** On the basis of the combined Ishikawa diagram of the key event tree and the risk map of the key event, an analysis of the risk assessment of the emergency situation was carried out. Possible causes and factors of the occurrence of emergency situations during the transportation of dangerous goods by railway transport (hit by a missile, ice, speeding, obstacles on the railway track) were identified. Recommendations have been developed to reduce the risks of an emergency situation (cooperation between Ukrzaliznytsia PJSC and relevant centers that conduct special training on the transportation of dangerous goods, effective interaction of all participants in the «sender-carrier-recipient» system, as well as perfect control over compliance with the rules. Development of proposals for improving the procedure of interaction between the relevant units of the «sender-carrier-recipient» system, which can be involved in liquidation measures (Using universal sorption cloth (USC) for localization of spills of dangerous goods, using wagons of models 19- 795 and 19–795–01 for transportation of USC, regeneration and reuse of USC.). **Originality.** Specific recommendations for minimizing the negative consequences of accidents based on a systematic analysis and assessment of the risks of an emergency situation during the transportation of dangerous goods by railway transport were developed. **Practical value.** In the field of security the application of these recommendations will contribute to the reduction of risks in railway transport from the point of view of preventing the occurrence of a situation that would threaten the ecological state of the environment and human life, especially in the conditions of a state of war taking place on the territory of our country, as well as the renewal of material and technical means of liquidation of accident consequences.

Keywords: risk occurrence assessment; analysis of causes and consequences; Ishikawa diagram; key event tree; environmental technologies; dangerous goods; localization of accidents; elimination of accidents; universal sorption cloth

REFERENCES

1. Buts, Y. V., Kraynyuk, E. V., Kozodoy, D. S., & Barbashin, V. V. (2018). Evaluation of emergency events at the transportation of dangerous goods in the context of the technogenic load in regions. *Science and Transport Progress*, 3(75), 27-35. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/134347> (in Ukrainian)
2. Zelenko, J., & Kalimbet, M. (2021). Production of the sorption sheet from composite materials as a liquidation agent for spill response of hazardous materials on transport. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 1(38), 24-35. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-24-3> (in Ukrainian)
3. Zelenko, Y., & Kalimbet, N. (2022). Improving a method for eliminating the spill of hazardous substances by using «Universal Absorbent Cloth». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(118)), 30-37. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263583> (in Ukrainian)
4. *Kombinovani vahony modelei 19-795 ta 19-795-01*. Retrieved from <https://cutt.ly/1NAm048> (in Ukrainian)
5. Samsonkin, V. M., Nikolaienko, I. V., Bulhakova, Yu. V., Vernyhora, R. V., Hnennyi, O. M., Horobets, V. L., ... & Yurchenko, O. (2021). *Inzhynirynh kryz ta ryzykiv transportnykh posluh: kolektyvna monohrafiia*. Kyiv: Talkom. (in Ukrainian)
6. Soroka, M., & Yaryshkina, L. (2012). Technology for the oil spills clean-up which provides preliminary accumulation of sorbents into the area of emergence and localization oil spills. *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 42, 45-55. DOI: <http://stp.diit.edu.ua/article/view/9275/8035> (in Russian)
7. *Tkan filtrovalnaya TGF-8 (56035)*. Retrieved from <https://cutt.ly/JNAvCRK> (in Russian)
8. Borghetti, F., & Malavasi, G. (2016). Road accessibility model to the rail network in emergency conditions. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 237-254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.10.001> (in English)
9. Conca, A., Ridella, C., & Saponi, E. (2016). A Risk Assessment for Road Transportation of Dangerous Goods: A Routing Solution. *Transportation Research Procedia*, 14, 2890-2899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.407> (in English)
10. Drzewieniecka, B., & Nowak, M. (2018). Safety Aspect in Carriage of Dangerous Goods by Railway Transport. *New Trends in Production Engineering*, 1(1), 35-41. DOI: <https://doi.org/10.2478/ntpe-2018-0004> (in English)
11. Šolc, M., & Hovanec, M. (2015). The Importance of Dangerous Goods Transport by Rail. *Naše More*, 62(3), 181-186. DOI: <https://doi.org/10.17818/nm/2015/si17> (in English)
12. Szaciłło, L., Jacyna, M., Szczepański, E., & Izdebski, M. (2021). Risk assessment for rail freight transport operations. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 23(3), 476-488. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.3.8> (in English)
13. Panchenko, S., Lavrukhin, O., & Shapatina, O. (2017). Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(85)), 39-45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92203> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.02.2022

Прийнята до друку: 20.06.2022

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.132-049.7

В. О. ХАВРУК^{1*}

^{1*}Каф. «Технічна експлуатація автомобілів та автосервіс», Національний транспортний університет, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (095) 018 71 90, ел. пошта khavruk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4686-4109

Оцінка резервів підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортного підприємства

Мета. У роботі передбачено розглянути та проаналізувати складові цільової функції зменшення витрат на експлуатацію й обслуговування автотранспортних засобів (автобусів), а також визначити оптимальну періодичність планових ремонтів. **Методика.** Дослідження виконано з використанням таких загальнонаукових методів: аналіз і синтез, абстрагування й конкретизація, індукція й дедукція, системний аналіз. **Результати.** Для оцінки резервів підвищення ефективності рухомого складу наведено цільову функцію мінімізації витрат (втрат) під час експлуатації автотранспортних засобів на прикладі автобусів, яка містить дві укрупнені складові витрати – на планові заходи після технічного обслуговування й ресурси на ліквідацію наслідків позапланових ремонтів, включаючи збитки викликані ними. Наведено експоненціальні залежності кількості позапланових ремонтів за календарний рік експлуатації автотранспортних засобів, отриманої в результаті обробки масиву статистичних даних по підприємству. З'ясовано, що одним із напрямів підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортного підприємства є зменшення простоїв через поточні позапланові ремонти, для цього запропоновано виконувати планові ремонти кожної одиниці автотранспорту. Для конкретного автотранспортного підприємства наведено графічну залежність кількості позапланових ремонтів від величини автобусів їх міжремонтного пробігу. Виконано розрахунки складових цільової функції підвищення ефективності використання автобусів, графічним способом визначено оптимальний міжремонтний пробіг для проведення планових ремонтів протягом календарного року. Обґрунтовано економічну складову підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортного підприємства – недоотримання доходу від невиконаної транспортної роботи, яка характеризується середньою завантаженістю автотранспортних засобів. На прикладі автобусів встановлено, що середня завантаженість прямо пропорційна чисельності перевезених пасажирів і обернено пропорційна величині пробігу по маршруту. **Наукова новизна.** ґрунтовно проаналізовано складові цільової функції мінімізації сумарних витрат на планові заходи після технічних обслуговувань і на ресурси позапланових ремонтів, що містять і втрати (збитки) від простою. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані автотранспортними підприємствами для визначення оптимальних міжремонтних пробігів. Виконання планових ремонтів кожного автотранспортного засобу дасть змогу зменшити втрати від простою і підвищити ефективність його використання в цілому.

Ключові слова: автобус; автотранспортне підприємство; автотранспортний засіб; міжремонтний пробіг; ремонт; технічне обслуговування

Вступ

Ефективність використання автотранспортних засобів (АТЗ) характеризується обсягами виконаної транспортної роботи, а для цього необхідно підвищувати технічну готовність рухомого складу – своєчасно виконувати всі передбачені регламентні технічні обслуговування

(ТО) й ремонти. Але практика технічної експлуатації АТЗ свідчить, що існують істотні коливання значень їх основних техніко-експлуатаційних характеристик і кількості позапланових ремонтів в автотранспортних підприємствах (АТП).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Оскільки умови експлуатації кожного конкретного АТЗ не відповідають умовам, узятим як середні по автотранспортному підприємству, а також зважаючи на постійну зміну умов експлуатації, виникає необхідність своєчасного коригування розрахованих значень пробігів до планових технічних обслуговувань або ремонтів. А тому, наявна стратегія й програма ТО й ремонту автотранспорту, яка базується на планово-запобіжних заходах, потребує вдосконалень щодо індивідуалізації контролю експлуатаційних характеристик АТЗ.

Урахування умов експлуатації під час планування ремонту АТЗ й оптимізації міжремонтного пробігу розглядали у своїх роботах: Ф. М. Авдонькін, І. М. Арінін, М. М. Болбас, А. П. Болдін, В. А. Бондаренко, В. П. Воронов, І. Б. Гурвіч, І. Є. Дюмін, О. П. Дунаєв, М. С. Захаров, Б. С. Клейнер, Є. С. Кузнецов, Б. Д. Прудовський, Л. Г. Рєзнік, А. М. Сергєєв, Р. Х. Хасанов.

Недоліком зазначених робіт є те, що основна їхня частина присвячена розрахункам оптимального пробігу АТЗ між ремонтами або оптимізації циклічності проведення тих чи інших видів робіт (ТО, ремонтів), при цьому під оптимізацією розуміють коригувальний розрахунок пробігу з урахуванням місцевих умов експлуатації, тоді як самі ці умови беруть детермінованими й постійними величинами. Більш точні розрахунки не здійснювали через відсутність технічних засобів і складність методів урахування цих факторів.

Дослідження проблеми підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортних підприємств проводить у таких основних напрямках:

- 1) визначення строків раціонального використання рухомого складу [1];
- 2) аналіз та оптимізація маршрутів виконання транспортної роботи [2];
- 3) аналіз економічних показників розвитку АТП, основними з яких є ефективність і рентабельність, при цьому собівартість транспортних послуг розглядають на основі витрат за статтями калькуляції [3–5];
- 4) оцінка й вибір оптимального рухомого складу [6];
- 5) пошук шляхів зменшення витрат на експлуатаційні матеріали й запасні частини [7, 8];

6) аналіз вимог споживачів до автотранспортних послуг [9];

7) застосування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій [10].

Мета

У роботі передбачено розглянути та проаналізувати складові цільової функції зменшення витрат на експлуатацію й обслуговування АТЗ (автобусів), а також визначити оптимальну періодичність планових ремонтів.

Методика

Зменшенню або збільшенню коефіцієнта відмов автобусів, значення якого розраховують на основі функціонування моделі впливу експлуатаційних характеристик на статистику відмов рухомого складу, відповідає зміщення середнього напрацювання на відмову $L_{\text{сер}}$ на деяке значення $\Delta L_{\text{сер}}$. Контроль величини коефіцієнта відмов кожного окремого АТЗ дозволить коригувати міжремонтний пробіг індивідуально для нього. Такий підхід дозволяє сформулювати цільову функцію підвищення ефективності використання АТЗ автотранспортного підприємства й отримати скориговане значення періоду обслуговування L_P :

$$[3_{\text{ПР}} + R] \rightarrow \text{MIN}, \quad (1)$$

де $3_{\text{ПР}}$ – витрати на планові заходи після технічного обслуговування АТЗ; R – ресурси, що задіяні на ліквідацію наслідків позапланових ремонтів, включаючи збитки, які викликані ними.

Кількість позапланових ремонтів, яка припадає на один цикл проведення відновлювальних операцій обсягом ПР–1 ($N_{\text{ПР}}$), є функцією від умов експлуатації й міжремонтного пробігу (L_P). Відомо, що збільшення L_P призведе до збільшення $3_{\text{ПР}}$ і зменшення R .

Витрати на утримання й експлуатацію АТЗ містять витрати на виконання планових видів ремонту і виконання обслуговування в обсягах ТО–1, ТО–2, ТО–3. Середню вартість планових ремонтів визначають зведенням сумарних витрат на виконання всіх видів ремонту до наведеної за період ПР–1:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\begin{aligned}
Z_{\Pi} = & \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{ТО-1}}} \cdot Z_{\text{ТО-1}} + \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{ТО-2}}} \cdot Z_{\text{ТО-2}} + \\
& + \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{ТО-3}}} \cdot Z_{\text{ТО-3}} + \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{ПР-1}}} \cdot Z_{\text{ПР-1}} + \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{ПР-2}}} \cdot Z_{\text{ПР-2}} + \\
& + \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{ПР-3}}} \cdot Z_{\text{ПР-3}} + \frac{L_{\text{заг}}}{L_{\text{СР}}} \cdot Z_{\text{СР}}, \quad (2)
\end{aligned}$$

де Z_{Π} – загальні витрати на проведенні планових заходів із відновлення ресурсу АТЗ; $L_{\text{заг}}$ – загальний пробіг АТЗ за увесь період експлуатації; $L_{\text{ТО-1}}, L_{\text{ТО-2}}, L_{\text{ТО-3}}, L_{\text{ПР-1}}, L_{\text{ПР-2}}, L_{\text{ПР-3}}, L_{\text{СР}}$ – пробіг між відповідними видами відновлювальних робіт; $Z_{\text{ТО-1}}$ – витрати на проведення робіт, регламентованих нормами на ТО-1; $Z_{\text{ТО-2}}, Z_{\text{ТО-3}}, Z_{\text{ПР-1}}, Z_{\text{ПР-2}}, Z_{\text{ПР-3}}, Z_{\text{СР}}$ – додаткові витрати на відповідні види відновлювальних робіт.

Для розрахунку значення Z_{Π} за рік використовуємо формулу:

$$\begin{aligned}
Z_{\Pi} = & N_{\text{ТО-1}} \cdot Z_{\text{ТО-1}} + N_{\text{ТО-2}} \cdot Z_{\text{ТО-2}} + \\
& + N_{\text{ТО-3}} \cdot Z_{\text{ТО-3}} + N_{\text{ПР-1}} \cdot Z_{\text{ПР-1}} + \\
& + N_{\text{ПР-2}} \cdot Z_{\text{ПР-2}} + N_{\text{ПР-3}} \cdot Z_{\text{ПР-3}} + N_{\text{СР}} \cdot Z_{\text{СР}}, \quad (3)
\end{aligned}$$

де $N_{\text{ТО-1}}, N_{\text{ТО-2}}, N_{\text{ТО-3}}, N_{\text{ПР-1}}, N_{\text{ПР-2}}, N_{\text{ПР-3}}, N_{\text{СР}}$ – кількість виконаних відповідних видів відновлювальних робіт.

Узявши вартість планового ремонту як витрати, які припадають на опорний пробіг L_P , запишемо:

$$Z_{\Pi} = \frac{Z_{\Pi}}{L_{\text{заг}}} \cdot L_P, \quad (4)$$

де L_P – опорний пробіг, узятий рівним 60 тис. км, що відповідає значенню пробігу АТЗ до ПР-1.

Виразимо витрати на усунення наслідків відмов АТЗ, спираючись на формулу для розрахунку сумарних витрат на відновлення ресурсу АТЗ, як:

$$R = Z_{\Sigma\text{НР}} + Z_{\Sigma\text{Е}} + Z_{\Sigma\text{БР}}, \quad (5)$$

де $Z_{\Sigma\text{НР}}$ – витрати на виконання позапланових ремонтів; $Z_{\Sigma\text{Е}}$ – втрати від затримки руху автобусів; $Z_{\Sigma\text{БР}}$ – збитки, пов'язані з порушенням безпеки руху.

Витрати на усунення позапланових ремонтів можна представити у вигляді формули:

$$Z_{\Sigma\text{НР}} = N_{\text{НР}} \cdot (Z_{\text{НР}} + T_{\text{НР}} \cdot S), \quad (6)$$

де $N_{\text{НР}}$ – кількість позапланових ремонтів за розглянутий період; $Z_{\text{НР}}$ – середня величина витрат, пов'язаних із виконанням позапланових ремонтів; $T_{\text{НР}}$ – середній час незадіяного АТЗ в основній діяльності автопарку; S – величина втрат унаслідок незадіяних АТЗ в основній діяльності автопарку.

Величини, що входять до формули (6), можна виразити, спираючись на графік станів АТЗ. Величину S можна оцінити як неотриманий дохід, для автобусів – це дохід від перевезення пасажирів. Середню кількість пасажирів, яку перевозить один АТЗ, фіксуємо у вигляді середньої завантаженості $H_{\text{АТЗ}}$. Враховуючи, що $(Ml)_{\text{ПАС}} = Nl \cdot m_{\text{пас.сер.}}$, $Al = A \cdot l_{\text{СЕР.ПАС}}$, запишемо:

$$H_{\text{АТЗ}} = \frac{A \cdot l_{\text{СЕР.ПАС}}}{Nl \cdot m_{\text{пас.сер.}}}, \quad (7)$$

де A – загальний обсяг перевезених пасажирів; $l_{\text{СЕР.ПАС}}$ – середня дальність поїздки пасажирів; Nl – пробіг АТЗ; $m_{\text{пас.сер.}}$ – значення середньої маси пасажирів (беремо 70 кг).

Із формули (7) отримаємо:

$$Nl = \frac{A \cdot l_{\text{СЕР.ПАС}}}{H_{\text{АТЗ}} \cdot m_{\text{пас.сер.}}}. \quad (8)$$

Швидкість на ділянці руху АТЗ розраховуємо як:

$$V_{\text{діл.}} = \frac{Nl}{Nt}, \quad (9)$$

де $V_{\text{діл.}}$ – швидкість на ділянці маршруту; Nt – час перебування автобусів на лінії.

Підставимо значення Nl із формули (8) для визначення чисельності неперевезених пасажирів за час простою АТЗ:

$$A(Nt) = \frac{Nt \cdot V_{\text{діл.}} \cdot H_{\text{АТЗ}} \cdot m_{\text{пас.сер.}}}{l_{\text{СЕР.ПАС}}}, \quad (10)$$

де $A(Nt)$ – функція залежності чисельності неперевезених пасажирів за час Nt .

Позначимо вартість проїзду в автобусі на певному маршруті через $C_{\text{ПР}}$, тоді неотриманий прибуток у результаті простою АТЗ упродовж часу Δt становить:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$E_{\text{д.в.}}(\Delta t) = \frac{C_{\text{ПР}}}{m_{\text{пас.сер.}}} = \frac{C_{\text{ПР}} \cdot \Delta t \cdot V_{\text{д.л.}} \cdot H_{\text{АТЗ}}}{l_{\text{ПАС}}^{\text{ПАС}}}, \quad (11)$$

де $C_{\text{ПР}}$ – вартість проїзду в автобусі на певному маршруті.

Для визначення S виразимо значення $E_{\text{д.в.}}$ упродовж однієї години ($\Delta t = 1$ год) як опорну величину, тоді отримаємо:

$$S = \frac{C_{\text{ПР}} \cdot V_{\text{д.л.}} \cdot H_{\text{АТЗ}}}{l_{\text{ПАС}}^{\text{ПАС}}} - E_E \cdot C_E, \quad (12)$$

де E_E – економія витрати палива на рух АТЗ в разі його простою; C_E – вартість палива.

Втрати від затримки руху автобусів:

$$Z_{\Sigma E} = N_{\text{НР}} \cdot T_{\Sigma \text{Д}} \cdot (m_{\text{пас}} \cdot S), \quad (13)$$

де $T_{\Sigma \text{Д}}$ – середній час затримки руху АТЗ на маршруті в результаті відмови АТЗ.

Втрати, пов'язані з порушенням безпеки руху, розраховуємо за формулою:

$$Z_{\Sigma \text{БД}} = p_{\text{БД}} \cdot Z_{\text{БД}}, \quad (14)$$

де $p_{\text{БД}}$ – ймовірність порушення безпеки руху внаслідок відмови автобуса автопарку; $Z_{\text{БД}}$ – витрати, пов'язані з ліквідацією наслідків порушення правил безпечного руху.

Визначимо $p_{\text{БД}}$ як відношення кількості серйозних інцидентів до загальної кількості позапланових ремонтів:

$$p_{\text{БД}} = \frac{n_{\text{ін}}}{N_{\text{НР}}}, \quad (15)$$

де $n_{\text{ін}}$ – кількість серйозних інцидентів.

Підставивши у формулу (1) отримані формули (2)–(15), в остаточному вигляді можемо отримати цільову функцію зменшення витрат на експлуатацію й обслуговування АТЗ (автобусів):

$$\left(\frac{Z_{\text{П}}}{L_{\text{заг}}} \cdot L_{\text{П}} \right) + \left[N_{\text{НР}} \cdot (Z_{\text{НР}} + T_{\text{НР}} \cdot \frac{C_{\text{ПР}} \cdot V_{\text{д.л.}} \cdot H_{\text{АТЗ}}}{l_{\text{ПАС}}^{\text{ПАС}}}) + \right. \\ \left. + \left(N_{\text{НР}} \cdot T_{\Sigma \text{Д}} \cdot \left(m_{\text{пас.сер.}} \cdot \left(\frac{C_{\text{ПР}} \cdot V_{\text{д.л.}} \cdot H_{\text{АТЗ}}}{l_{\text{ПАС}}^{\text{ПАС}}} \right) \right) \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{n_{\text{ін}}}{N_{\text{НР}}} \cdot Z_{\text{БД}} \right) \right] \rightarrow \text{MIN}. \quad (16)$$

Використання функції у вигляді (16) дозволяє за зафіксованими умовами експлуатації (експлуатаційними характеристиками), розрахувати оптимальний період ремонту (ПР–1) для кожного окремого АТЗ автопарку. Підставивши у формулу (16) середні значення експлуатаційних характеристик усього парку автотранспортних засобів упродовж року, отримаємо оцінку середнього значення його оптимального міжремонтного пробігу. Це дозволяє оцінити економічну ефективність запропонованого удосконалення на будь-який період із відомими значеннями експлуатаційних характеристик.

Оцінку ефективності впровадження розроблених методів контролю експлуатаційних характеристик АТЗ можна отримати, якщо припустити постійність експлуатаційних характеристик для усіх автобусів АТП і, відповідно, однакове значення параметрів розподілу ймовірності їх відмови. Необхідно зауважити, що оскільки на практиці експлуатаційні характеристики АТЗ відрізняються, реальний ефект від контролю фактичного навантаження на автобуси буде більший за розрахунковий.

Результати

Аналіз причин позапланових заходів в АТП–14630 (м. Львів) показує, що за 2021 рік значення $T_{\Sigma \text{Д}} \approx 0,11$ год, а $T_{\text{НВ}} \approx 2$ год, але оскільки в разі відмови АТЗ з лінії знімають, то $T_{\text{НВ}} \approx 0,11 \cdot m_{\text{пас.сер.}}$. Значення $C_{\text{ПЕР}}$ становить 26 грн. Візьмемо, що для усіх автобусів, згідно з даними, які фіксують на основі спостережень, $V_{\text{д.л.}} = 21,4$ км/год; $H_{\text{АТЗ}} = 68,97$ люд.; $l_{\text{ПАС}}^{\text{ПАС}} = 5,67$ км.

Для оцінки можливості підвищення ефективності використання АТЗ розрахуємо оптимальне значення $L_{\text{П}}$, за якого загальні витрати будуть мінімальні $[Z_{\text{ПР}} + R] \rightarrow \text{MIN}$. Для розв'язання задачі графічним способом розрахуємо значення витрат за різних значень міжремонтного пробігу $L_{\text{П}}$ (табл. 1).

Умовну кількість виконаних планових ремонтів визначаємо за формулою:

$$N_{\text{ПР}} = \frac{L_{\text{заг}}^{2021}}{L_{\text{П}}}, \quad (17)$$

де $L_{\text{П}}$ – міжремонтний пробіг; $L_{\text{заг}}^{2021}$ – загальний пробіг рухомого складу за 2021 рік.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Значення кількості позапланових ремонтів за розглянутий період ($N_{\text{НР}}$) обчислено з використанням рівнянь для функцій розподілу випадкових (18) і поступових (19) відмов АТЗ, які було додатково отримано на основі обробки статистичних даних (звітів щодо виконання непланових ремонтів АТЗ):

$$\omega_g(l) = -9,9774 + e^{(3,76238 - 0,02887 \cdot l)} \quad (18)$$

$$\omega_n(l) = -32,464 + e^{(3,32326 + 0,014379 \cdot l)} \quad (19)$$

Графічна залежність кількості позапланових ремонтів АТЗ від міжремонтних пробігів представлені на рис. 1.

Таблиця 1

Витрати на експлуатацію АТЗ за 2021 р. (тис. грн)

Table 1

Expenditures for the operation of motor vehicles for 2021 (thousand UAH)

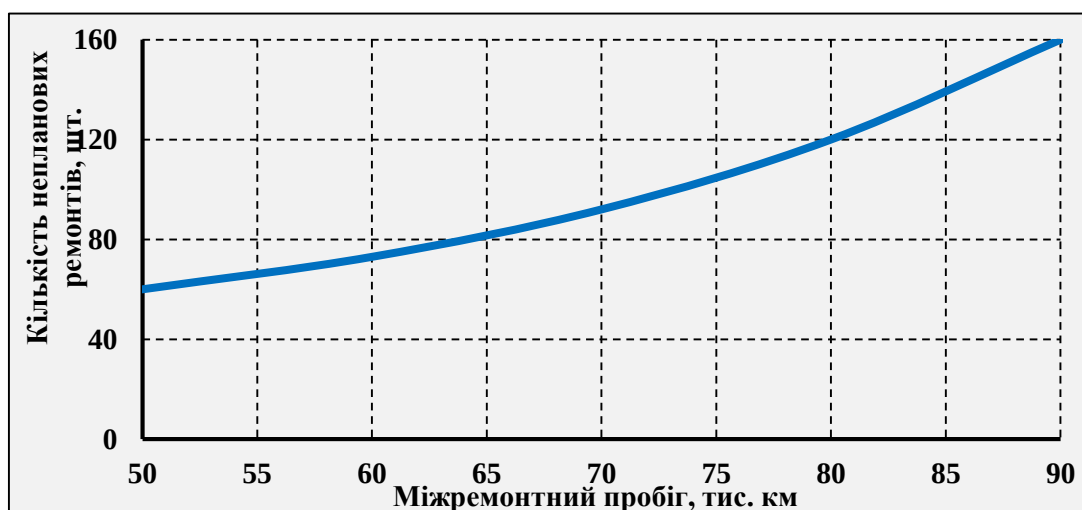
Показник	Пробіг автотранспортних засобів (L_P), тис. км							
	50	60	65	70	75	80	85	90
$N_{\text{ПР}}$	627,5	522,9	482,7	448,2	418,3	392,2	369,1	348,6
$N_{\text{НР}}$	54,0	73,0	84,0	94,0	108,0	122,0	140,0	157,0
$З_{\text{П}}$	1 202,5	835,4	694,2	573,2	468,3	376,5	295,6	223,6
R	328,6	444,2	511,1	572,0	657,2	742,4	851,9	955,4
$З_{\text{П}} + R$	1 531,1	1 279,6	1 205,3	1 145,2	1 125,5	1 118,9	1 147,5	1 179,0

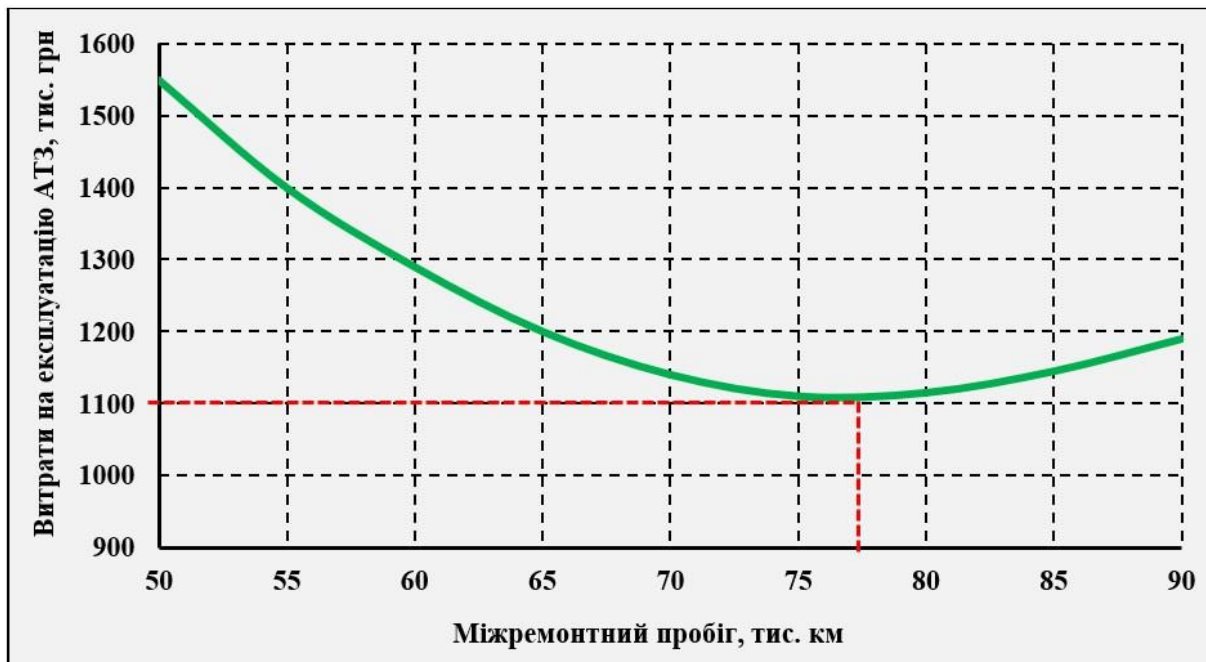
Величину $З_{\text{П}}$ можна знайти за формулою:

$$З_{\text{П}} = З_{\text{ПР}} \cdot \frac{L_{\text{зар}}}{L_P} \quad (20)$$

Величину ресурсів, які витрачають на ліквідацію наслідків позапланових заходів у цехах автопарку R , знаходимо з формули (5).

Різниця витрат, отриманих за (17) і (20), становить $L_P = 60\,000$ км за оптимального значення L_P і дає можливість оцінити розміри невикористаної економії ресурсів. Аналіз результатів розрахунків показує, що мінімальне значення витрат $[З_{\text{ПР}} + R]$ станом на 2021 рік буде в разі значення $L_P = 77\,500$ км (рис. 2). Невикористана економія при експлуатації всього парку АТЗ становитиме 83 400 грн на рік.

Рис. 1. Залежність кількості непланових ремонтів ($N_{\text{НР}}$) від міжремонтного пробігу (L_P)Fig. 1. Dependence of the number of unplanned repairs (N_{NR}) on the interval between repairs (L_P)

Рис. 2. Залежність загальних витрат на обслуговування АТЗ від міжремонтного пробігу (L_p)Fig. 2. Dependence of the total costs for the maintenance of motor vehicles on the mileage between repairs (L_p)

Наукова новизна та практична значимість

З'ясовано цільову функцію підвищення ефективності використання АТЗ в АТП, яка відображає мінімум сумарних витрат на планові заходи після ТО і на ресурси позапланових ремонтів, включаючи і втрати (збитки) від простою.

На основі наведених формул встановлено, що:

1) витрати на планові заходи технічного обслуговування АТЗ – зведений показник, який залежить від співвідношення опорного й загального пробігів;

2) витрати на усунення наслідків відмов АТЗ – комплексний показник, який, крім витрат на виконання позапланових ремонтів, також містить інші складові – втрати від затримки руху автобусів і збитки, пов'язані з порушенням безпеки руху (формула 6);

3) витрати на усунення позапланових ремонтів, крім технічної складової – їх вартості, містить економічну складову – втрати від простою АТЗ (недоотримання коштів від невиконаної транспортної роботи);

4) середня завантаженість АТЗ на прикладі автобусів прямо пропорційна чисельності пере-

везених пасажирів і обернено пропорційна пробігу АТЗ;

5) величина втрат, що полягає в недоотриманні доходу від непереверезених пасажирів за час простою АТЗ, прямо пропорційна чисельності непереверезених пасажирів і швидкості на ділянці руху.

Втрати, пов'язані з порушенням безпеки дорожнього руху, запропоновано визначати з використанням показника ймовірності порушення безпеки руху внаслідок відмови автобуса конкретного АТП. У свою чергу ймовірність порушення безпеки руху можна визначити як відношення серйозних інцидентів до загальної кількості позапланових ремонтів (формула 15). Серйозність інцидентів – наслідків дорожньо-транспортних пригод – встановлюють безпосередньо дорожня поліція і страхові компанії.

З'ясовано, що величина втрат унаслідок незадіяних АТЗ (автобуси) в основній діяльності АТП залежить від співвідношення вартості проїзду в автобусі й рівня цін на паливно-мастильні матеріали.

Для АТП–14630 (м. Львів) на основі статистичних даних за 2021 р. побудовано залежність кількості позапланових ремонтів від пробігу (рис. 1). Графічним методом визначено, що мінімальні сумарні річні витрати (1,1 млн грн) на

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

експлуатацію наявного парку АТЗ будуть досягнуті в разі виконання планових ремонтів через кожні $L_P = 77\,500$ км (рис. 2). Але необхідно вказати, що це значення міжремонтного пробігу актуальне для статистичних даних роботи АТП протягом 2021 року.

Висновки

Таким чином для АТП, наприклад, автобусного, доцільно застосовувати планово-попереджувальну систему ремонтів (ППСР), що зумовлено збільшенням кількості випадкових поломок протягом міжремонтних пробігів (рис. 1). ППСР, крім регламентних ТО, також передбачає проведення запланованих ремонтів. При цьому основна проблема – це визначення періодичності планових ремонтів, адже необхідно знайти таку оптимальну періодичність за якої простої АТЗ не будуть знижувати ефекти-

вність їх використання й отримання доходу від транспортної роботи.

Оцінку резервів підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортного підприємства можна здійснювати на основі розрахунків усіх складових представленої цільової функції (формула 16), за якою знаходять мінімальне значення загальних експлуатаційних річних витрат парку АТЗ. Для виконання всіх наведених вище розрахунків необхідно впроваджувати контроль експлуатаційних характеристик АТЗ (наприклад, GPS-трекери), що дає можливість передбачати кількість позапланових ремонтів у вигляді значення очікуваної статистики відмов АТЗ. Постійний контроль величини дозволяє коригувати терміни планових ремонтів для кожного АТЗ відповідно до його експлуатаційних характеристик.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буряк П. Д., Пархомчук О. В., Буряк Є. П. Удосконалення системи ремонту автомобільної техніки національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2021. Т. 1, № 37. С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2021/1/37/237843>
2. Вовк Ю. Я., Вовк І. П. *Основи теорії транспортних процесів і систем* : навчальний посібник (курс лекцій). Тернопіль : Тернопільський національний технічний ун-т ім. Івана Пулюя, 2021. 104 с.
3. Дмитрієв І. А., Іванілов О. С., Шевченко І. Ю., Кирчата І. М. *Економіка підприємств автомобільного транспорту* : навч. посібник. Харків : ФОП Бровін О. В., 2018. 308 с.
4. Дмитрієв І. А., Левченко Я. С. *Транспортне підприємництво* : навч. посібник. Харків : ФОП Бровін О. В., 2018. 308 с.
5. Ляшук О. Л., Плекан У. М., Цьонь О. П., Пиндус Т. Б. Планування діяльності автотранспортного підприємства. Методичні аспекти. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки»*. 2022. № 5 (36), Ч. 1. С. 256–262. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.256-262](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.256-262)
6. Хаврук В. О., Пархоменко О. О. Критерії оцінки й вибору рухомого складу АТП. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 2 (92). С. 17–28. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/235411>
7. Fázecas L., Avedissian, N., Ghiro R., Sonoda T. Improving Fuel Efficiency for Trucks Through CFD Simulation. *SAE Technical Paper Series*. 2020. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-36-0410>
8. Chen N., Ou L., Bai F. Research on Calculating Method of Repairable Spare Parts and Non-repairable Spare Parts. *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics*. 2019. Vol. 588. P. 136–140. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9437-0_16
9. Linh L. M., Quoc Nghi N., & Anh Tuan D. H. Factors Affecting Customer Satisfaction with the Bus Service Quality of Phan Thiet Automobile Transport Cooperative. *International Journal of Research and Review*. 2021. Vol. 8. Iss. 10. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.52403/ijrr.20211027>
10. Salamadija V., Gladović P. Model of Information Integration of Management in Road Transport Companies. *JOURNAL OF TRAFFIC AND TRANSPORT THEORY AND PRACTICE*. 2019. Iss. 4 (1–2). P. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.7251/JTTTP1901010S>

V. O. KHAVRUK^{1*}

^{1*}Dep. «Motor Vehicle Maintenance and Service», National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (095) 018 71 90, e-mail khavruk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4686-4109

Evaluation of Reserves for Improving the Efficiency of Using Rolling Stock of a Motor Transport Enterprise

Purpose. The work is aimed to analyze the components of the target function of reducing costs for the operation and maintenance of motor vehicles (buses) and determine the optimal periodicity of planned repairs. **Methodology.** The research was carried out using general scientific methods: analysis and synthesis, abstraction and concretization, induction and deduction, system analysis. **Findings.** In order to estimate reserves for improving the efficiency of rolling stock, the target function of minimizing costs (losses) during the operation of motor vehicles using the example of buses is given, which includes two aggregated component costs for planned activities after maintenance of motor vehicles and resources used to eliminate the consequences of unplanned repairs, including losses caused by them. Exponential dependencies of the number of unplanned repairs per calendar year of operation of motor vehicles obtained as a result of processing an array of statistical data on the enterprise are presented. It was found that one of the ways to improve the efficiency of the rolling stock of the motor vehicle enterprise is to reduce downtime due to current unplanned repairs. For this purpose, it is proposed to carry out planned repairs of each moving unit of motor vehicles. The graphical dependence of the number of unscheduled repairs on the amount of bus mileage between repairs is shown for a specific motor vehicle enterprise. Calculations of the components of the target function of increasing the use efficiency of buses were performed, and the optimal inter-repair mileage for carrying out planned repairs during the calendar year was determined graphically. The economic component of increasing the efficiency of use of the rolling stock of the automobile enterprise is substantiated – the lack of income from unfulfilled transport work, which is characterized by the average load of motor vehicles. Using the example of buses, it was found that the average load is directly proportional to the number of transported passengers and inversely proportional to the mileage along the route. **Originality.** All components of the target function of minimizing the total costs of planned activities after technical maintenance and resources of unplanned repairs, including losses (damages) from downtime, are thoroughly considered. **Practical value.** The results of the performed research can be used by motor transport companies to determine the optimal intervals between repairs. Carrying out planned repairs of each motor vehicle will make it possible to reduce losses from idle time and increase the use efficiency of rolling stock as a whole.

Keywords: bus; motor vehicle enterprise; motor vehicle; mileage between repairs; repair; maintenance

REFERENCES

1. Buryak, P., Parkhomchuk, & Buryak, Ye. (2021). Improvement of the Repair System of Automotive Vehicles of the National Guard of Ukraine. *The Collection of Scientific Works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*, 1(37), 52-59. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2021/1/37/237843> (in Ukrainian)
2. Vovk, Ju. Ja., & Vovk, I. P. (2021). *Osnovy teorii transportnykh procesiv i system: navchalnyj posibnyk (kurs lekcij)*. Ternopil: Ternopil'skyj nacionalnyj tekhnichnyj universytet im. Ivana Puljuja. (in Ukrainian)
3. Dmytrijev, I. A., Ivanilov, O. S., Shevchenko, I. Ju., & Kyrchata, I. M. (2018). *Ekonomika pidpryjemstv avtomobilnogho transportu: navchalnyj posibnyk*. Kharkiv: FOP Brovin O. V. (in Ukrainian)
4. Dmytrijev, I. A., & Levchenko, Ja. S. *Transportne pidpryjemnytvo: navchalnyj posibnyk*. Kharkiv: FOP Brovin O. V. (in Ukrainian)
5. Lyashuk, O., Plekan, U., Tson, O., & Pyndus, T. (2022). Planning the Activities of the Motor Transport Enterprise. Methodological Aspects. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 5((36)1), 256-262. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.5\(36\).1.256-262](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2022.5(36).1.256-262) (in Ukrainian)
6. Havruk, V. O., & Parkhomenko, O. O. (2021). Criteria for Selection and Evaluation of Rolling Stock of Motor Transport Enterprises. *Science and Transport Progress*, 2(92), 17-28. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/235411> (in Ukrainian)
7. Fázecas, L., Avedissian, N., Ghironi, R., & Sonoda, T. (2021). Improving Fuel Efficiency for Trucks Through CFD Simulation. *SAE Technical Paper Series*, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-36-0410> (in English)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Chen, N., Ou, L., & Bai, F. (2019). Research on Calculating Method of Repairable Spare Parts and Non-repairable Spare Parts. In *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics* (Vol. 588, pp. 136-140). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9437-0_16 (in English)
9. Linh, L. M., Quoc Nghi, N., & Anh Tuan, D. H. (2021). Factors Affecting Customer Satisfaction with the Bus Service Quality of Phan Thiet Automobile Transport Cooperative. *International Journal of Research and Review*, 8(10), 213-217. DOI: <https://doi.org/10.52403/ijrr.20211027> (in English)
10. Salamadija, V., & Gladović, P. (2019). Model of Information Integration of Management in Road Transport Companies. *JOURNAL OF TRAFFIC AND TRANSPORT THEORY AND PRACTICE*, 4(1-2), 10-15. DOI: <https://doi.org/10.7251/JTTTP1901010S> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.02.2022

Прийнята до друку: 14.06.2022

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.423:[621.33:622.683]

Є. С. РЯБОВ^{1*}, Л. Ю. КОНДРАТЬЄВА², Л. В. ОВЕР'ЯНОВА³, Б. Х. ЄРЦЯН⁴,
С. О. ГУЛАК⁵

^{1*}Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта kondratieva.lilia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2788-9116

³Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта overanova@ukr.net, ORCID 0000-0002-4827-572X

⁴Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта bagish_ericjan@ukr.net, ORCID 0000-0003-0579-3882

⁵Каф. «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (096) 563 12 53, ел. пошта sgoolak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2294-5676

Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту

Мета. Ця робота спрямована на обґрунтування структури та визначення основних параметрів тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту з урахуванням режимів його роботи. **Методика.** Дослідження виконано шляхом математичного моделювання, яке передбачало розв'язання тягової задачі та оцінку параметрів процесів енергетичного обміну між компонентами тягового електропривода. Моделювання проведено для руху поїзда по ділянці шляху та під час маневрування, що істотно відрізняється за їх математичного опису. Під час моделювання руху по ділянці шляху розв'язано тягову задачу з використанням рекомендацій щодо тягових розрахунків для поїзної роботи. Для моделювання переміщень під час маневрування розроблено спрощену модель. Визначення параметрів компонент тягового електропривода проведено шляхом аналізу процесів енергетичного обміну в тяговому електроприводі на основі балансу потужності. У ході досліджень узято, що бортовий накопичувач енергії в режимі тяги живить тягові електродвигуни бустерної секції. У режимі електродинамічного гальмування накопичувач енергії запасав енергію від усіх тягових електродвигунів електровоза. **Результати.** Автори отримали часові залежності параметрів, які характеризують рух поїзда на всіх етапах циклу «порожній напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження» (на прикладі електровоза ПрАТ «Полтавський ГЗК»). Аналіз отриманих залежностей дозволив визначити параметри основних компонент тягового електропривода для запропонованого сценарію роботи накопичувача. Установлено, що енергоємність накопичувача енергії має становити 250 кВт·год для одного циклу руху. Потужність накопичувача енергії – 6 000 кВт. **Наукова новизна.** Автори цієї роботи вперше запропонували структуру тягового електропривода електровоза для кар'єрного залізничного транспорту, у якому живлення електродвигунів електровоза керування здійснюється від контактної мережі, а електродвигуни бустерної секції живляться від накопичувача енергії й починають працювати за навантаження, яке перевищує 50 % від номінального. **Практична значимість.** Розроблені математичні моделі руху та процесів енергетичного обміну можуть бути застосовані для дослідження тягових електроприводів транспортних засобів різного призначення.

Ключові слова: кар'єрний залізничний транспорт; електровоз; тяговий електропривід; накопичувач енергії; тягова задача

Вступ

В Україні на відкритих гірських розробках корисних копалин широко застосовують електрифікований залізничний транспорт [1]. Його перевагами є низькі експлуатаційні витрати та незначна шкода навколишньому середовищу. Проте зростання вартості енергоносіїв та вимог щодо зниження викидів CO₂ спонукає до подальшого вдосконалення електричної тяги. З урахуванням зношеності наявного рухомого складу, який експлуатують на гірничо-видобувних підприємствах, доцільним є його оновлення.

У [3] визначено основні технічні параметри електровоза з асинхронним тяговим електроприводом для залізничного кар'єрного транспорту (на прикладі електровоза для ПрАТ «Полтавський ГЗК»). Найпоширенішими режимами роботи такого електровоза є режими з частковим навантаженням. Робота з номінальним навантаженням відбувається тільки під час руху на керівному підйомі, у разі розгону та в режимах електродинамічного гальмування. За такого характеру навантаження багатодвигунного електропривода доцільним є пошук шляхів підвищення його енергетичної ефективності.

Для багатодвигунного асинхронного електропривода електровозів у режимах роботи з частковим навантаженням характерне підвищене споживання енергії [6]. Один зі способів зниження енергоспоживання такого електропривода полягає у відмиканні частини тягових електродвигунів. Його ефективність було підтверджено експериментально [6]. Інший підхід до оптимізації енергоспоживання багатодвигунного електропривода полягає в розподілі навантаження між електродвигунами [15, 17, 18]. Робота [19] присвячена аналізу енергетичних показників багатодвигунного електропривода для визначення можливості його застосування. Варто зазначити, що в цих роботах досліджено колісний електротранспорт, однак методика дослідження може бути розповсюджена і на рейковий рухомий склад.

Для забезпечення оптимальних режимів роботи багатодвигунного електропривода важливою є його структура. У [11] запропоновано нову структуру тягового електропривода рейкового транспортного засобу з бортовою системою накопичення енергії. У [18] розроблено концепцію вантажного локомотива з бортовим

накопичувачем енергії. У [8] розглянуто структуру тягових електроприводів рухомого складу, що перебуває в експлуатації. У [13, 14] досліджено можливість застосування накопичувачів енергії для забезпечення функції «last mile» в магістральному електровозі. Застосування акумуляторного локомотива FLXdrive [9] у складі багатосекційного тепловоза дозволяє знизити споживання палива.

Як свідчать дослідження, застосування у складі тягового електропривода накопичувача енергії сприяє зменшенню енергоспоживання. Застосування бортового накопичувача енергії в електровозі для залізничного кар'єрного транспорту дозволить здійснювати рекуперацію енергії, автономний рух неелектрифікованими ділянками та оптимізувати енергоспоживання [3, 8].

Таким чином, визначення раціональної структури багатодвигунного асинхронного електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту вважаємо необхідним.

Мета

Основна мета статті полягає в обґрунтуванні структури та визначенні основних енергетичних параметрів тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту з урахуванням режимів його роботи.

Методика

У [3] проаналізовано режими роботи електровоза в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК». Установлено, що в тяговому режимі електровоз працює з потужністю не більше 1 500 кВт близько 70 % тривалості напіврейсу під час руху навантаженого поїзда. Під час руху з порожніми вагонами потужність не перевищує 1 000 кВт протягом 80 % тривалості напіврейсу. При цьому номінальна потужність локомотива складає 6 700 кВт. У режимах електродинамічного гальмування під час руху з порожніми вагонами потужність не перевищує 4 500 кВт (67 % від номінальної), а понад 60 % часу роботи в цьому режимі потужність не перевищує 2 500 кВт (37 % від номінальної). Характерним є рух із практично постійною швидкістю, що дорівнює 20 км/год.

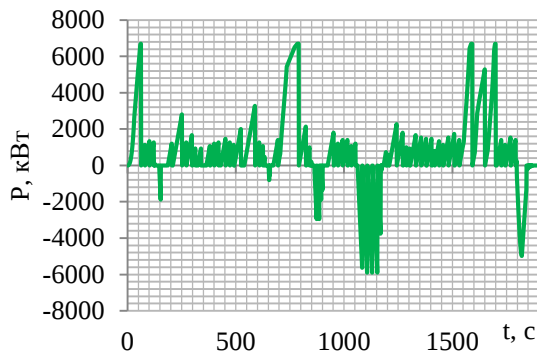
На рис. 1 показана дотична потужність для навантаженого (рис. 1, а) та порожнього

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

(рис. 1, б) напіврейсів [3]. Як бачимо з рисунка 1, переважну частину часу електровоз працює з потужністю менше 50 % від номінальної. Цей факт дозволяє запропонувати структуру тягового електропривода, у якому частина еле-

ктродвигунів живиться від тягової мережі, а частина – від накопичувача енергії. Схема такого електропривода для 16-вісного двосекційного електровоза показана на рис. 2.

a – a



б – б

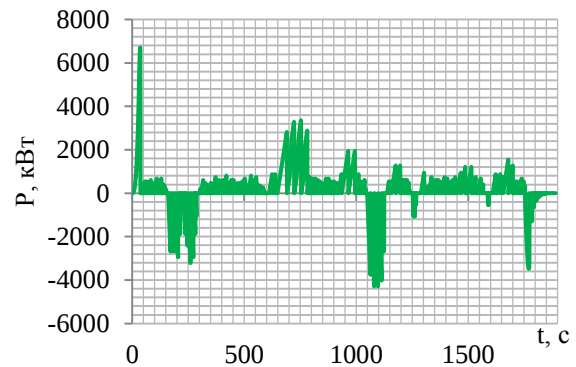


Рис. 1. Залежність дотичної потужності електровоза:

a – для навантаженого напіврейсу; *б* – для порожнього напіврейсу

Fig. 1. Dependence of the tractive power of the electric locomotive:

a – for loaded half-passage; *b* – for empty half-passage

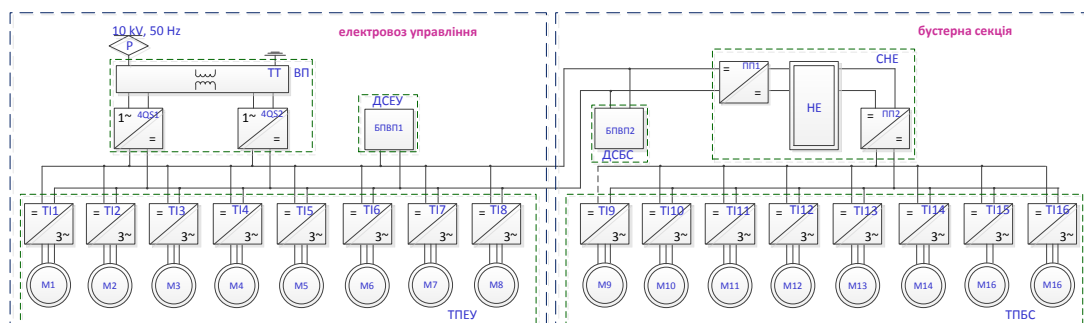


Рис. 2. Схема тягового електропривода електровоза з індивідуальним живленням електродвигунів:

P – струмоприймач; *ТТ* – тяговий трансформатор; *4QS1*, *4QS2* – входні перетворювачі; *ТТ1...ТТ16* – тягові перетворювачі; *М1...М16* – тягові асинхронні електродвигуни; *БПВП1*, *БПВП2* – блоки перетворювачів власних потреб;

ПП1, *ПП2* – погоджувальні перетворювачі; *НЕ* – накопичувач енергії; *ВП* – входний перетворювач;

ТПЕУ – тяговий привід електровозу управління; *ДСЕУ* – допоміжні системи електровозу управління;

ТПБС – тяговий привід бустерної секції; *ДСБС* – допоміжні системи бустерної секції;

СНЕ – система накопичення енергії

Fig. 2. Scheme of traction electric drive of an electric locomotive with individual power supply of electric motors:

P – current collector; *ТТ* – traction transformer; *4QS1*, *4QS2* – input converters; *ТТ1...ТТ16* – traction converters;

М1...М16 – traction asynchronous electric motors; *БПВП1*, *БПВП2* – auxiliary converter assemblies; *ПП1*, *ПП2* – matching converters; *НЕ* – energy storage; *ВП* – input converter; *ТПЕУ* – traction drive of the control electric locomotive; *ДСЕУ* – auxiliary control systems of the electric locomotive;

ТПБС – traction drive of the booster section; *ДСБС* – auxiliary systems of the booster section;

СНЕ – energy storage system

Розглянемо режими роботи запропонованого тягового електропривода. У режимі тяги (рис. 3, *a*) тягові електродвигуни *М1...М8* електровоза керування отримують живлення від контактної мережі через тяговий трансформатор *ТТ*, входні перетворювачі *4QS1*, *4QS2* та

тягові перетворювачі *ТТ1...ТТ8*. Тягові електродвигуни *М9...М16* бустерної секції отримують живлення від системи накопичення енергії *СНЕ* через погоджувальний перетворювач *ПП2* та тягові перетворювачі *ТТ9...ТТ16*. Живлення допоміжні системи електровозу управління *ДСЕУ*

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

та бустерної секції ДСБС отримують від вхідного перетворювача. Рух електровоза за потужності менше 50 % від номінальної здійснює тяговий електропривод електровоза керування. За необхідності збільшення потужності чи сили тяги до роботи включають тяговий електропривод бустерної секції.

У режимі електродинамічного гальмування (ЕДГ) (рис. 3, б) енергію від тягового електропривода електровоза управління ТПЕУ використовують для живлення допоміжних систем електровоза управління ДСЕУ та бустерної секції ДСБС і заряджання системи накопичення СНЕ через погоджувальний перетворювач ПП1. Енергію від тягового електропривода бустерної секції використовують для заряджання накопичувача енергії через погоджувальний перетворювач ПП2.

У випадку маневрування під час навантаження та розвантаження живлення тягового електропривода та допоміжних системи здійснюється від системи накопичення енергії СНЕ (рис. 3, в).

У режимі заряджання накопичувача енергії під час руху на ділянці шляху енергія від контактної мережі живить тяговий електропривід, допоміжні системи та заряджає бортовий накопичувач (рис. 3, г).

Неавтономний рух здійснюється в разі живлення всіх систем електровоза від контактної мережі (рис. 3, д).

У цій статті не досліджено будову системи накопичення енергії й тип накопичувачів.

Таким чином, вище зазначена структура тягового електропривода забезпечує всі режими роботи електровоза.

Для визначення параметрів тягового електропривода виконано моделювання та обробку його результатів.

Під час створення моделі руху поїзда на ділянці шляху взято, що поїзд являє собою ланцюг твердих тіл, які з'єднані абсолютно жорстким зв'язком. Це підвищує точність розрахунків сил опору рухові. Система рівнянь руху має вигляд

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

де ξ – коефіцієнт, який враховує одиниці вимірювання; V – швидкість поїзда; t – час; S – шлях; ρ – коефіцієнт, який враховує обертання вузлів екіпажної частини; f_L – питома дотична сила локомотива в режимі тяги або електродинамічного гальмування; w_L – питома сила опору рухові електровоза; w_w – питома сила опору рухові вагонів; b – питома гальмівна сила пневматичних гальм.

Питому дотичну силу локомотива в режимі тяги або електродинамічного гальмування визначали за виразом:

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

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

Дотична сила локомотива може набувати будь-якого значення в тяговій області. Для багатодвигунного електропривода з індивідуальним приводом колісних пар за умови однакового навантаження електродвигунів дотичну силу визначали за виразом:

$$F_L = F_D N_D, \quad (3)$$

де F_D – дотична сила, яку реалізує одна обмоторена вісь; N_D – кількість працюючих електродвигунів електровоза.

Питомий опір рухові локомотива та вагонів визначали за виразом:

$$w = w_o + w_i + w_r + w_p + w_b, \quad (4)$$

де w_o – основний питомий опір рухові; w_i – додатковий питомий опір рухові від ухилу; w_r – додатковий питомий опір від руху по кривій; w_p – додатковий питомий опір від руху вагонами вперед; w_b – додатковий питомий опір під час рухання поїзда.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

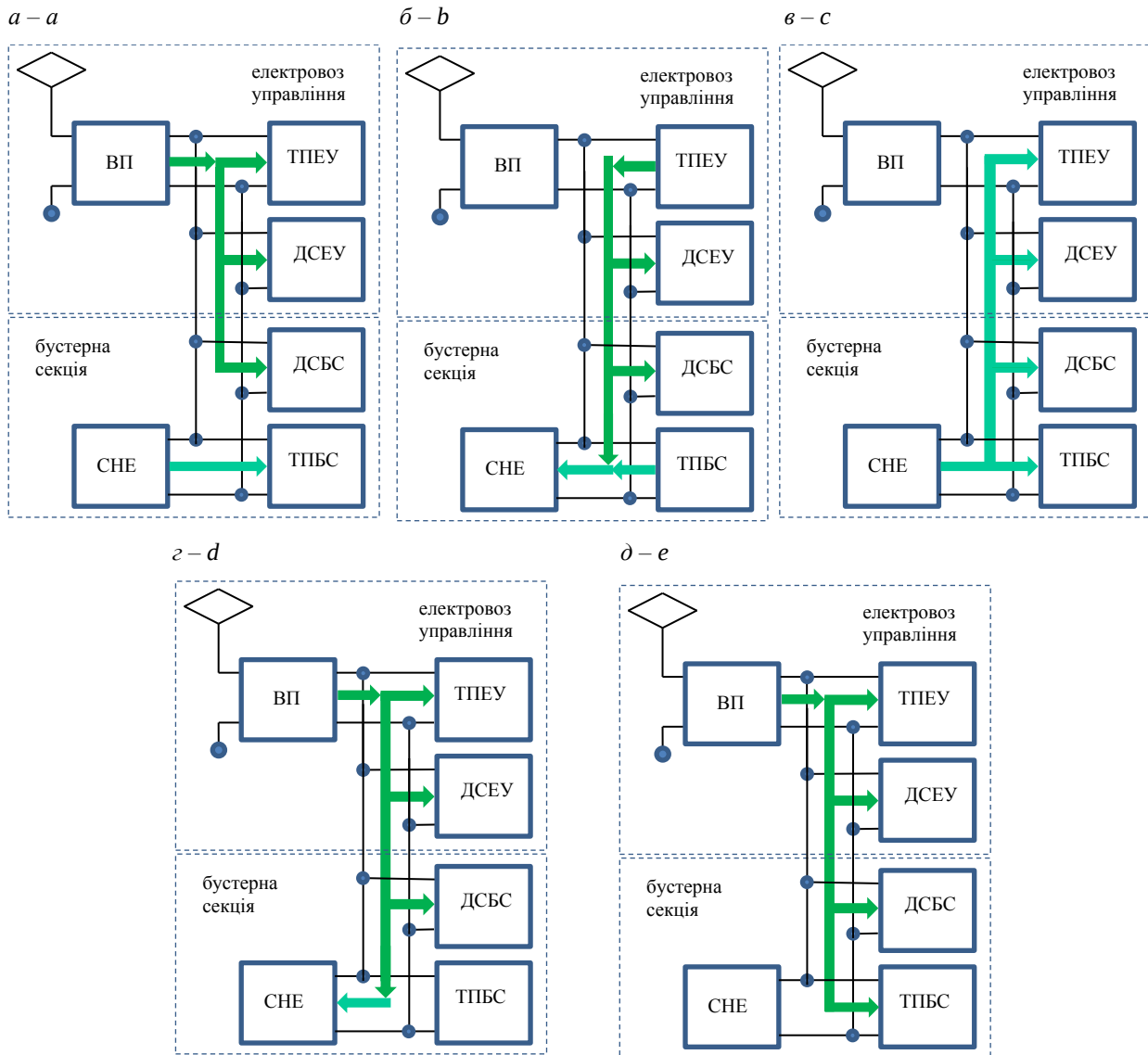


Рис. 3. Потoki енергії у системах електровоза:
 а – тяга; б – електродинамічне гальмування; в – маневрування або автономний рух;
 г – заряджання накопичувача енергії під час руху; д – неавтономний рух

Fig. 3. Energy flows in electric locomotive systems:
 а – traction; б – electrodynamic braking; в – shunting or autonomous movement;
 г – charging the energy storage during movement; д – non-autonomous movement

У зв'язку з можливістю роботи електровоза з вимкненими електродвигунами його основний питомий опір визначали за виразом:

$$w_o = w'_o \frac{N_{D1}}{N_{M1}} + w'_x \left(1 - \frac{N_{D1}}{N_{M1}} \right), \quad (5)$$

де w'_o – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги; w'_x – основний питомий опір

руху локомотива в режимі вибігу; N_{M1} – загальна кількість обмотаних осей секцій; N_{D1} – кількість працюючих тягових електродвигунів секції.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору та рекомендації щодо застосування наведено в [4].

Як зазначено вище, з метою уточнення розрахунку сил опору поїзд змодельовано як ла-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

нцюг твердих тіл. У цьому випадку питомий опір від ухилу та під час руху по кривій визначено для кожного вагона чи секції електровоза окремо. При цьому припущено, що вагон повністю перебуває на ділянці шляху, якщо його центр мас перепадає на межі ділянки.

Модель руху поїзда доповнено регулятором дотичної сили у вигляді:

$$F = \begin{cases} F_L, & V < (V_{\max} - \Delta V) \\ 0, & (V_{\max} - \Delta V) \leq V < V_{\max} \\ -F_L, & V > V_{\max} \end{cases}, \quad (6)$$

де $V_{\max}$ – допустима швидкість руху; ΔV – зона «нечутливості».

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

Дотичну потужність визначали за виразом:

$$P_L = F_L V. \quad (7)$$

Таким чином, вирази (1)–(7) становлять математичну модель руху поїзда на ділянці шляху.

Моделювання руху поїзда під час маневрування викликає труднощі, оскільки режим руху у випадку навантаження або розвантаження – поштовхи для переміщення вагонів. Безпосереднє вирішення тягової задачі для цього режиму пов'язане з труднощами через неточності в математичному описі сил опору рухові за швидкостей, близьких до нуля. Тому проведемо оцінку дотичної потужності, виходячи з інших міркувань.

Силу опору рухові поїзда визначаємо за виразом:

$$F_{Wi} = \sum_{k=1}^s M_{Lk} (w'_{Lk} + w_b) + \sum_{j=1}^n (M_{Tj} + M_{Ri}) (w'_{Wj} + w_b), \quad (8)$$

де w'_{Lk} – питомий опір (сила опору) рухові електровоза під час маневрування; w'_{Wj} – питомий опір (сила опору) рухові вагонів під час маневрування; M_{Tj} – маса тари одного вагона; M_{Ri} –

маса руди, яку завантажують чи розвантажують.

За необхідності у виразі (8) можна враховувати інші складові питомого опору рухові поїзда.

Питомий опір визначаємо за швидкості, якої досягає поїзд у кінці поштовху.

Якщо взяти, що протягом поштовху швидкість поїзда зростає лінійно, то тривалість поштовху можна визначити за виразом:

$$T_i = \sqrt{\frac{2M_i L_i}{F_{Mi} - F_{Wi}}}, \quad (9)$$

де F_{Mi} – дотична сила електровоза під час маневрування в i -му переміщенні (для розрахунків беремо постійною); M_i – маса поїзда за i -го поштовху; L_i – шлях, який проходить поїзд за i -го поштовху під тягою.

Дотична сила електровоза під час маневрування повинна перевищувати силу опору навантаженого поїзда:

$$F_{Mi} > F_{Wi}, \quad (10)$$

тому її доцільно взяти як постійну величину. Залежність швидкості визначали за виразом:

$$V_i(t) = a_i t; \quad 0 < t < T_i, \quad (11)$$

де a_i – прискорення поїзда за i -го переміщення.

Прискорення поїзда за i -го переміщення визначаємо за виразом:

$$a_i = \frac{F_{Mi} - F_{Wi}}{M_{\rho i}}, \quad (12)$$

де $M_{\rho i}$ – маса поїзда за i -го переміщення.

Масу поїзду визначаємо за виразом:

$$M_{\rho i} = \sum_{k=1}^s \rho_{Lk} M_{Lk} + \sum_{j=1}^n \rho_{Tj} (M_{Tj} \pm M_{Ri}), \quad (13)$$

де ρ_{Lk} – коефіцієнт обертових мас для електровоза; ρ_{Tj} – коефіцієнт обертових мас для вагонів.

Швидкість поїзда у кінці поштовху:

$$V_{Ti} = a_i T_i. \quad (14)$$

Потужність «на колесі» визначаємо як

$$P_i(t) = V_i(t)F_{Mi}; \quad 0 < t < T_i. \quad (15)$$

Максимальну потужність «на колесі» визначаємо за виразом:

$$P_{\max i} = a_i F_M T_i. \quad (16)$$

Тривалість руху поїзда після поштовху визначаємо за виразом:

$$T_{im} = \frac{L_m}{V_{\max i}}, \quad (17)$$

де L_m – довжина шляху, який проходить поїзд після поштовху; $V_{\max i}$ – швидкість у кінці поштовху

Швидкість у кінці поштовху визначаємо за виразом:

$$V_{\max i} = a_i T_i. \quad (18)$$

Таким чином, вирази (8)–(18) складають математичну модель руху поїзда під час маневрування.

Моделювання процесів енергетичного обміну в тяговому електроприводі має такий вигляд.

Потужність, яку споживає від вхідного перетворювача електровозу керування в режимі тяги ($p_k(t) \geq 0$):

$$p_{in(e)}(t) = (p_e(t) + \Delta p_e(t)) + p_{aux}(t), \quad (19)$$

де $p_e(t)$ – дотична потужність електровоза керування; $\Delta p_e(t)$ – втрати в тяговому електроприводі електровоза керування; $p_{aux}(t)$ – потужність допоміжних систем електровоза керування та бустерної секції.

У режимі електродинамічного гальмування (ЕДГ, $p_k(t) < 0$) за умови, що потужності, яка надходить у проміжний контур від тягового електропривода, достатньо для живлення допоміжних систем, потужність, у споживана від вхідного перетворювача, дорівнює нулю;

$$p_{in(e)}(t) = 0. \quad (20)$$

Потужність, яка надходить до накопичувача енергії від тягового електропривода електровоза керування в режимі ЕДГ, становить:

$$p_{out(e)}(t) = p'_e(t) - \Delta p'_e(t) - p'_{aux}(t), \quad (21)$$

де $p'_e(t)$ – дотична потужність електровоза керування в режимі ЕДГ; $\Delta p'_e(t)$ – втрати в тяговому електроприводі електровоза керування; $p'_{aux}(t)$ – потужність допоміжних систем електровоза керування та бустерної секції.

Потужність, яку споживає від накопичувача енергії тяговий електропривід бустерної секції в режимі тяги, можна визначити за виразу:

$$p_{in(b)}(t) = p_b(t) + \Delta p_b(t), \quad (22)$$

де $p_b(t)$ – дотична потужність бустерної секції; $\Delta p_b(t)$ – втрати в тяговому електроприводі бустерної секції.

Потужність, яка надходить до накопичувача енергії від тягового електропривода бустерної секції в режимі ЕДГ, визначаємо так:

$$p_{out(b)}(t) = p'_b(t) - \Delta p'_b(t), \quad (23)$$

де $p'_b(t)$ – дотична потужність бустерної секції в режимі ЕДГ; $\Delta p'_b(t)$ – втрати в тяговому електроприводі бустерної секції.

Енергію накопичувача визначаємо за виразом;

$$e_{oess}(t) = \begin{cases} E_p + k_{OESS} \int_0^{t_p} p_{oess}(t) dt; & p_k(t) < 0; \\ E_q - \int_0^{t_q} (p_{in(b)}(t) + \Delta p_2(t)) dt; & p_k(t) > 0, \end{cases} \quad (24)$$

де $p_{oess}(t)$ – потужність накопичувача енергії під час заряджання; E_p, E_q – енергія накопичувача перед p -м та q -м етапом заряджання та розряджання відповідно; t_p, t_q – тривалість p -го та q -го етапу заряджання та розряджання відповідно; $\Delta p_2(t)$ – втрати в погоджувальному перетворювачі під час живлення тягового електропривода бустерної секції; k_{OESS} – коефіцієнт, який враховує втрати в накопичувачі енергії під час процесів заряджання та розряджання.

Потужність накопичувача в режимі заряджання визначаємо за виразом:

$$p_{eoss}(t) = (p_{out(e)}(t) - \Delta p'_1(t)) + (p_{out(b)}(t) - \Delta p'_2(t)), \quad (25)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

де $\Delta p'_1(t)$, $\Delta p'_2(t)$ – втрати в погоджувальних перетворювачах у режимі запасання енергії.

Під час маневрування енергія з накопичувача живить тягові електродвигуни та допоміжні системи електровоза.

Потужність, споживана від накопичувача енергії, можна знайти з виразу:

$$p_{in(m)}(t) = \left(p_m(t) + \Delta p_m(t) + \Delta p_1''(t) \right) + p_{aux}''(t), \quad (26)$$

де $p_m(t)$ – дотична потужність під час маневрування; $\Delta p_m(t)$ – втрати в тяговому електроприводі в режимі маневрування; $\Delta p_1''(t)$ – втрати у погоджувальному перетворювачі під час живлення тягового електропривода та допоміжних систем; $p_{aux}''(t)$ – потужність допоміжних систем під час маневрування.

Енергію, яку відбирають із накопичувача енергії (НЕ, англ. OESS), визначають за виразом:

$$e'_{oess}(t) = E_k - \int_0^{t_k} p_{in(m)}(t) dt, \quad (27)$$

де E_k – енергія накопичувача перед k -м етапом розрядження; t_k – тривалість k -го етапу розрядження відповідно.

Для визначення втрат у тяговому електроприводі виконали розрахунки тягового асинхронного електродвигуна за синусоїдального живлення відповідно до [5]. Основні технічні параметри електродвигуна наведено в табл. 1.

Оскільки тяговий електродвигун живиться від напівпровідникового перетворювача, необхідно оцінити, по-перше, втрати в ньому, по-друге – втрати в тяговому електродвигуні від вищих гармонійних струму та напруги.

Розрахунок втрат в електродвигуні за несинусоїдального живлення потребує визначення параметрів ШІМ-модуляції інвертора, що не передбачено цим дослідженням. За оцінками [16], ККД тягового електродвигуна внаслідок живлення від інвертора напруги може знижуватися на 1,2...1,7 %. Тому припустимо, що зменшення ККД електродвигуна становить 1,5 % для усіх режимів роботи.

Розрахунок втрат у тяговому інверторі потребує, як і у випадку тягового електродвигуна, визначення параметрів ШІМ-модуляції інвертора залежно від режиму роботи. Однак аналіз характеристик ККД тягових інверторів показує, що їх ККД перевищує 98 % у широкому діапазоні навантажень [7, 10]. Тому вважаємо припускаємо, що втрати в інверторі будуть постійною величиною, яка відповідає втратам у номінальному режимі. За ККД інвертора 98 % і потужності 460 кВт втрати в інверторі складуть 9,4 кВт у разі індивідуального живлення електродвигунів.

Таблиця 1

**Номінальні параметри
тягового електродвигуна**

Table 1

**Rated parameters of
traction electric motor**

Параметр	Од. вим.	Значення
Потужність	кВт	430
Лінійна напруга	В	760
Фазний струм	А	395
Частота	Гц	25,5
Частота обертання	об./хв	501
Момент	Нм	8 200
ККД	%	93,6
Коефіцієнт потужності	д.е.	0,88
Найбільша частота обертання	об./хв	1 800
Кількість фаз	–	3
Кількість полюсів	–	6

Для оцінки енергоефективності також визначаємо втрати у тяговому редукторі. Розрахунки втрат в тяговому редукторі виконували відповідно до [2]. Для номінального режиму роботи тягового електродвигуна втрати в редукторі складають 1,7 кВт. Для розрахунків беремо, що втрати в редукторі не залежать від навантаження.

Під час розрахунків узято, що втрати в погоджувальних перетворювачах складають 2 % від потужності, яку передають.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Для моделювання часткового відімкнення тягових електродвигунів кількість працюючих електродвигунів визначено в нижчеописаний спосіб з умови:

$$N_{TM} = \max(N_1, N_2), \quad (28)$$

де N_1 – кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої сили тяги; N_2 – кількість тягових осей, необхідних для реалізації дотичної потужності.

Кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої сили тяги, визначаємо за виразом:

$$N_1 = \frac{F_c}{F_s / N_M}, \quad (29)$$

де F_c – поточне значення дотичної сили; F_s – сила тяги на граничній характеристиці за поточної швидкості руху; N_M – загальна кількість обмотованих осей електровоза.

Отриману з виразу (29) кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої сили тяги, округляємо до цілого числа.

Кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої дотичної потужності, визначаємо за виразом:

$$N_2 = \frac{P_c}{P_{TMnom}}, \quad (30)$$

де P_c – поточне значення дотичної потужності; P_{TMnom} – номінальна потужність тягового електродвигуна.

Отриману з (30) кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої потужності, округлюємо до цілого числа.

Результати

Для розв’язання тягових задач та розрахунків параметрів енергетичних потоків складено скрипти в середовищі Matlab [12]. Візьмемо, що осьова формула електровоза – $2(B_0 - B_0 + B_0 - B_0)$, маса – 2×200 т, довжина – 20 м. Граничні тягова та гальмівна характеристики електровозу, а також профіль шляху від дробарної фабрики до кар’єру (для порожнього напіврейсу) наведено в [3]. Завантажений напіврейс здійс-

нюється від пункту перевантаження до дробарної фабрики. Узято, що для перевезення руди використовують думпкери моделі 33–7141 підвищеної вантажопідйомності, що дорівнює 115 т. Маса тари думпкара – 50 т, довжина – 15 м. Кількість думпкарів у поїзді – 14. Для розрахунків візьмемо, що потужність допоміжних систем складає 300 кВт. Допустима швидкість руху – 20 км/год.

Для розрахунку режимів маневрування припустимо таке. Завантаження думпкара здійснюють за чотири цикли роботи екскаватора. Відповідно, за один цикл завантажується 28,75 т руди – $\frac{1}{4}$ вантажопідйомності думпкара. Після цього поїзд переміщується на $\frac{1}{4}$ довжини думпкара. Усього під час навантаження поїзд здійснює 56 переміщень. Перед початком навантаження поїзд переміщується на шлях 210 м на пункт перевантаження. Для розрахунків візьмемо, що потужність допоміжних систем складає 50 кВт.

Розвантаження думпкара здійснюють на дробарній фабриці, після поїзд переміщується на довжину вагона що дорівнює 15 м. Після ж 14 переміщень поїзд виїжджає з дробарної фабрики. Довжина цих переміщення становить 210 м. Для розрахунків беремо, що потужність допоміжних систем складає 100 кВт.

Описаний алгоритм руху під час завантаження й розвантаження ідеалізований, однак дозволяє провести розрахунки для визначення енергоспоживання. Для розрахунків узято, що рух забезпечують чотири електродвигуни бустерної секції.

Результати розв’язання тягових задач для ділянки шляху наведено на рис. 4 та 5 у вигляді часових залежностей.

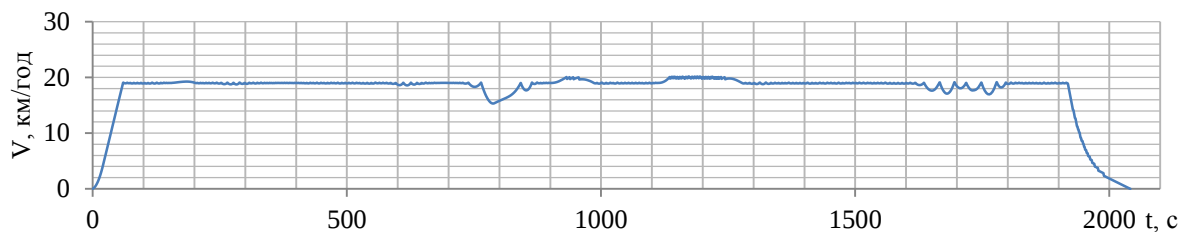
Аналіз рис. 4 та 5 показує, що фактична швидкість руху складає близько 19 км/год, що обумовлено алгоритмом завдання дотичної сили. Під час завантаженого напіврейсу рух із повним навантаженням у режимі тяги здійснюється на керівному підйомі. Під час порожнього напіврейсу в тяговому режимі рух здійснюється з потужністю не більше 50 % від номінальної. У режимах ЕДГ електровоз гальмує з номінальною потужністю відповідно до алгоритмів завдання дотичної сили.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

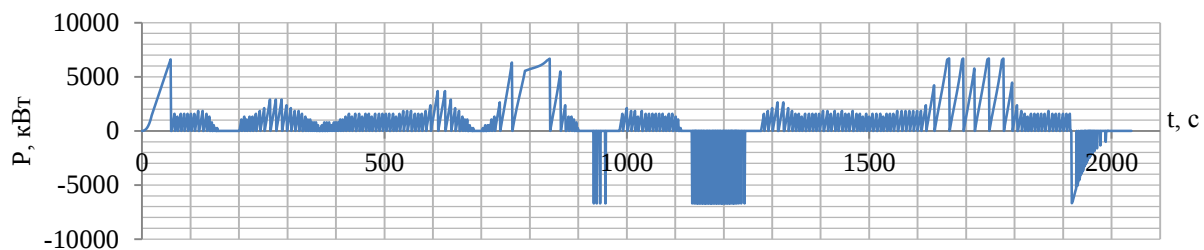
Аналіз залежності кількості працюючих електродвигунів (рис. 4, *в* та 5, *в*) показує, що ввімкнення електродвигунів бустерної секції відбувається тільки під час розгону та руху з потужністю, більше ніж 50 % від номінальної. Зокрема, під час порожнього напіврейсу працює тільки тяговий електропривід електровоза керування.

Як бачимо з рис. 4 та 5, значну частину руху в режимі тяги електровоз працює з 2...4 електродвигунами. При цьому в режимах тяги під час порожнього напіврейсу для руху фактично достатньо 8 електродвигунів електровоза керування. Під час завантаженого напіврейсу на підйомах умикаються електродвигуни бустерної секції. У режимі ЕДГ гальмування здійснюють усі електродвигуни.

а – а



б – б



в – в

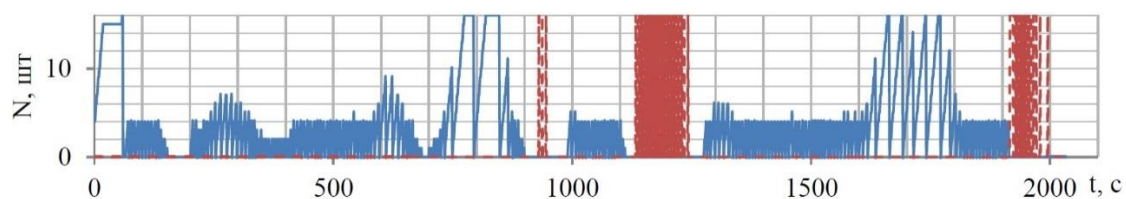


Рис. 4. Залежність швидкості поїзда (*а*), дотичної потужності електровозу (*б*) та кількості працюючих електродвигунів (*в*) для завантаженого напіврейсу (суцільна лінія – режим тяги, пунктирна лінія – режим ЕДГ)

Fig. 4. Dependence of the train speed (*a*), the tangential power of the electric locomotive (*b*) and the number of working electric motors (*c*) for a freight half passage (continuous line – traction mode, dashed line – EDB mode)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

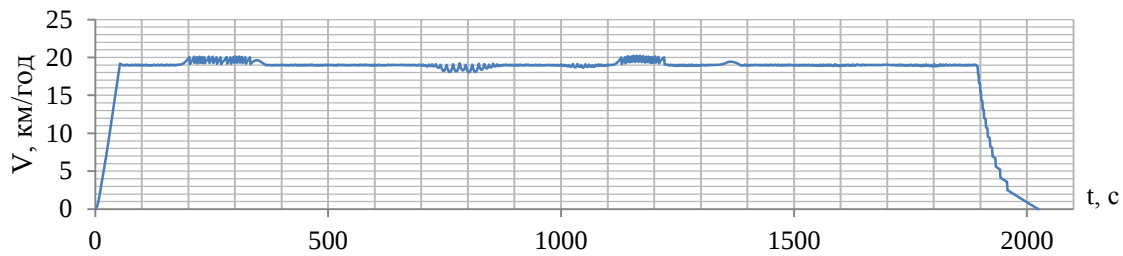
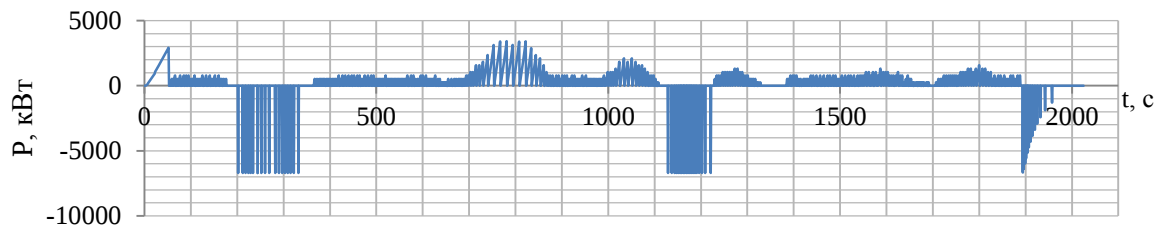
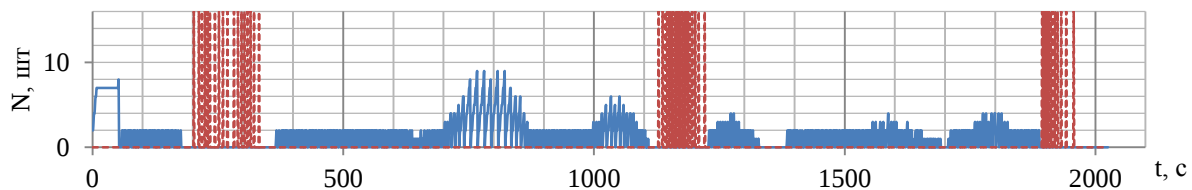
a – a*б – b**в – c*

Рис. 5. Залежність швидкості поїзда (а), дотичної потужності електровоза (б) та кількості працюючих електродвигунів (в) для порожнього напіврейсу (суцільна лінія – режим тяги, пунктирна лінія – режим ЕДГ)

Fig. 5. Dependence of the train speed (a), the tangential power of the electric locomotive (b) and the number of working electric motors (c) for an empty half passage (continuous line – traction mode, dashed line – EDB mode)

У разі часткового навантаження електродвигуни працюють із потужністю 250...400 кВт (58...93 % від номінальної потужності). Варто зауважити, що під час руху з повним числом електродвигунів їх потужність складає 50...150 кВт (12...35 % від номінальної потужності).

Для ілюстрації зниження енергоспоживання під час роботи з відімкненими електродвигунами виконано розрахунки ККД системи «тяговий редуктор – тяговий електродвигун – тяговий перетворювач» за швидкості руху 20 км/год (для розрахунків узято, що діаметр тягового колеса складає 1,05 м, а передатне відношення тягового редуктора – 5,33). Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Енергетичні параметри системи «тяговий редуктор – тяговий електродвигун – тяговий перетворювач»

Table 2

Energy parameters of the «traction reducer-traction electric motor-traction converter» system

Параметр	Од. вим.	Значення					
Відносна потужність	%	100	80	60	40	20	0
ККД	%	90,3	90,3	89,8	88,0	81,8	0

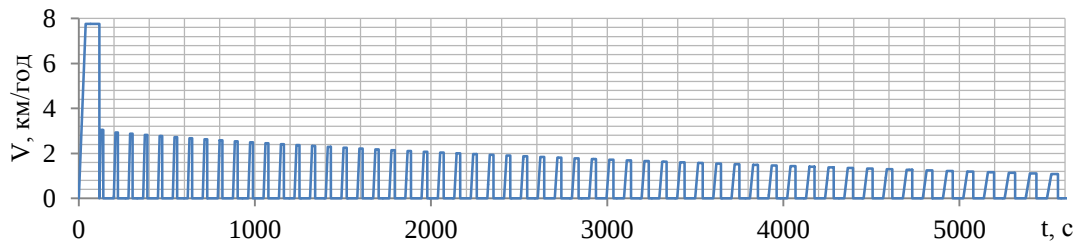
ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Як бачимо з табл. 2, у діапазоні навантажень 60...100 % (260...430 кВт) потужності ККД системи «тяговий редуктор – тяговий електродвигун – тяговий перетворювач» становить близько 90 %. І саме в цьому діапазоні потужності працюють тягові електродвигуни, що й забезпечує зменшення споживання енергії. Крім то-

го, для розрахунків узято, що непрацюючі електродвигуни розмагнічені. Це виключає втрати холостого ходу в ненавантажених електродвигунах [6].

Результати розрахунків параметрів руху під час маневрування наведено на рис. 6 і 7 у вигляді часових залежностей.

a – a



б – b

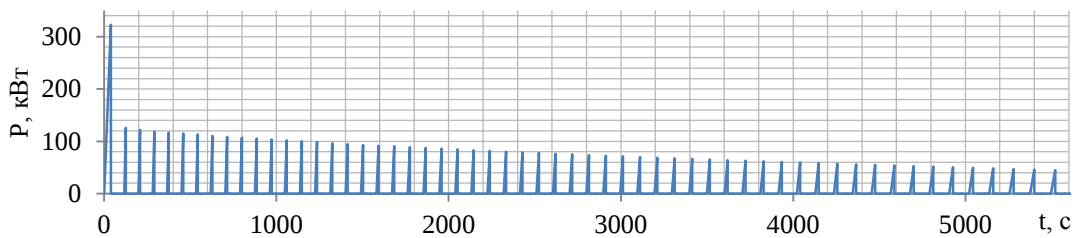
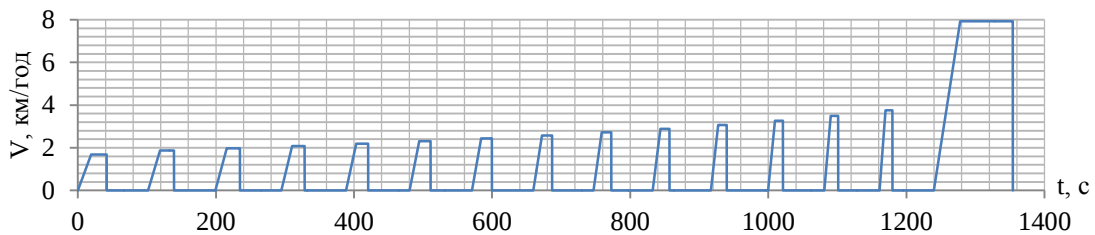


Рис. 6. Швидкість поїзда (*a*) та дотична потужність (*б*) під час маневрування протягом навантаження

Fig. 6. Speed of train (*a*) and tractive power (*b*) when shunting during loading

a – a



б – b

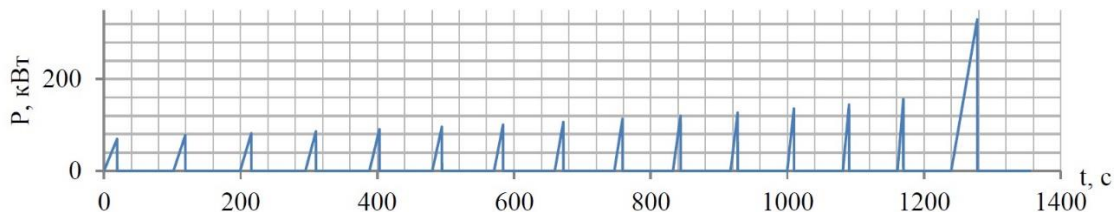


Рис. 7. Швидкість поїзда (*a*) та дотична потужність (*б*) під час маневрування протягом розвантаження

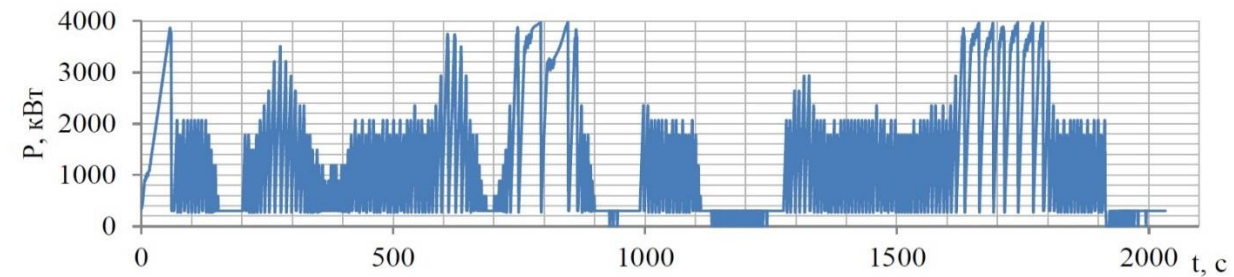
Fig. 7. Speed of train (*a*) and tangential power (*b*) when shunting during unloading

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Із рис. 6 і 7 випливає, що характер руху є імпульсним. Максимальна дотична потужність складає 330 кВт. Однак за обмеження швидкості пересування вона може бути зменшена.

На рис. 8–11 показано результати розрахунків параметрів енергетичних процесів у тяговому електроприводі під час руху по ділянці у вигляді часових залежностей.

a – a



b – b

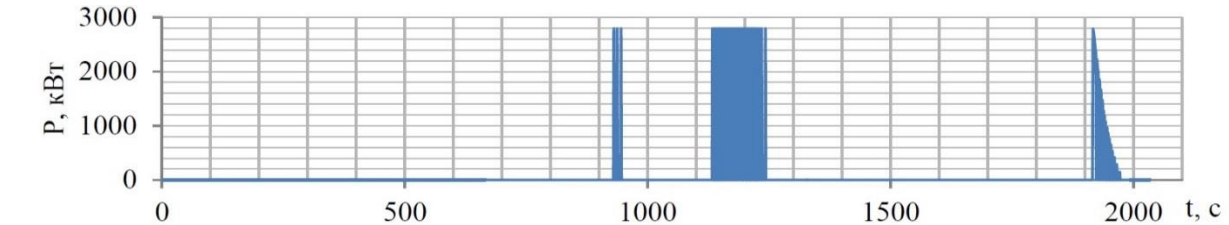
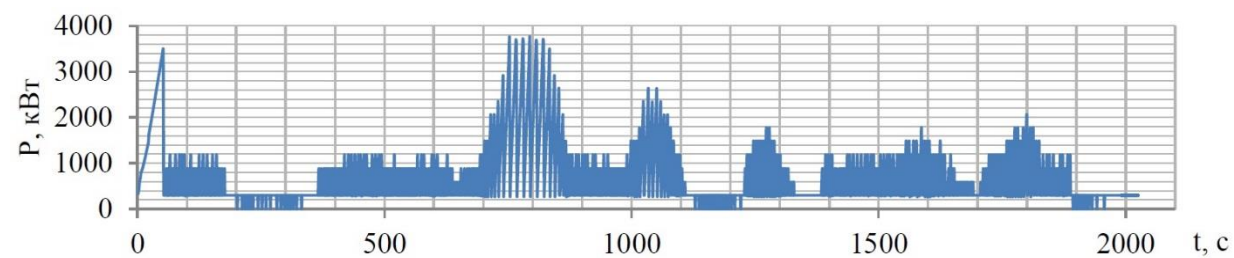


Рис. 8. Потужність проміжної ланки електровоза керування під час завантаженого напіврейсу:
a – потужність, споживана від вхідного перетворювача; *b* – потужність, яка надходить до НЕ

Fig. 8. The power of the intermediate link of the control electric locomotive during the cargo half passage:
a – the power consumed from the input converter; *b* – power, which is given to OESS

a – a



b – b

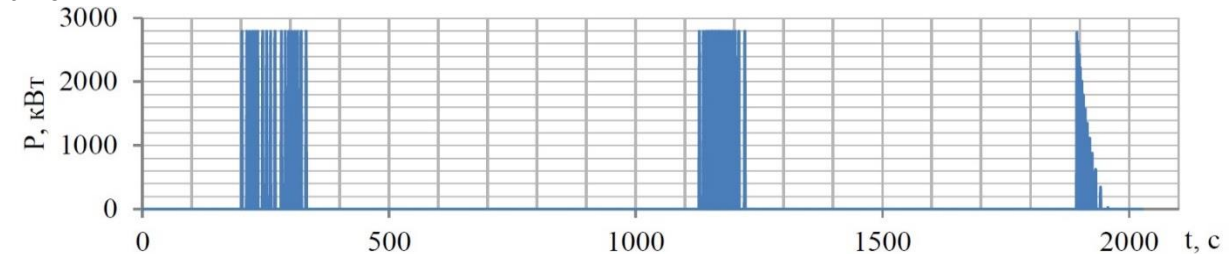


Рис. 9. Потужність проміжної ланки електровоза керування під час порожнього напіврейсу:
a – потужність, споживана від вхідного перетворювача; *b* – потужність, яка надходить до НЕ

Fig. 9. The power of the intermediate link of the control electric locomotive at an empty half passage:
a – the power consumed from the input converter; *b* – the power, which is supplied to OESS

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

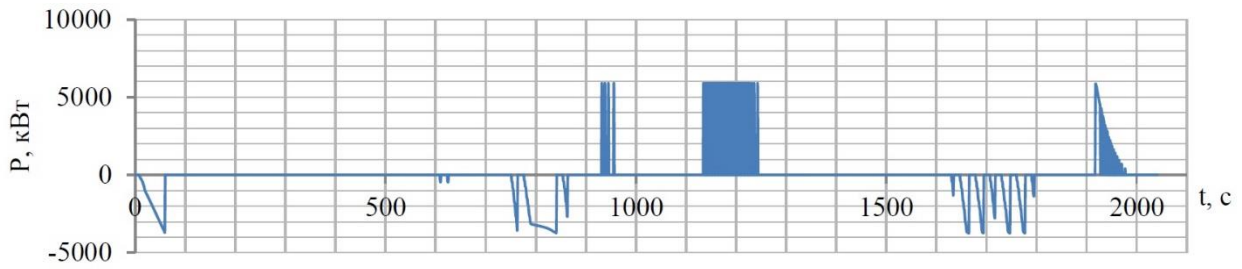
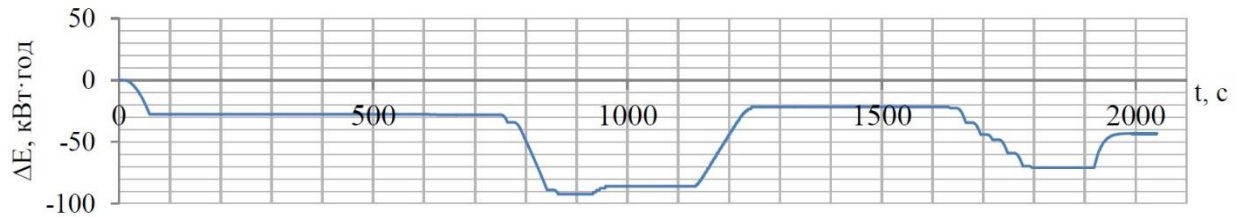
a – a*б – b*

Рис. 10. Залежність потужності (*a*) та зміни енергії накопичувача (*б*) під час завантаженого напіврейсу (від'ємні значення потужності відповідають розряджанню НЕ, додатні – заряджанню)

Fig. 10. Dependence of power (*a*) and changes in the energy of the energy storage (b) during a cargo half passage (negative power values correspond to OESS discharge, positive values – to charging)

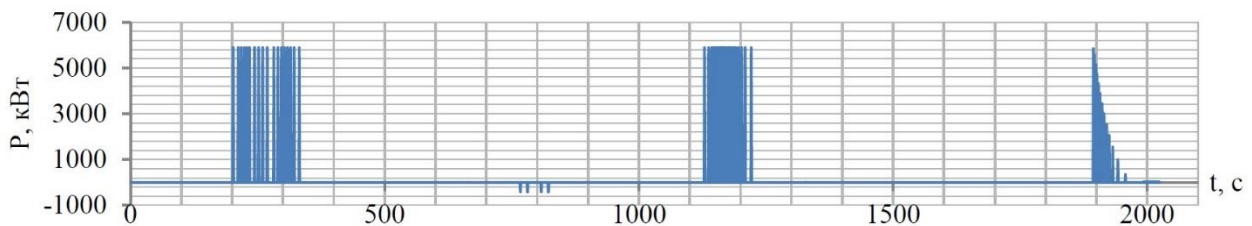
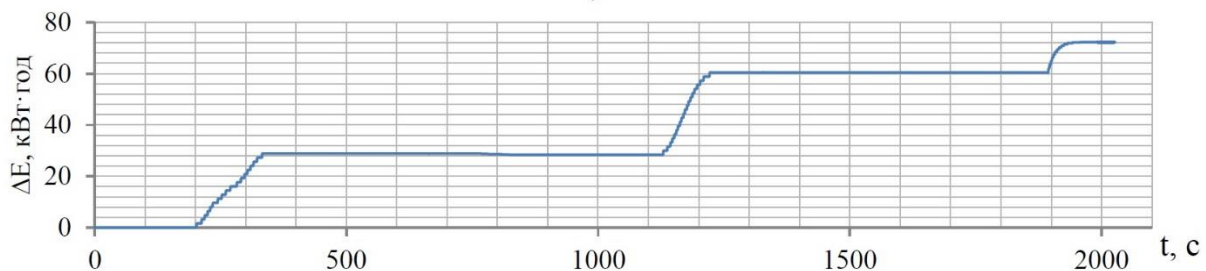
a – a*б – b*

Рис. 11. Залежність потужності (*a*) та зміни енергії накопичувача (*б*) під час порожнього напіврейсу (від'ємні значення потужності відповідають розряджанню НЕ, додатні – заряджанню)

Fig. 11. Dependence of power (*a*) and changes in the energy of the energy storage device (*b*) at an empty half passage (negative power values correspond to OESS discharge, positive values – to charging)

Із рис. 8–11 випливає, що здебільшого рух поїзда забезпечує тяговий електропривід електровоза керування за його живлення від контактної мережі. Тяговий електропривід бустерної секції, який живиться від накопичувача енергії,

залучають до роботи тільки в певних режимах, коли тягове навантаження перевищує 50 % номінальної потужності або максимальної сили тяги.

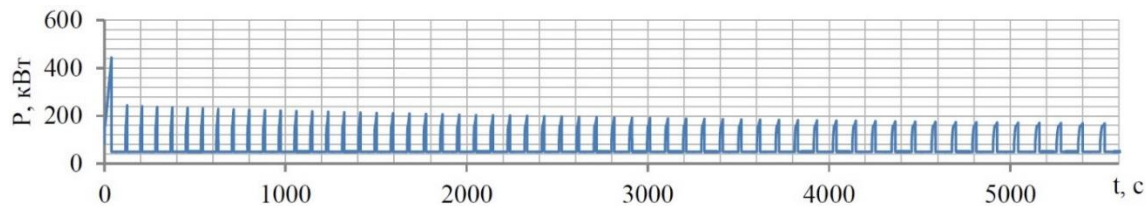
ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Під час вантаженого напіврейсу накопичувач енергії працює як у режимі накопичення за електродинамічного гальмування електровоза, так і в режимі розрядження в разі живлення тягового електропривода бустерної секції. Під час порожнього напіврейсу накопичувач енергії

працює тільки в режимі запасання енергії в разі електродинамічного гальмування.

На рис. 12 і 13 показано результати розрахунків параметрів енергетичних процесів у тяговому електроприводі під час маневрування у вигляді часових залежностей.

a – a



б – б

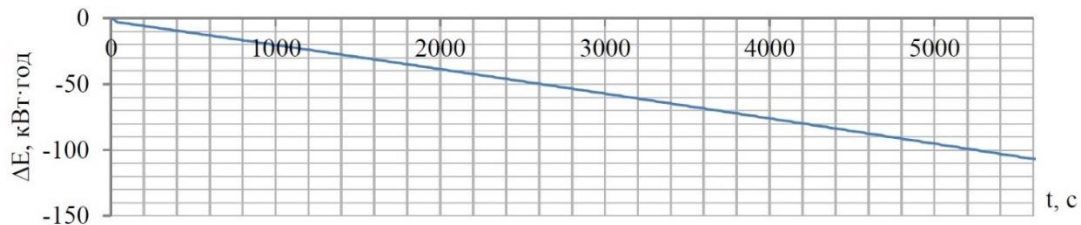
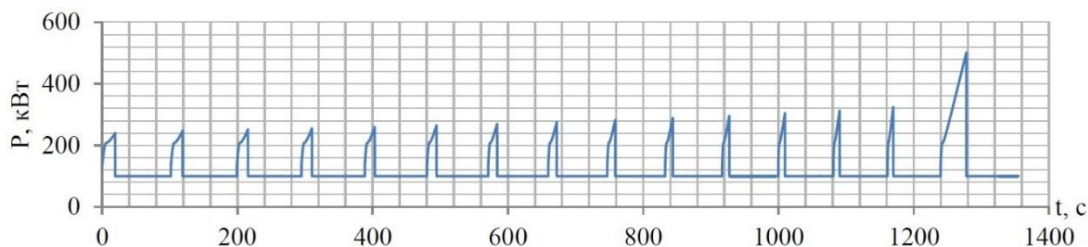


Рис. 12. Потужність НЕ (*a*) та зміна енергії НЕ (*б*) під час маневрування протягом навантаження

Fig. 12. OESS power (*a*) and OESS energy change (*b*) when shunting during loading

a – a



б – б

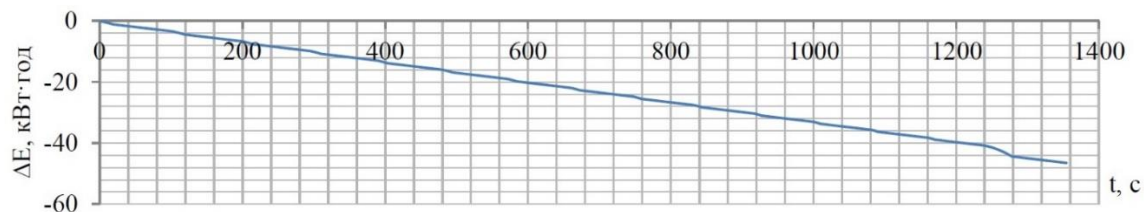


Рис. 13. Потужність НЕ (*a*) та зміна енергії НЕ (*б*) під час маневрування протягом розвантаження

Fig. 13. OESS power (*a*) and OESS energy change (*b*) when shunting during unloading

Із рис. 12 і 13 бачимо, що під час маневрування відбувається розрядження накопичувача енергії. Для виконання операцій під час навантаження потрібно близько 110 кВт·год енергії, під час розвантаження – 45 кВт·год. Значну ча-

стину цієї енергії споживають допоміжні системи.

На рис. 14 показано залежність зміни енергії НЕ під час руху за циклом «порожній напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження».

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

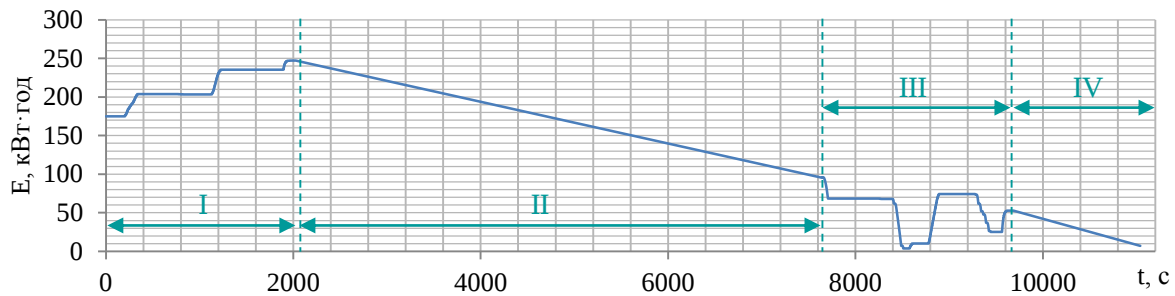


Рис. 14. Зміна енергії НЕ за рейс:

I – порожній напіврейс; II – маневрування протягом навантаження; III – завантажений напіврейс;
IV – маневрування протягом розвантаження

Fig. 14. OEES energy change per passage:

I – empty half passage; II – shunting during loading; III – loaded half passage; IV – shunting during unloading

Із рис. 14 випливає, що для забезпечення роботи електровоза в циклі «порожній напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження» початкова енергія має становити не менше 175 кВт·год. Під час порожнього напіврейсу (етап I) енергія НЕ збільшується внаслідок рекуперації. Під час маневрування протягом навантаження (етап II) відбувається

розрядження НЕ на величину 110 кВт·год. Під час вантажного напіврейсу НЕ (етап III) як розряджається, так і накопичує енергію. У разі маневрування протягом розвантаження (етап IV) відбувається розрядження НЕ.

Із рис. 8–14 визначаємо параметри компонент тягового електропривода. Результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри тягового електропривода електровоза

Table 3

Parameters of traction electric drive of an electric locomotive

Параметр	Од. вим.	Значення
Потужність вхідного перетворювача	кВт	4 000
Потужність погоджувального перетворювача ПП1	кВт	2 800
Потужність погоджувального перетворювача ПП2	кВт	3 800
Потужність накопичувача енергії	кВт	6 000
Робоча енергоємність накопичувача енергії	кВт·год	250
Початкова енергія перед циклом руху	кВт·год	175

Таким чином, проведені дослідження показують можливість створення тягового електропривода електровоза для кар'єрного залізничного транспорту із запропонованою структурою. Шляхом моделювання роботи електровоза визначено параметри основних компонентів тягового електропривода.

Наукова новизна та практична значимість

Автори цієї роботи вперше запропонували структуру тягового електропривода електровоза для кар'єрного залізничного транспорту, у якій живлення електродвигунів електровоза керування здійснюється від контактної мережі, а електродвигуни бустерної секції живляться від накопичувача енергії і починають працювати за навантаження, яке перевищує 50 % номінального.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Практична значимість роботи полягає в розроблених математичних моделях руху поїзда та процесів енергетичного обміну в тяговому електроприводі, які можна застосувати для дослідження тягових електроприводів транспортних засобів різного призначення.

Висновки

У статті запропоновано структуру тягового багатодвигунного електропривода з накопичувачем енергії електровоза для кар'єрного залізничного транспорту. Шляхом математичного моделювання обґрунтовано доцільність застосування тягового електропривода із запропонованою структурою для циклу роботи «порожній

напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження».

Визначено параметри основних компонент тягового електропривода. Для електровоза ПрАТ «Полтавський ГЗК» робоча енергоємність накопичувача енергії становить 250 кВт·год за потужності 6 000 кВт. Це забезпечує автономний хід електровоза в разі маневрування під час навантаження та розвантаження, а також найповніше використання енергії рекуперації.

Подальші дослідження запропонованого тягового електропривода пов'язані з розробкою енергоефективних алгоритмів керування процесами енергетичного обміну між його компонентами та системою тягового енергопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дриженко А. Ю. *Відкриті гірничі роботи*. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. 590 с.
2. Павлище В. Т. *Основи конструювання та розрахунків деталей машин* : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 556 с.
3. Рябов Є., Мосін С., Овер'янова Л., Кондратьєва Л., Демидов О., Гулак С. Оцінка технічних параметрів локомотива для залізничного кар'єрного транспорту. *Транспортні Системи і Технології*. 2022. № 39. С. 83–100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>
4. Слащов В. А. *Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті* : навч. посібник для вузів. Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2005. 232 с.
5. Ципленков Д. В., Іванов О. Б., Бобров О. В., Кузнецов В. В., Артемчук В. В., Баб'як М. О. *Проектування електричних машин* : навч. посіб. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 408 с.
6. Andryushchenko A., Kolpahchyan P., Zarifyan A. Reduction of Electric Locomotive's Energy Consumption by Scalable Tractive Power Control. *Transport Problems*. Vol. 13. Iss. 2. P. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.10>
7. Bhatnagar P. *Benefits of Using the 1700V and 3300V High Power Modules for Traction Applications*. URL: <https://cutt.ly/mVFswLa>
8. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard energy storage in rail transport : Review of real applications and techno-economic assessments. *IET electrical systems in transportation*. 2021. Vol. 11. Iss. 4. P. 279–309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>
9. *FLXdrive battery electric locomotive at a glance*. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/flxdrive>
10. Liang H., Wenqing M., YuLiang W., Yongcan L., Xiangyu F., Yan J. Experimental Study of the PWM Control Strategy for SiC Traction Inverter of Metro Vehicles. *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc49601.2020.9330853>
11. Lin C., Cheng X. A traction control strategy with an efficiency model in a distributed driving electric vehicle. *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/261085>
12. *Matlab*. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
13. Mazzone A., Schönbacher M., Larrea X. Future Freight Locomotives in Shift2Rail – Development of Full Electric Last Mile Propulsion System. *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018* (Vienna, 16-19 April 2018). Vienna, Austria, 2018. P. 1–10.
14. Pirouz H. M. A New Multi-Motor Traction Drive for Rail Vehicles with On-Board Braking Energy Saver. *2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pedstc49159.2020.9088435>
15. Rasul M., Patel A., Cole C., Sun Y., Spiraygin M., Godber T., Hames S. Train motive power technologies : a review on existing and emerging (hybrid) technologies. *10th World Congress on Railway Research (WCRR2013)*. 2013. P. 1–12.

16. Schmidt E., Müllner F., Neudorfer H. Additional Losses of Inverter Fed Asynchronous Induction Machines of Traction Drives – Comparison of Modelling and Measurements. *Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS)*. 2011. P. 1–5.
17. Voytenko V. A., Vodichev V. A., Kalinin A. G. Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport. *Problemele energeticii regionale*. 2019. № 1-2 (41S). P. 95–106.
18. Xu S., Wei L., Zhang X., Bai Z., Jiao Y. Research on Multi-Mode Drive Optimization Control Strategy of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles with Multiple Motors. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 12. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127378>
19. Yun S., Yi K., Cheon S., Yoon Y. Development of a Motor Torque Distribution Strategy of Six-wheel-Driven Electric Vehicles for Optimized Energy Consumption. *SAE Technical Paper Series*. 2013. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1746>

Y. S. RIABOV^{1*}, L. Y. KONDRATIEVA², L. V. OVERIANOVA³, B. K. YERITSYAN⁴,
S. O. HULAK⁵

^{1*}Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 3021454, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail kondratieva.lilia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2788-9116

³Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail overanova@ukr.net, ORCID 0000-0002-4827-572X

⁴Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail bagish_ericjan@ukr.net, ORCID 0000-0003-0579-3882

⁵Dep. «Electromechanics and Rolling Stock of Railways», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 9, Kyiv, 04071, Ukraine, tel. +38 (096) 563 12 53, e-mail sgoolak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2294-5676

Justification of the Structure of the Electric Traction Drive of the Electric Locomotive for Railway Quarry Transport

Purpose. The study is aimed at substantiating the structure and determining the main parameters of the traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport, taking into account its modes of operation. **Methodology.** The research was carried out by means of mathematical modeling, which included solving the traction problem and evaluating the parameters of the energy exchange processes between the components of the traction electric drive. The simulation was carried out for the movement of the train along the track section and during shunting, which differ significantly in their mathematical description. During simulation of movement along the track section, the traction problem was solved using recommendations for traction calculations for train operation. A simplified model was developed to simulate movements during shunting. Determination of the parameters of the traction electric drive components is carried out by analyzing the processes of energy exchange in the traction electric drive based on the power balance. During the studies, it was assumed that the on-board energy storage in the traction mode feeds the traction electric motors of the booster section. In the electrodynamic braking mode, the energy accumulator stores energy from all traction electric motors of the electric locomotive. **Findings.** The authors obtained time dependences of the parameters that characterize the train movement at all stages of the cycle «empty half passage – loading – loaded half passage – unloading» (on the example of an electric locomotive for PJSC «Ferrexpo Poltava Mining»). The analysis of the obtained dependencies made it possible to determine the parameters of the main components of the traction electric drive for the proposed storage operation scenario. It was established that the energy capacity of the energy storage should be 250 kWh for one movement cycle. The energy storage power is 6000 kW. **Originality.** The authors of this paper for the first time proposed the structure of the traction electric drive of an electric locomotive for quarry railway transport, in which the electric motors of the control electric locomotive are powered from the catenary network, and the electric motors of the booster section are powered from the energy accumulator and are included in the operation at a load that exceeds 50% of the nominal one. **Practical value.** The practical value lies in the developed mathematical models of movement and energy exchange processes, which can be applied to the study of traction electric drives of vehicles of various purposes.

Keywords: quarry railway transport; electric locomotive; traction electric drive; energy storage; traction task

REFERENCES

1. Dryzhenko, A. Yu. (2014). *Vidkryti hirnychi roboty*. Dnipropetrovsk: NHU. (in Ukrainian)
2. Pavlyshche, V. T. (1993). *Osnovy konstruiuvannya ta rozrakhunok detalei mashyn*: pidruchnyk. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
3. Riabov, I., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Goolak, S. (2022). Evaluation of the technical parameters of the locomotive for railway quarry transport. *Transport Systems and Technologies*, 39, 83-100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9> (in Ukrainian)
4. Slashchov, V. (2005). *Tjaghovi ta ghaljmovi rozrakhunky na rejkovomu transporti: navchalnyj posibnyk dlja vuziv*. Luhansk: SNU im. V. Dalja. (in Ukrainian)
5. Tsyplenkov, D. V., Ivanov, O. B., Bobrov, O. V., Kuznetsov, V. V., Artemchuk, V. V., & Babiak, M. O. (2020). *Proiektuvannya elektrychnykh mashyn: navchalnyj posibnyk*. Dnipro: NTU «DP» (in Ukrainian)
6. Andryushchenko, A., Kolpachyan, P., & Zarifyan, A. (2018). Reduction of Electric Locomotive's Energy Consumption by Scalable Traction Power Control. *Transport Problems*, 13(2), 103-110. (in English)
7. Bhatnagar, P. *Benefits of Using the 1700V and 3300V High Power Modules for Traction Applications*. Retrieved from <https://cutt.ly/mVFswLa> (in English)
8. Fedele, E., Iannuzzi, D., & Del Pizzo, A. (2021). Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET electrical systems in transportation*, 11(4), 279-309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026> (in English)
9. *FLXdrive battery electric locomotive at a glance*. Retrieved from <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/flxdrive> (in English)
10. Liang, H., Wenqing, M., YuLiang, W., Yongcan, L., Xiangyu, F., & Yan, J. (2020). Experimental Study of the PWM Control Strategy for SiC Traction Inverter of Metro Vehicles. In *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-5). DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc49601.2020.9330853> (in English)
11. Lin, C., & Cheng, X. (2014). A traction control strategy with an efficiency model in a distributed driving electric vehicle. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/261085> (in English)
12. *Matlab*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (in English)
13. Mazzone, A., Schönbacher, M., & Larrea, X. (2018). Future Freight Locomotives in Shift2Rail—Development of Full Electric Last Mile Propulsion System. In *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018* (pp. 1-10). Vienna, Austria. (in English)
14. Pirouz, H. M. (2020). A New Multi-Motor Traction Drive for Rail Vehicles with On-Board Braking Energy Saver. In *2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1109/pedstc49159.2020.9088435> (in English)
15. Rasul, M., Patel, A., Cole, C., Sun, Y., Spiriyagin, M., Godber, T., & Hames, S. (2013). Train motive power technologies : a review on existing and emerging (hybrid) technologies. In *10th World Congress on Railway Research (WCRR2013)* (pp. 1-12). (in English)
16. Schmidt, E., Müllner, F., & Neudorfer, H. (2011). Additional Losses of Inverter Fed Asynchronous Induction Machines of Traction Drives - Comparison of Modelling and Measurements. In *Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS)* (pp. 1-5). (in English)
17. Voytenko, V. A., Vodichev, V. A., & Kalinin, A. G. (2019). Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport. *Problemele energeticii regionale*, 1-2(41S), 95-106. (in English)
18. Xu, S., Wie, L., Zhang, X., Bai, Z., & Jiao, Y. (2022). Research on Multi-Mode Drive Optimization Control Strategy of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles with Multiple Motors. *Sustainability*, 14(12), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127378> (in English)
19. Yun, S., Yi, K., Cheon, S., & Yoon, Y. (2013). Development of a Motor Torque Distribution Strategy of Six-wheel-Driven Electric Vehicles for Optimized Energy Consumption. *SAE Technical Paper Series*, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1746> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.02.2022

Прийнята до друку: 10.06.2022

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 656.25:656.216.2

М. Б. КУРГАН^{1*}, Д. М. КУРГАН², М. А. ГУСАК³, М. О. ГАВРИЛОВ⁴,
О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ⁵

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

³Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта marka2410@gmail.com, ORCID 0000-0001-8187-7792

⁴Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

⁵Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

Оцінка безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні

Мета. Основною метою нашої статті є оцінка стану безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні, а також розробка заходів щодо підвищення безпеки руху. У зв'язку з тим, що оцінка ступеня безпеки дорожнього руху на залізничних переїздах є одним із головних завдань як дорожньої експлуатаційної служби, так і служб залізничного транспорту, доцільно впровадити систему оцінки рівня безпеки для виявлення небезпечних ділянок і впровадження заходів із поліпшення умов руху на них. **Методика.** Для отримання вихідних даних і методики оцінки стану безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні автори провели огляд світової літератури за темою дослідження. На основі аналізу різних методичних підходів було обрано метод підсумкового коефіцієнта аварійності, який дає змогу оцінити стан безпеки в результаті проведеної модернізації чи нових проєктних рішень, тобто в умовах відсутності даних про ДТП. **Результати.** З'ясовано, що за величиною підсумкового коефіцієнта аварійності залізниці переїзди можна віднести до одного з чотирьох класів: безпечні, малобезпечні, небезпечні, дуже небезпечні. Досліджено питання зниження ризику аварійності у випадку взаємодії залізничного й автомобільного транспорту. **Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку наукові підходи до оцінки безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні з обчисленням коефіцієнтів аварійності та показників безпеки на основі даних підсистеми «АІС Переїзд», яку впроваджують на залізницях України. **Практична значимість.** Отримані результати будуть корисні для проведення заходів із підвищення безпеки руху транспорту на залізничних переїздах, особливо на напрямках упровадження швидкісного руху поїздів. Застосування автоматизованої інформаційної підсистеми «АІС Переїзд» дозволить без додаткових трудових витрат за методом підсумкового коефіцієнта аварійності оцінювати безпеку руху залізничного й автотранспорту в зоні залізничних переїздів.

Ключові слова: залізничний переїзд; безпека руху; дорожньо-транспортна пригода (ДТП); автоматизована інформаційна підсистема «АІС Переїзд»; метод підсумкового коефіцієнта аварійності

Вступ

Безпека дорожнього руху сьогодні є головним елементом розвитку суспільства. Міжнародне співтовариство приділяє значну увагу розробленню та втіленню практичних заходів

з безпеки дорожнього руху, спрямованих на запобігання дорожньо-транспортному травматизму.

Основним політичним документом у галузі безпеки дорожнього руху є політична заява, ухвалена Організацією Об'єднаних Націй

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

10 жовтня 2019 р., щодо концентрації дій та досягнень у галузі безпеки дорожнього руху в рамках наступного десятиліття до 2030 року.

Безпека руху на залізничному транспорті – це складний комплекс проблем, пов'язаних із рухомим складом, автоматизацією керування рухом, а також системою сигналізації та інфраструктури. Залізничний транспорт створює багато потенційних ризиків. Залізничні переїзди, на яких автомобільні дороги перетинаються із залізницями в одному рівні являють собою місця, де виникають і можуть виникнути небажані наслідки як для автомобільного, так і залізничного руху.

Залізничні переїзди на цьому етапі слід сприймати як необхідність і вживати всіх доступних заходів, щоб зменшити негативні наслідки. На них порушується безперервність руху автотранспорту, а в ряді випадків і залізничного транспорту, що призводить до підвищеного енергоспоживання, забруднення довкілля, втрат часу пасажирів і персоналу, збільшення часу на перебування в рейсі рухомого складу, зниження пропускної спроможності. До негативних наслідків також належать витрати на утримання залізничного переїзду та витрати на деякі інвестиційні проекти. Очевидно, що проблем, пов'язаних із залізничними переїздами, багато, але головна полягає у стійкому керуванні безпекою дорожнього руху. Стійке керування транспортною системою в умовах невизначеності та невідповідної дорожньої інфраструктури є відповідальним і складним завданням. У зв'язку з вищевикладеним потрібно постійно вживати певних заходів для зведення цієї небезпеки до мінімуму.

Постановою Кабінету Міністрів України від 21 грудня 2020 р. № 1287 затверджена Державна програма підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2023 року. Метою Програми є зниження рівня аварійності та ступеня тяжкості наслідків дорожньо-транспортних пригод відповідно до цілей, визначених Стратегією підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року. У ній передбачено заходи з підвищення безпеки дорожнього руху на залізничних переїздах, зокрема, ліквідація перетинів доріг і залізничних колій в одному рівні в місцях концентрації дорожньо-транспортних пригод

і на дільницях пришвидшеного руху поїздів, із будівництвом автомобільних шляхопроводів (тунелів) на перетині із залізничними коліями.

Територією України пролягає сім транспортних коридорів загальною довжиною 5,27 тис. км. Це міжнародні транспортні коридори: № 3 Берлін – Вроцлав – Львів – Київ; № 5 Венеція – Трієст – Любляна – Будапешт – Ужгород – Львів; № 9 Гельсінкі – Москва – Київ – Кишинів – Бухарест – Александрополіс. Національні транспортні коридори: Балтійське море – Чорне море; Європа – Азія; Чорноморське Економічне Співробітництво; Євразійський. «Вузкими місцями» в транспортних коридорах є велика кількість переїздів через залізниці, а також відсутність об'їзних доріг у деяких містах України.

Мета

Основною метою нашої статті є оцінка стану безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги та залізниці в одному рівні, а також розробка заходів щодо підвищення безпеки. Оскільки оцінка ступеня безпеки дорожнього руху на залізничних переїздах є одним із головних завдань як дорожньої експлуатаційної служби, так і служб залізничного транспорту, доцільно впровадити систему оцінки рівня безпеки для виявлення небезпечних ділянок.

Методика

Для зниження кількості аварій та підтримання рівня безпеки на залізничних переїздах в різних країнах були проведені численні дослідження. 1999 р. в Австрії була сформована проектна група, на яку покладалося завдання створення технічних засобів і рекомендацій щодо оцінки й нагляду за роботою переїздів, а також створення бази даних залізничних переїздів. Пізніше, на засіданні Австралійської транспортної ради (АТС) у травні 2003 року, був прийнятий інноваційний метод оцінки ризиків. Наразі у всіх австралійських штатах і в Новій Зеландії застосовують дорожню модель ALCAM. Вона складається з трьох окремих компонентів: моделі інфраструктури, моделі експозиції та моделі наслідків. У поєднанні

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ці три компоненти утворюють унікальний показник ризику для кожного переїзду [28].

Представляють інтерес напрацювання Групи експертів із підвищення безпеки на залізничних переїздах у країнах-членах ЄЕК ООН та інших обраних країнах [8], що було пов'язано з відсутністю уніфікованих визначень і методів. Результати опитування показали, що всі 22 країни-респонденти визнають людський фактор як основну причину аварій на залізничних переїздах. З'ясовано, що технічні рішення мають обмежене застосування через фінансову неможливість заміни всіх переїздів естакадними чи підземними переходами або встановлення сучасного обладнання для попередження чи виявлення небезпеки, коли до переїзду наближається поїзд.

До аналогічного висновку дійшли автори в роботі [26]. За допомогою анкет і візуального огляду вони визначили ризики безпеки та небезпечні події на деяких залізничних переїздах транзитного маршруту Аддис-Абеба (AA–LRT) північ–південь (N–S). Виявлені ризикові події були класифіковані на основі принципу ALARP та загальної матриці рейтингу ризиків. Результати дослідження показали, що близько 22 % небезпек, визначених за категоріями, пов'язані з людським фактором, тоді як 20 % викликані технічними причинами.

На залізничних переїздах Нової Зеландії спочатку застосовували австралійську модель оцінки аварійних переїздів ALCAM, яку вважають однією з найкраще розроблених моделей залізничних переїздів на міжнародному рівні. Але й вона має свої обмеження, якщо її використовують окремо. ALCAM недостатньо детально враховує вплив на безпеку, яку створює навколишня транспортна мережа [29]. Враховуючи це у Новій Зеландії запровадили нову систему оцінки ризику – модель LCSS [21], у якій для отримання об'єктивної інформації про залізничні переїзди розглядають три додаткові показники, пов'язані з ризиком аварій: історичні дані про аварії та інциденти, спостереження за безпекою руху, а також оцінку впливу наявної схеми залізничного переїзду та її взаємодії з навколишньою транспортною мережею. Такий підхід допомагає визначити, чи потрібно оновлювати наявні залізничні переїзди.

Залізничні переїзди (RLC) є серйозною проблемою безпеки на міжнародному рівні. У Європі залізничних переїздів понад 100 000, у Північній Америці – понад 200 000. У середньому щороку близько 400 осіб у Європейському Союзі та понад 300 у США гинуть унаслідок аварій на залізничних переїздах. Безперервна професіоналізація керування безпекою на європейських залізницях не завжди дає бажаний ефект зниження ризику до допустимого рівня. Прикладом є безпека на залізничних переїздах у Польщі. Для вирішення цієї проблеми в роботі [17] запропоновано нову модель систем безпеки, яка допомагає зрозуміти відношення між елементами системи безпеки, функціями безпеки, небезпеками та їх джерелами.

Підвищення безпеки на RLC залишається важливим соціальним завданням як у Європейському Союзі, так і в інших країнах світу. У роботах [12, 19] запропоновано новий підхід до оцінки безпеки на RLC із використанням нерадіальної моделі DEA (аналізу оболонки даних) на прикладі залізниць Словенії. Для перевірки достовірності модифікованої нерадіальної моделі DEA було проведено аналіз чутливості. Результати аналізу вказали на деякі недоліки нерадіальної моделі DEA, пов'язані з відсутніми та неточними даними, кількістю включених змінних та вибором вхідних і вихідних даних. Запропонована у статті модифікована нерадіальна модель DEA з повним набором даних може бути використана для оцінки ефективності підвищення безпеки на RLC.

Мета дослідження [22] полягала в тому, щоб розробити автоматизовану систему залізничних переїздів, яка знизить імовірність зіткнення поїздів з учасниками дорожнього руху. Спеціально розроблена система захисту залізничних переїздів, вважають автори, є економічно ефективною, зручною й безпечною та найкраще підходить для впровадження на залізниці.

Однорівневі перетини автомобільних доріг та залізниць (HRGC) є критичними просторовими об'єктами, що мають першорядне значення для безпеки руху транспорту. Використовуючи національну базу даних про HRGC та дані про аварії за 5 років в Оклахомі (штат на південному заході США), автори [30] розробили керований процес ієрархічної оцінки HRGC з розподілом на класи, який передбачає чотири

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

рівні аналізу: практичні рекомендації, індекс небезпеки, ранжування, аналіз безпеки та повний інвестиційний аналіз. У роботі [9] розглянуто залізничні переїзди в Боснії та Герцеговині на ділянці Шамац–Добой. Сформовано п'ятнадцять різних показників, які поділено на три групи: критерії безпеки, характеристики експлуатації автомобільних доріг та характеристики експлуатації залізниць. Для визначення критеріїв значущості сформовано нову інтегровану нечітку модель FUCOM. Результати показали, що переїзди LC4 і LC8 є найбільш безпечними за всіма 15 критеріями. Автори запропонували заходи щодо забезпечення стійкої роботи залізничної системи.

Метою дослідження [11] став аналіз ризиків, пов'язаних із переїздами автомобільних доріг (HRC), й оцінка попередніх досліджень, проведених у США та Канаді. Щоб зменшити частоту аварій і тяжкість травм, було розглянуто моделі, які часто використовують для автомобільної та залізничної мережі. Порівняння моделей виконано з урахуванням: основних характеристик залізниці, які впливають на ймовірність ДТП на переїздах (швидкість поїзда, кількість залізничних колій і їхній стан, кількість поїздів за добу, геометричні параметри залізниці, помітність поїзда); дорожніх факторів (стан дорожнього полотна, геометричні параметри автодороги, тип транспортного засобу, інтенсивність дорожнього руху, кількість смуг, тип і ширина дорожнього покриття, освітленість тощо); факторів навколишнього середовища (погодні умови, умови освітлення, час доби та пора року); людських чинників (стать, вік, рівень кваліфікації й реакції водія). У цьому контексті слід зазначити, що людський фактор вивчено недостатньо, хоча він є одним із найважливіших і може суттєво вплинути на безпеку.

Зіткнення учасників дорожнього руху і поїздів на залізничних переїздах (RLC) залишається складною проблемою. Автори [25] провели систематичний пошук і виявили 88 досліджень, опублікованих за 30-річний період – із 1989 по 2019 рік. Ці дослідження по класифіковано за типом вимірюваного або проаналізованого результату: частота й тяжкість аварій; небезпечна та невідповідна поведінка учасників дорожнього руху; сприйняття ризику, ставлення та переконання учасників дорожнього руху.

Фактори, що впливають на ризик під час RLC, по класифіковано за допомогою техніки відображення нещасних випадків і системного аналізу. Установлено, що більшість факторів, виявлених під час досліджень, стосуються фізичних характеристик самого переїзду, його функціонування, а також поведінки та характеристик учасників дорожнього руху. Виявлено, що взаємодіям між факторами приділено недостатньо уваги. На додаток до людських і соціальних витрат ці події тягнуть за собою істотні економічні збитки.

У роботі [16] зазначено, що в Новій Зеландії за наявності майже 1 400 залізничних переїздів загального користування по всій країні реконструктивні заходи потребують значних ресурсів та довгострокової програми. Комісія визнає прогрес, якого досягло транспортне агентство Waka Kotahi NZ та KiwiRail у виконанні рекомендацій, у тому числі введення Посібника з оцінки впливу на безпеку залізничних переїздів, який допомагає визначити, чи потрібно модернізувати залізничні переїзди, чи потрібне відповідне вдосконалення. Указано, що в Ново-зеландському залізничному плані, опублікованому у травні 2021 року, підвищення безпеки залізничних переїздів визначено як пріоритет для інвестицій у наступне десятиліття.

Переїзди стали головною темою для Управління залізниць і доріг (ORR) Великобританії. У роботі [24] наголошено, що на більш ніж 7 000 залізничних переїздів у Великобританії не існує універсального підходу до безпеки, кожен із них є унікальним, а тому слід упроваджувати інновації, що підвищують безпеку їх перетинання. Принципи ORR із керування безпекою покликані знизити ризики шляхом розгляду альтернатив залізничним переїздам, а там, де це практично неможливе, шляхом їх реконструкції.

Проведений в останні роки статистичний аналіз аварій на Литовських залізницях показав, що близько 30 % із них відбувається саме на залізничних переїздах. У статті [10] наведено оцінку рівня безпеки на залізничних переїздах із врахуванням таких технічних критеріїв, як категорія перетину, видимість, інтенсивність руху поїздів та автомобільного транспорту, ширина залізничного переїзду й максимальна швидкість поїздів. За допомогою бінарної мо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

делі логістичної регресії розраховано ймовірність аварій на 337 залізничних переїздах Литви.

У [27] на основі представленої бази даних країн ERA показано, що технічні рішення мають обмежене застосування, а тому для поліпшення інформування про наближення поїздів та для інформування водіїв автотранспортних засобів рекомендовано використовувати супутникову радіонавігаційну систему (Global Position System), яка забезпечує високоточне визначення координат і швидкості об'єктів, а також точне визначення часу.

Науковий інтерес представляє визначення затримок транспортних засобів, вантажів і пасажирів на переїздах, які є бар'єрними місцями на напрямках міжнародних транспортних коридорів [3]. Під час проведення модернізації залізничної колії потрібно виконувати роботи з постановки осі колії в проектне положення в профілі й плані, ремонт або перевлаштування переїздів. Це пов'язано з тим, що в зонах переїзду виникають вертикальні й горизонтальні нерівності колії. Якщо вони й не створюють небезпеки для руху поїздів, то впливають на плавність руху та знижують рівень комфортабельності їзди [5]. Через відсутність достатнього фінансування та інші об'єктивні причини вищезазначені роботи не виконують у повному обсязі, що впливає на плавність й безпеку руху поїздів. Аналіз проектів капітальних ремонтів і модернізації колії, а також натурні спостереження показали, що на підходах у зоні розташування переїздів виникають нерівності в плані, так звані «злами». Моніторинг розвитку нерівностей колії в зоні переїзду та аналітичні обґрунтування зміни характеристик напружено-деформаційної роботи колії в місці укладання переїзду наведено в роботах авторів [4].

Короткий огляд наукових праць мав на меті визначити основні фактори та їх вплив на ризики безпеки на залізничних переїздах в багатьох країнах.

У роботі [7] проаналізовано динаміку дорожньо-транспортних подій та проведено аналіз стану травматизму на залізничних переїздах України за останні роки, розглянуто питання зниження ризику аварійності в разі взаємодії різних видів транспорту. На жаль, найбільша кількість ДТП щороку трапляється на переїз-

дах, переважно через недотримання водіями правил безпеки руху, що пов'язані з ліквідацією наслідків транспортних подій, усуненням можливих загроз та іншими заходами. В Україні, у середньому, кожна четверта ДТП на залізничних переїздах – із летальним наслідком (на мережі доріг 1 загиблий на 30 ДТП). Небезпеки зазнають водії та пасажирів автотранспорту, а також пасажирів поїздів, члени локомотивних бригад, провідники та інший персонал, який перебуває як в поїздах, так і поза їх межами. Загроза суттєво збільшується під час перевезення небезпечних вантажів через можливі катастрофічні наслідки. Матеріальні збитки від транспортних подій, допущених 2020 року, становили 14,63 млн грн, що є найбільшим показником за останні три роки.

2020 року на залізничних переїздах і коліях поза переїздами регіональних філій АТ «Укрзалізниця» сталося 59 випадків ДТП, у тому числі 50 випадків на переїздах і 9 на коліях поза переїздами. Унаслідок ДТП загинуло 8 осіб і 31 травмовано (табл. 1). Порівняно з 2019 роком загальна кількість ДТП скоротилась з 70 до 59 [2]. Найбільше випадків ДТП виникало на переїздах без чергового, обладнаних сигналізацією, де сталося 35 випадків зіткнень автотранспортних засобів із рухомим складом залізниць. У цих ДТП загинуло 6 осіб і травмовано 23.

Таблиця 1

**ДТП на залізничних переїздах і коліях
із 2019 по 2021 рр., од.**

Table 1

**Road accidents at railway crossings and tracks
from 2019 to 2021, unit**

Роки	Назва події			
	ДТП на переїздах	ДТП поза переїздами	Загинуло	Травмовано
2019	60	10	15	25
2020	50	9	8	31
2021	70	7	11	24

Результати аналізу аварійності на залізничних переїздах наведено в табл. 2, із якої випливає, що кількість переїздів 1 км найменша в Україні порівняно зі США та європейськими

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

країнами, а кількість аварій, що сталися на переїздах, найбільша саме в Україні. Такі результати дають привід до застосування додаткових пристроїв або до перетину залізниць з автодорогами на різних рівнях.

Проблема ДТП на залізничних переїздах є актуальною і за межами нашої держави. Так, у табл. 2 наведено інформацію про стан аварійності на залізничних переїздах Сполучених Штатів Америки (за даними Федеральної адміністрації залізничного транспорту (FRA)) [15, 23].

У США нараховується близько 210 тисяч перетинів автомобільних доріг із залізничними коліями в одному рівні, із них тільки 46 тисяч обладнані шлагбаумами. У табл. 2 наведена для порівняння інформація про стан аварійності на залізничних переїздах Німеччини, Великобританії і країн Європи EU–28 за даними Європейської асоціації ERA [13, 14].

Таблиця 2

Стан аварійності на залізничних переїздах

Table 2

Accident rate at railway crossings

Країна	Кількість переїздів	Експлуатаційна довжина залізниць, км	Кількість переїздів на 1 км	Кількість ДТП	Кількість аварій на 100 переїздів
США	209 771	293 564	0,715	1 914	0,912
Німеччина	15 758	43 468	0,363	66	0,419
Великобританія	6 651	17 732	0,375	11	0,165
EU–28	115 384	236 000	0,489	581	0,504
Україна	4 945	19 800	0,250	84	1,699

За даними Британського відомства з безпеки і стандартизації на залізницях (Rail Safety & Standards, RSSB), найпоширенішими причинами зіткнень різних видів транспорту є помилки водіїв автомобілів (63 %), порушення водіями правил – об'їзд закритих шлагбаумів (21 %) [20]. Інші 16 % розподіляються таким чином: поломки і відмови автомобілів (5 %), погодні умови (4 %), помилки машиніста потяга (3 %), помилки персоналу, що обслуговує переїзд (3 %), і відмови пристроїв сигналізації переїзду (1 %).

На залізницях України сьогодні експлуатують 4 945 залізничних переїздів, із яких 2 343 – з автобусним рухом; 1 290 – із черговим працівником; 1 262 – обладнані пристроями автоматики, у тому числі 383 переїзди обладнані чотирма шлагбаумами, які забезпечують разом з основними шлагбаумами повне перекриття проїзної частини автодороги [5].

Цікавими для аналізу можуть бути дані щодо кількості переїздів на 1 км розгорнутої довжини колії в регіональних філіях Укрзалізниці (рис. 1).

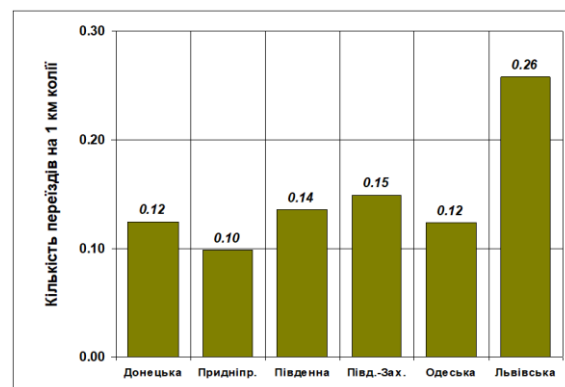


Рис. 1. Кількість переїздів на 1 км залізничної колії

Fig. 1. Number of crossings per 1 km of railway track

Із рис. 1 бачимо, що найбільша кількість переїздів на мережі регіональної філії «Львівська залізниця», найменша кількість – на мережі Придніпровської залізниці.

Практично всі методи виявлення та оцінки небезпечних місць базуються на статистичних даних кількості ДТП. Основними методами, які використовують на практиці, є: метод оцінки за допомогою балів, метод конфліктних си-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

туацій, метод коефіцієнтів пригод, метод коефіцієнтів аварійності, метод аналізу статистичних даних на основі теорії ймовірності [18].

Одним з найдавніших методів є комплексна оцінка за допомогою балів [1]. За цим методом умови безпеки оцінюються сумою балів, які враховують характеристики залізничної й автодороги в місці перетину, наявну інфраструктуру, ширину покриття та узбіч, радіуси кривих у плані, умови забезпечення видимості, рівність покриття, облаштування перетинів світлофорами тощо. Для кожного з цих елементів розроблено шкалу балів зі значеннями від 1 до 10. Причому значення бала 10 відповідає сприятливим умовам руху.

Однак комплексна оцінка доріг за допомогою балів, які не завжди пов'язані один з одним та з вимогами до дороги, є умовною. Також неправильно їх об'єднувати в одному показнику, оскільки вони можуть суперечити один одному. Так, наприклад, підвищена міцність дорожнього покриття не може компенсувати наявності на дорозі небезпечних місць з умов видимості в плані.

Практика показує, що поліпшення комфортності руху шляхом улаштування удосконаленого покриття на дорозі з несприятливими елементами плану траси або поздовжнього профілю, як правило, спричиняє збільшення кількості ДТП. Отже, оцінка дороги для умов безпеки руху за допомогою балів є коректною тільки щодо порівняння окремих, близьких за параметрами ділянок. Тому використання цього методу зараз обмежене [18].

За досить детальної обробки важливих технічних питань (розміщення переїздів, їх облаштування технічними пристроями, забезпечення безпеки руху на переїзді засобами сигналізації тощо) більшість економічних аспектів проблеми залишаються недостатньо вивченими.

Автори розкривають різні аспекти влаштування й роботи залізничного переїзду, але при цьому все одно залишають невирішеними багато питань і дискусій щодо однорівневих перетинів.

Окремі питання в цій сфері потребують подальшого обговорення та вдосконалення, а саме:

– система оцінки рівня безпеки на залізничних переїздах;

– створення в АТ «Укрзалізниця» автоматизованої інформаційної підсистеми «АІС Переїзд»;

– заміна небезпечних переїздів шляхопроводами.

Результати

Доцільно впровадити систему оцінки рівня безпеки на залізничних переїздах, яка на сьогоднішній час, відсутня в нормативних документах для залізничного транспорту України і яка необхідна для виявлення небезпечних ділянок і розробки заходів щодо поліпшення умов руху на них.

На магістральному залізничному транспорті України практично всі методи виявлення та оцінки небезпечних місць базуються на статистичних даних щодо кількості ДТП. Укравтодор запропонував чинну до сьогодні Методику оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України М 218–03450778–652:2008 [6], згідно з якою оцінювання рівнів аварійності проводять за такими показниками: коефіцієнт пригод; коефіцієнт головних статистик розподілу аварійності на ділянках доріг загального користування та частки ДТП, що сталися за умов незадовільного утримання доріг; підсумковий коефіцієнт аварійності.

Для оцінки безпеки руху залізничного транспорту та автотранспортних засобів у зоні залізничних переїздів найдоцільніше використовувати метод підсумкового коефіцієнта аварійності, який проведено модернізацію чи нові проєктні рішення, тобто оцінює безпеку руху в умовах відсутності даних про ДТП. Його величину K_a для залізничного переїзду визначають шляхом перемноження семи коефіцієнтів аварійності:

$$K_a = \prod_{i=1}^7 K_i = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7, \quad (1)$$

де K_1 – коефіцієнт, який враховує добову інтенсивність руху поїздів через переїзд (1,0...8,0); K_2 – коефіцієнт, який враховує добову інтенсивність руху на автомобільній дорозі (0,42...2,05); K_3 – коефіцієнт, який враховує відстань видимості поїзда (із черговим 3,2...0,9); K_4 – коефіцієнт, який враховує устаткування переїзду (із черговим 1,6...9,1); K_5 –

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

коефіцієнт, який враховує штучне освітлення переїзду (1,0...1,5); K_6 – коефіцієнт, який враховує радіус кривої у плані на підходах до переїзду (8,9...1,0); K_7 – коефіцієнт, який враховує поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду (1,0...3,64).

Значення коефіцієнта K_1 визначають за формулою:

$$K_1 = \frac{N_t}{3 + 0,1 \cdot N_t}, \quad (2)$$

де N_t – інтенсивність руху поїздів через переїзд (поїздів/добу).

На жаль, інші коефіцієнти $K_2 \dots K_7$ задано в [6] детерміновано для певного інтервалу, вони мають стрибкоподібний характер. Це впливає на остаточний результат і може привести до різних висновків. Розглянемо конкретний приклад (табл. 3).

Таблиця 3

Вихідні й розрахункові дані

Table 3

Initial and calculation data

Показник	Значення показника		Значення коефіцієнта	
	варіант 1	варіант 2	варіант 1	варіант 2
Інтенсивність руху поїздів через переїзд, поїздів/добу	30	30	$K_1=5,0$	$K_1=5,0$
Інтенсивність руху по автодорозі, авт./добу	1 000	1 001	$K_2=0,55$	$K_2=0,80$
Відстань видимості переїзду та поїзда, м	100	101	$K_3=2,8$	$K_3=2,0$
Обладнання переїзду	автоматична світлофорна сигналізація	автоматична світлофорна сигналізація	$K_4=2,2$	$K_4=2,2$
Штучне освітлення переїзду з черговим	наявне	наявне	$K_5=1,0$	$K_5=1,0$
Радіус кривої в плані на підходах до переїзду, м	200	201	$K_6=1,45$	$K_6=1,0$
Поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду, ‰	50	50	$K_7=2,72$	$K_7=2,42$
Підсумковий коефіцієнт аварійності*	небезпечний	малонебезпечний	$K_a=66,8$	$K_a=47,9$

*За величиною підсумкового коефіцієнта аварійності K_a оцінюють стан руху на залізничному переїзді: до 40 – безпечний; 41...60 – малонебезпечний; 61...80 – небезпечний; більше 81 – дуже небезпечний

За вихідними даними (табл. 3) й формулами, наведеними в Методиці оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України М 218–03450778–652:2008 [6], підсумковий коефіцієнт аварійності K_a дорівнює 66,8 (варіант 1) і 47,9 (варіант 2), тобто в першому випадку переїзд

належить до класу небезпечних, у другому – до класу малонебезпечних.

Відповідно до результатів обчислених значень коефіцієнта аварійності та показника безпеки можна рекомендувати такі заходи щодо підвищення безпеки руху на залізничних переїздах:

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

– для малонебезпечних – забезпечення видимості на переїзді, нанесення ліній розмітки, установлення автоматичної світлофорної сигналізації, збільшення радіуса кривої в плані на автомобільній дорозі, влаштування шорсткої поверхневої обробки на ділянках спусків з ухилом більше 30 %;

– для небезпечних – установлення автоматичних шлагбаумів із сигналізацією, які забезпечують разом з основними шлагбаумами повне перекриття проїзду частини автодороги, нанесення ліній розмітки, збільшення радіуса кривої в плані для автомобільних доріг, влаштування шорсткої поверхневої обробки на ділянках спусків з ухилом більше 30 %, обмеження швидкості руху на підходах до переїзду.

Слід відзначити, що аналогічний підхід застосовують на залізницях інших країн. Так, наприклад, за результатами проведеної оцінки ризику на 337 залізничних переїздах Литовської залізниці виявлено, що 22 залізничні переїзди мають критичне значення ризику, і рекомендовано терміново встановити технічні засоби для підвищення їх безпеки [10]. Для оцінки безпеки залізничних переїздів використано модель логістичної регресії, а критерії оцінки $K_1 - K_7$ визначено аналітично.

Усунути вищевказані недоліки методу підсумкового коефіцієнта можна шляхом використання формул і графіків, наведених на рис. 2–5.

Для оцінки стану безпеки на переїздах АТ «Укрзалізниця» розроблено до автоматизованої системи обліку транспортних подій на залізничному транспорті «АРМ ЦРБ» автоматизовану підсистему про залізничні переїзди «АІС Переїзд».

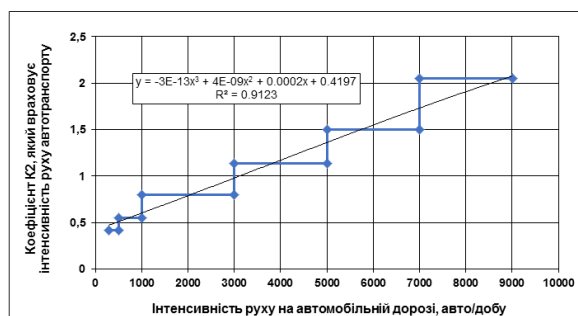


Рис. 2. Коефіцієнт K_2 , який враховує добову інтенсивність руху на автомобільній дорозі

Fig. 2. Coefficient K_2 , which takes into account the daily traffic intensity on the highway

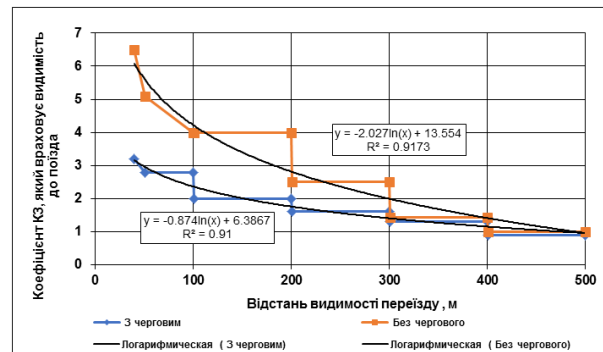


Рис. 3. Коефіцієнт K_3 , який враховує відстань видимості поїзда

Fig. 3. Coefficient K_3 , which takes into account the visibility distance of the train

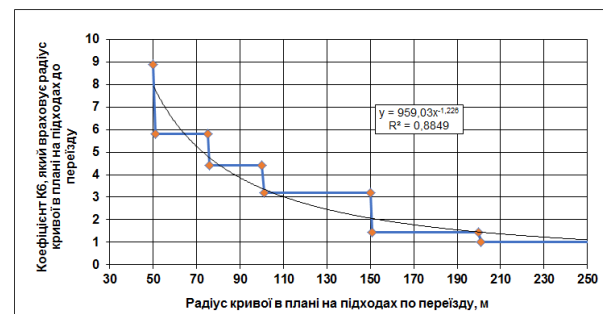


Рис. 4. Коефіцієнт K_6 , який враховує радіус кривої у плані на підходах до переїзду

Fig. 4. Coefficient K_6 , which takes into account the curve radius in the plan on the approaches to the crossing

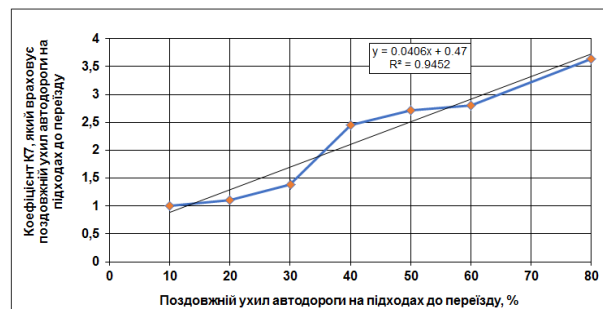


Рис. 5. Коефіцієнт K_7 , який враховує поздовжній ухил автомобільної дороги на підходах до переїзду

Fig. 5. Coefficient K_7 , which takes into account the longitudinal slope of the highway on the approaches to the crossing

Характеристика переїзду містить таку інформацію: категорія переїзду (регульований чи нерегульований), наявність охорони, дані про

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

максимальну швидкість руху пасажирських і вантажних поїздів, кількість залізничних колій, добова кількість поїздів, тип автодороги й інтенсивність руху автотранспорту, що перетинає переїзд, наявність автобусного руху. У паспорті переїзду наводять дані про видимість дороги для машиніста з непарної й парної сторони, видимість для водія колії з двох (протилежних) сторін. Крім того, вказують кут перетину автодороги з залізницею, ухил підходів (непарна й парна сторона), ширину проїзної частини, вид покриття настилу переїзду, вид покриття підходів у зоні й поза зоною обслуговування залізниці, тип сигналізації, наявність місячно-білих миготливих вогнів, термін сповіщення, тип основних і додаткових шлагбаумів, наявність загороджувально-бар'єрного пристрою (ЗБП), наявність зовнішнього освітлення переїзду й відеонагляду.

Наводять також характеристику колії в межах переїзду, рік капітального ремонту переїзду, поздовжній профіль і план (пряма чи крива, радіус кривої, підвищення зовнішньої рейки, поздовжній профіль автодороги, план-схема переїзду).

Наукова новизна та практична значимість

У роботі набули подальшого розвитку наукові підходи до оцінки безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні з обчисленням коефіцієнтів аварійності та показників небезпеки на основі даних підсистеми «АІС Переїзд», яку впроваджують на залізницях України. Отримані результати будуть корисні для проведення заходів із підвищення безпеки руху транспорту

через залізничні переїзди, особливо на напрямках упровадження швидкісного руху поїздів. Застосування автоматизованої інформаційної підсистеми «АІС Переїзд» дозволить без додаткових трудових витрат використовувати метод підсумкового коефіцієнта аварійності й оцінювати безпеку руху залізничного й автотранспорту в зоні залізничних переїздів.

Висновки

1. Оцінювати безпеку руху залізничного й автотранспорту в зоні залізничних переїздів доцільно за допомогою методу підсумкового коефіцієнта аварійності. Він дає змогу врахувати проведену модернізацію та нові проєктні рішення в умовах відсутності даних про ДТП.

2. У методі підсумкового коефіцієнта аварійності коефіцієнти $K_2 \dots K_7$ задають детерміновано для певного інтервалу, вони мають стрибкоподібний характер. Це впливає на остаточний результат і призводить до різних заходів із підвищення безпеки руху на залізничних переїздах.

3. Залежно від результатів обчислених значень коефіцієнта аварійності можуть бути впроваджені різні заходи з підвищення безпеки руху на залізничних переїздах відповідно до класифікації: безпечний, малонебезпечний, небезпечний, дуже небезпечний

4. Упровадження автоматизованої інформаційної підсистеми «АІС Переїзд» на залізницях сприятиме оцінюванню безпеки руху залізничного й автотранспорту в зоні залізничних переїздів за допомогою методу підсумкового коефіцієнта аварійності без додаткових трудових витрат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамова Л. С., Ширин В. В., Птица Г. Г. Анализ методов определения показателей безопасности дорожного движения. *Вестник ХНАДУ*. 2015. № 69. С. 118–123.
2. *Інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця» / Департамент сталого розвитку та внутрішніх комунікацій*. Київ, 2020. 308 с.
3. Курган М. Б., Лужицький О. Ф., Гаврилов М. О. Шляхи зниження аварійності на залізничних переїздах. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2014. № 7. С. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2014/51379>
4. Лужицький О. Ф. Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. *Українські залізниці*. 2016. № 7 (37). С. 52–56.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

5. Курган М. Б., Курган Д. М., Лужицький О. Ф. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних перейздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 5 (59). С. 84–96.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55341>
6. *Методика оцінки рівнів безпеки руху на автомобільних дорогах України : М 218-03450778-652:2008*. [Чинна від 2008-01-01]. Київ : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2008. 49 с.
7. *Україна у цифрах у 2021 році* / відповідальний за випуск О. А. Вишневська. Київ, 2021. 46 с.
8. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. *Informal document SC.2*. 2016. No. 5. P. 1–50.
9. Blagojević A., Kasalica S., Tričković G., Pavelkić V. Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management : A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 2. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832>
10. Bureika G., Komaisko M., Jastremskas V. Modelling the ranking of Lithuanian railways level crossing by safety level. *Transport problems*. 2017. Vol. 12. P. 11–22. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.1>
11. Dezhkam B., Eslami M. A review of methods for highway-railway crossings safety management process. *International electronic journal of mathematics education*. 2017. Vol. 12. Iss. 3. P. 561–568.
DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/632>
12. Djordjević B., Krmac E., Mlinarić T. J. Non-radial DEA model : A new approach to evaluation of safety at railway level crossings. *Safety Science*. 2018. Vol. 103. P. 234–246. DOI: <https://10.1016/j.ssci.2017.12.001>
13. ERAIL. *Safety Indicators*. European Railway Agency. URL: <http://erail.era.europa.eu>
14. European Railway Agency. *European Railway Agency*. URL: <http://www.era.europa.eu>
15. *Federal Railroad Administration. United States Department of Transportation*. URL: <http://www.fra.dot.gov>
16. Final Report Rail inquiry RO-2019-108. *Transport Accident Investigation Commission*.
URL: <https://www.taic.org.nz/inquiry/ro-2019-108>
17. Gill A., Smoczyński P. Layered model for convenient designing of safety system upgrades in railways. *Safety Science*. 2018. Vol. 110. P. 168–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.024>
18. Havryliuk V. I., Voznyak O. M., Meleshko V. V. Improving the positioning accuracy of train on the approach section to the railway crossing. *Science and Transport Progress*. 2016. № 1 (61). P. 9–18.
DOI: <https://10.15802/stp2016/60936>
19. Krmac E., Djordjević B. Evaluation of the levels of safety at railway level crossings using data envelopment analysis (DEA) method : A case study on Slovenian railways. *European Transport – Trasporti Europei*. 2018. Iss. 67. P. 1–9.
20. Knution M. Reducing the risk of accidents at level crossings. *Railways of the world*. 2004. № 9. P. 62–64.
21. Level Crossing Risk Assessment Guidance. *KiwiRail*. 2021. P. 1–78. URL:
<https://www.kiwirail.co.nz/assets/Uploads/documents/Level-Crossing-Risk-Assessment-Guide-2021.pdf>
22. Nkuzimana L., Minja G., Wilfred C. M., Didai M. Automatic Railway Road Crossing (RLC) Traffic Light System for Metric Gauge Railway Network in Tanzania. *International Journal of Scientific Research in Computer Science Engineering and Information Technology*. 2021. Vol. 7. Iss. 11. P. 1–9.
DOI: <https://doi.org/10.31695/ijasre.2021.34099>
23. *Federal Railroad Administration*. URL: <http://safetydata.fra.dot.gov/officeofsafety/>
24. Principles for managing level crossing safety. *Office of Rail and Road*. 2021. P. 1–31.
https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf
25. Read G. J. M., Cox J. A., Hulme A., Naweed A., Salmon P. M. What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. *Safety Science*. 2021. Vol. 138. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207>
26. Sekasi J., Solihu H. Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail. *Smart and Resilient Transportation*. 2021. Vol. 3. Iss. 3. P. 266–282.
DOI: <https://doi.org/10.1108/SRT-08-2021-0007>
27. Summary of the work of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2018–2019. *Economic and Social Council*. 2019. P. 1–19. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3807384?ln=ar>
28. The Australian Level Crossing Assessment. Model ALCAM in Detail. *An Introduction to the new ALCAM models (2014)*. 2016. P. 1–31. URL: <https://alcam.com.au/media/1013/alcam-in-detail-update-august-2016.pdf>
29. Turner S., Cook E., Boshier S. Level Crossing Safety Impact Assessments for Vehicle and Pedestrian Crossings. *Transportation Research Record*. 2021. Vol. 2675. Iss. 9. P. 1482–1492.
DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211007857>

30. Yang X., Li J. Q., Wang K. C. P., Hatt J., Schwenneisen J. Selection of at-grade highway-rail crossings for grade separation. *International Journal of Rail Transportation*. 2022. P. 1–21.
DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2022.2060359>

M. B. KURHAN^{1*}, D. M. KURHAN², M. A. HUSAK³, M. O. HAVRYLOV⁴,
O. F. LUZHITSKYI⁵

^{1*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@gmail.com, ORCID 0000-0002-8182-7709

²Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

³Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail marka2410@gmail.com, ORCID 0000-0001-8187-7792

⁴Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

⁵Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail oleg.luzhickii@gmail.com, ORCID 0000-0001-6519-7447

Vehicle Traffic Safety Assessment at the Intersection of Highways and Railways at the Same Level

Purpose. The purpose of the study is to assess the state of vehicle traffic safety at the intersection of highways and railways at the same level, as well as the subsequent development of measures to improve road traffic safety at railroad crossings. Assessing the degree of road traffic safety at railway crossings is one of the main tasks of both the road operation service and railway transport services. Therefore, it is advisable to implement a system for assessing the level of safety at railroad crossings, which is necessary to identify dangerous areas and develop measures to improve traffic conditions on them. **Methodology.** In order to obtain initial data and methods of assessing the state of vehicle traffic safety at the intersection of highways and railways at the same level, the authors conducted a review of the world literature on the topic of the study, as well as monitoring the safety of vehicle traffic at the intersection of highways with railway tracks. On the basis of the various methodological approaches analysis, the method of the final accident rate was used, which makes it possible to assess the state of safety as a result of the modernization or new design decisions, that is, in the absence of data on road accidents. **Findings.** It was found that according to the final coefficient of railway accident rate, crossings can be classified into one of four classes: safe, low-risk, dangerous, very dangerous. The issue of reducing the risk of an accident at the interaction of railway and road transport has been studied. **Originality.** Scientific approaches to evaluating the safety of vehicle movement at the intersection of highways and railways have gained further development, at the same level as the calculation of accident coefficients and danger indicators based on the data of the AIS Pereizd subsystem, which is being implemented on the railways of Ukraine. **Practical value.** The obtained results will be useful for carrying out measures to increase the safety of traffic through railway crossings, especially in the directions of the introduction of high-speed train traffic. The use of the AIS Pereizd automated information subsystem will allow using the method of the final accident rate and evaluating the safety of rail transport and motor vehicles in the area of railway crossings without additional labor costs.

Keywords: level crossing; traffic safety; traffic accident; AIS Pereizd automated information subsystem; the method of the final accident rate

REFERENCES

1. Abramova, L. S. Shirin, V. V., & Ptitsa, G. G. (2015). Analysis of methods for determining road safety indicators. *Bulletin of KhNADU*, 69, 118-123. (in Russian)
2. *Intehrovanyi zvit AT «Ukrzaliznytsia» / Departament staloho rozvytku ta vnutrishnikh komunikatsii.* (2020). Kyiv. (in Ukraine)
3. Kurhan, M. B., Luzhitskij, O. F., & Gavrillov, M. O. (2014). Ways to reduce accidents at railway crossings. *Electromagnetic compatibility and safety in railway transport*, 7, 53-62.
DOI: <https://doi.org/10.15802/ecstr2014/51379> (in Ukraine)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

4. Luzhytskyi, O. F. (2016). Zabezpechennja bezpeky rukhu na zaliznychnykh perejizdakh. *Ukrajinsjka zaliznycja*, 7(37), 52-56. (in Ukrainian)
5. Kurgan, M. B., Kurgan, D. M., & Luzhytskyi, O. F. (2015). Inequalities research of the track at the railroad crossings. *Science and Transport Progress*, 5(59), 84-96. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55341> (in Ukraine)
6. *Metodyka otsinky rivniv bezpeky rukhu na avtomobilnykh dorohakh Ukrainy: M 218-03450778-652:2008*. (2008). Kyiv, DerzhdorNDI. (in Ukraine)
7. Vyshnevskya, O. A. (Ed.). (2021). *Ukraina u tsyfrakh u 2021 rotsi. Statistical collection. State Statistics Service*. Kyiv. (in Ukraine)
8. Assessment of safety at level crossings in UNECE member countries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings. (2016). *Informal document SC.2, 5*, 1-50. (in English)
9. Blagojević, A., Kasalica, S., Tričković, G., & Pavelkić, V. (2021). Evaluation of Safety Degree at Railway Crossings in Order to Achieve Sustainable Traffic Management: A Novel Integrated Fuzzy MCDM Model. *Sustainability*, 13(2), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832> (in English)
10. Bureika, G., Komaisko, M., & Jastremskas, V. (2017). Modelling the ranking of Lithuanian railways level crossing by safety level. *Transport problems*, 12, 11-22. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.1> (in English)
11. Dezhkam, B., & Eslami, M. (2017). A review of methods for highway-railway crossings safety management process. *International electronic journal of mathematics education*, 12(3), 561-568. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/632> (in English)
12. Djordjević, B., Krmac, E., & Mlinarić, T. J. (2018). Non-radial DEA model: A new approach to evaluation of safety at railway level crossings. *Safety Science*, 103, 234-246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.12.001> (in English)
13. ERAIL. (n. d.). *Safety Indicators. European Railway Agency*. Retrieved from <http://erail.era.europa.eu> (in English)
14. European Railway Agency. (n. d.). *European Railway Agency*. Retrieved from <http://www.era.europa.eu> (in English)
15. *Federal Railroad Administration*. (n. d.). *United States Department of Transportation*. Retrieved from <http://www.fra.dot.gov> (in English)
16. Final Report Rail inquiry RO-2019-108. (n. d.). *Transport Accident Investigation Commission*. Retrieved from <https://www.taic.org.nz/inquiry/ro-2019-108> (in English)
17. Gill, A., & Smoczyński, P. (2018). Layered model for convenient designing of safety system upgrades in railways. *Safety Science*, 110, 168-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.024> (in English)
18. Havryliuk, V. I., Voznyak, O. M., & Meleshko, V. V. (2016). Improving the positioning accuracy of train on the approach section to the railway crossing. *Science and Transport Progress*, 1(61), 9-18. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60936> (in English)
19. Krmac, E., & Djordjević, B. (2018). Evaluation of the levels of safety at railway level crossings using data envelopment analysis (DEA) method: A case study on Slovenian railways. *European Transport-Transporti Europei*, 67, 1-9. (in English)
20. Knutson, M. (2004). Reducing the risk of accidents at level crossings. *Railways of the world*, 9, 62-64. (in English)
21. Level Crossing Risk Assessment Guidance. (2021). *KiwiRail*, 4, 1-78. Retrieved from <https://www.kiwirail.co.nz/assets/Uploads/documents/Level-Crossing-Risk-Assessment-Guide-2021.pdf> (in English)
22. Nkuzimana, L., Minja, G., Wilfred, C. M., & Didai, M. (2021). Automatic Railway Road Crossing (RLC) Traffic Light System for Metric Gauge Railway Network in Tanzania. *International Journal of Scientific Research in Computer Science Engineering and Information Technology*, 7(11), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.31695/ijasre.2021.34099> (in English)
23. *Federal Railroad Administration*. (n. d.). Retrieved from <http://safetydata.fra.dot.gov/officeofsafety/> (in English)
24. Principles for managing level crossing safety. (2021). *Office of Rail and Road*, 1-31. Retrieved from https://www.orr.gov.uk/sites/default/files/2021-06/principles-for-managing-level-crossing-safety-june-2021_0.pdf (in English)
25. Read, G. J. M., Cox, J. A., Hulme, A., Naweed, A., & Salmon, P. M. (2021). What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. *Safety Science*, 138, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207> (in English)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

26. Sekasi, J., & Solihu, H. (2021). Safety and risk analysis at railway crossings of north-south Addis Ababa light rail. *Smart and Resilient Transportation*, 3(3), 266-282. DOI: <https://doi.org/10.1108/SRT-08-2021-0007> (in English)
27. Summary of the work of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2018–2019. (2019). *Economic and Social Council*, 1-19. (in English)
28. The Australian Level Crossing Assessment. Model ALCAM in Detail. (2016). *An Introduction to the new ALCAM models (2014)*, 1-31. Retrieved from <https://alcam.com.au/media/1013/alcam-in-detail-update-august-2016.pdf> (in English)
29. Turner, S., Cook, E., & Bosher, S. (2021). Level Crossing Safety Impact Assessments for Vehicle and Pedestrian Crossings. *Transportation Research Record*, 2675(9), 1482-1492. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981211007857> (in English)
30. Yang, X., Li, J. Q., Wang, K. C. P., Hatt, J., & Schwennesen, J. (2022). Selection of at-grade highway-rail crossings for grade separation. *International Journal of Rail Transportation*, 1-21. DOI: <https://10.1080/23248378.2022.2060359> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.02.2022

Прийнята до друку: 17.06.2022

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 656.2.027:004.65

V. I. SHYNKARENKO^{1*}, L. I. ZHUCHYI^{2*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technologies», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 489 49 15, e-mail shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Dep. «Computer and Information Technologies», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (059) 965 92 36, e-mail larisa_zhuchiy@ukr.net, ORCID 0000-0002-9209-7262

Constructive-Synthesizing Modelling of Ontological Document Management Support for the Railway Train Speed Restrictions

Purpose. During the development of railway ontologies, it is necessary to take into account both the data of information systems and regulatory support to check their consistency. To do this, data integration is performed. The purpose of the work is to formalize the methods for integrating heterogeneous sources of information and ontology formation. **Methodology.** Constructive-synthesizing modelling of ontology formation and its resources was developed. **Findings.** Ontology formation formalization has been performed, which allows expanding the possibilities of automating the integration and coordination of data using ontologies. In the future, it is planned to expand the structural system for the formation of ontologies based on textual sources of railway regulatory documentation and information systems. **Originality.** The authors laid the foundations of using constructive-synthesizing modelling in the railway transport ontological domain to form the structure and data of the railway train speed restriction warning tables (database and csv format), their transformation into a common tabular format, vocabulary, rules and ontology individuals, as well as ontology population. Ontology learning methods have been developed to integrate data from heterogeneous sources. **Practical value.** The developed methods make it possible to integrate heterogeneous data sources (the structure of the table of the railway train management rules, the form and application for issuing a warning), which are railway domain-specific. It allows forming an ontology from its data sources (database and csv formats) to schema and individuals. Integration and consistency of information system data and regulatory documentation is one of the aspects of increasing the level of train traffic safety.

Keywords: constructive-synthesizing modelling; ontology; information system; railway; database; table; speed restriction; ontology learning

Introduction

In Europe, transport ontologies [15] are developed given the information support evolution and heterogeneous databases integration without changing them. Development is performed using complementary software tools. Railway transport data transformation into an ontology is only partially applied. In [3], the Rail-TopoModel UML model was transformed into an ontology schema. When developing the Rail Core Ontology [15], OpenRefine is used to transform railway train timetables into ontology individuals.

Previously, we developed a railway track ontology formation procedure. This paper considers the

railway ontology formation procedure formalization by means and methods of constructive-synthesizing modelling (CSM) [16].

Problem statement and purpose

Automating the formation of ontologies makes it possible to facilitate the laborious ontology development process and is subject to ontology learning (OL).

OL is performed using tabular, textual sources and a variety of models. OL tools are based on logic rules, machine learning, statistical methods, etc.

When developing railway ontological support, it is necessary to consider both information system

data and regulatory support to check their consistency. According to the review [11], insufficient attention is paid to OL's data integration.

The purpose of the work is to formalize heterogeneous information sources integration methods of ontology formation. As an example, the railway track information support is considered in terms of the train speed restriction in connection with its technical condition.

Analysis of recent research and publications

Automation of ontology development implies the automation of schema development and data transformation into ontology individuals.

For the ontology scheme, the following methods are used:

- transformation of the XML schema, for example, using XSD2OWL [6] (as well as UML [14], etc.) into an ontology schema;
- using a controlled language for ontology development, for example, OntoDL in Onto2OWL [8];
- automated semantic annotation of documents, for example, using text2onto [4].

For our work, tabular data structure mapping is more relevant. In the case of the ontology schema generation using the SQL-DDL database schema, mapping rules are used. The tables are mapped to the corresponding ontology classes [2]. Other database-based ontology generation tools are presented in the review [11].

The formalization of ontology scheme formation is also carried out based on ontology pattern language (OPL). As part of the approach, ontology design patterns have been developed, and the possibilities for combining them are demonstrated using OPL tools. To represent the ontology pattern language, one uses grammar [13] and OPL languages [12] based on derivation rules.

Automation of data transformation into ontology instances is performed by the following means:

- data wrangling, such as in the Karma [10] workbench and OpenRefine;
- semantic role labelling, for example in Inception [9];
- Virtual Knowledge Graph System, for example in Ontop [21].

Tools such as «RDB to RDF Mapping Language» are used to map table data onto an ontology

schema, followed by ontology population to integrate data and check their consistency.

Another way to automate the development of ontology formation using several software tools is platforms for their integration. Integration can be understood as the connection of services in applications based on ontologies, where RabbitMQ and Redis messages are used [15].

For our work, the integration of ontology development applications in the sense of mapping heterogeneous files is more relevant, for example, as in OntoPop [1], where tags for annotation and ontology classes are mapped. First, documents are annotated, rules are developed in the LangText language [5] for mapping tags and ontology, and then the ontology is populated. Ontology individuals are retrieved from the text.

In other platforms, like [7], Java Patterns Engine Annotation rules are used to map annotations to ontology instances as part of text2onto [4].

Methodology

CSM is based on formal grammar and is used to formalize the formation of structures and constructive processes of various natures. The basis is the generic constructor, which is presented in [16].

Here, the CSM is used to formalize the procedure for developing a railway track ontology using the example of a speed restriction warning due to its defects.

The paper presents only the specialization, interpretation and concretization of the generative constructor for the formation of the speed restriction warning database table. In [18] the following constructors are available:

- formation of railway train management rules (TMR) [20] warning table structure DU-61 and knowledge presentation concepts in csv format;
- converting the structure of the DU-61 warning into the csv format table metadata;
- transforming a database table into a common representation;
- converting a csv table to a generic representation;
- transformation of TMR DU-61 warning table structure and tabular knowledge representation concepts of general representation into ontology vocabulary;
- transformation of the DU-61 form table of the general representation into the ontology individuals;

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- transformation of the ontology vocabulary and TMR DU-61 warning table structure into ontology rules;
- transformation of schema and instances into ontology.

Findings

Information support of the railway track in terms of defects – a speed restriction warning includes (Figure 1):

- an application for issuing warnings indicating the location and speed restriction;
- the data structure description of the TMR DU-61 warning;
- warning form;

The development of an ontology of data sources for the DU-61 warning involves the following steps:

- filling in the database form DU-61 table according to the request of the track master using SQLite;

- transformation of the database DU-61 form table into a generic representation using OpenRefine;
- filling in csv tables according to the model of tabular knowledge representation [16] and the TMR DU-61 table;
- converting the TMR DU-61 table into a csv metadata table using a text editor;
- converting csv tables into a generic representation using OpenRefine;
- transformation of the generic format TMR DU-61 from metadata tables and the tabular knowledge representation model into the ontology vocabulary using the Open Refine RDF extension;
- transformation of the DU-61 form table of the generic format and the ontology vocabulary into ontology instances (ontology Abox) using the Open Refine RDF extension;
- transformation of ontology vocabulary into ontology rules (ontology Tbox) using Protégé;
- integration of schema and ontology instances using Protégé.

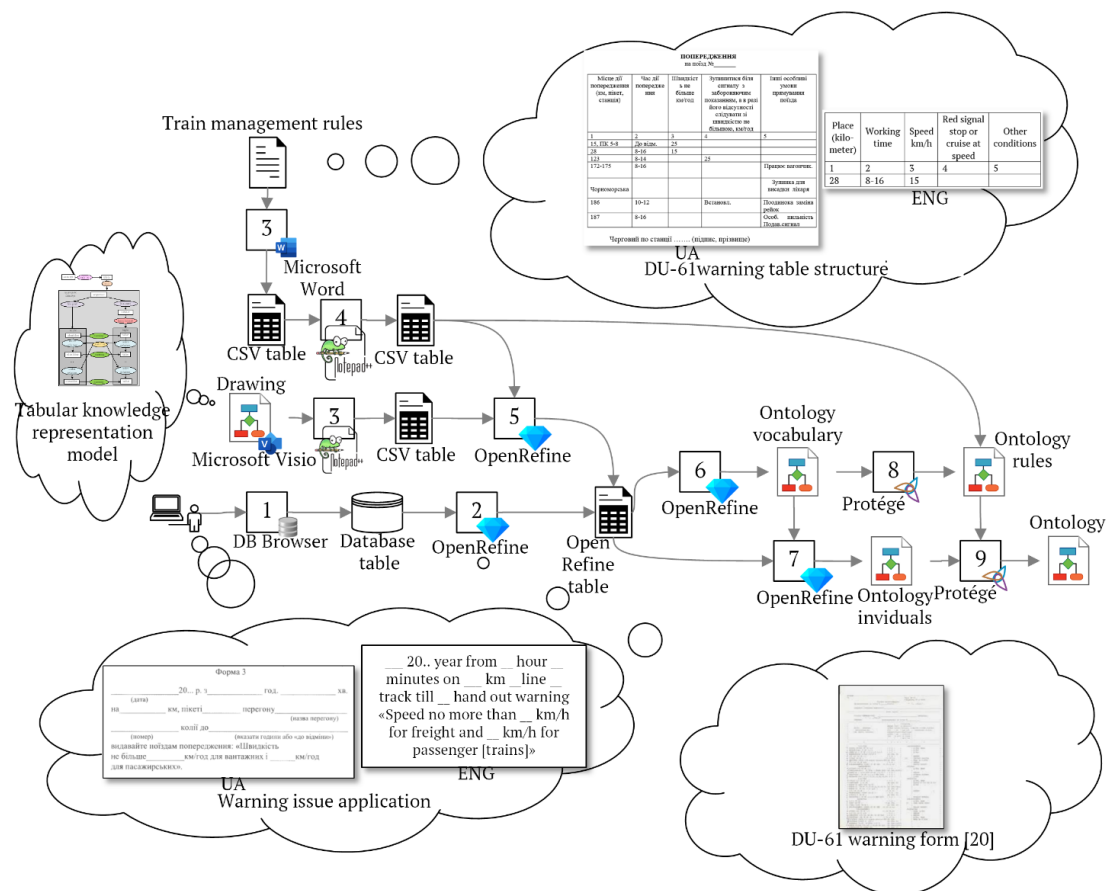


Fig. 1. The procedure for the development of constructors for the railway train speed restriction document management ontological support (the numbering corresponds to the data transformation sequence)

Generative constructor for forming speed restriction warning database table

Constructors for each stage of development are developed that have Protégé, OpenRefine, Tabula and SQLite actors, as well as input and output data (Figure 1). The procedure for developing constructors is demonstrated. For the generative constructor, the inputs are the application, the TMR, and the tabular knowledge representation model. The inputs of the transformation constructor and the outputs of the generative and transformation constructors are the constructs that are obtained through inference.

The purpose of the constructor is to generate a speed restriction warning database table.

Consider the specialization of the generalized constructor (GC) based on the constructive-synthesizing approach:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_s \mapsto C_{\text{tabl}} = \langle M_{\text{tabl}}, \Sigma_{\text{tabl}}, \Lambda_{\text{tabl}} \rangle$$

where C – GC; M – heterogeneous expandable carrier OK; Σ – the signature of the relations and the corresponding operations of the GC; Λ – a set of synthesis information support (CIS) assertions of the GC; $_s \mapsto$ – specialization operation; C_{tabl} – a specialized constructor (SC) for generating a speed restriction warning table; M_{tabl} – includes the set of terminals SC; $T = \{\Gamma\}$, where Γ is the set of strings, non-terminals $N = \{TABLE, TUPLE3, ELEMENT1, LIT, HEADER\}$, derivation rules; Σ_{tabl} – relations and operations of the SC; Λ_{tabl} – information support for the construction of the SC may include the semantics of concepts and operations, derivation rules, restrictions, and initial and termination conditions.

$\Sigma_{\text{tabl}} = \{\rightarrow, \Xi, \Theta, \Phi\}$ includes the signature of operations: $\Xi = \{\circ\}$ – binding; $\Theta = \{\models, \models\}$ – derivations; $\Phi = \{\#, @, :=, \cdot, AND\}$ – operations on attributes, $\rightarrow$ – derivation relation.

Semantics Λ_{tabl} includes the following concepts: table, table name, table key column (key), tuple, number of columns (b), number of rows (f), attribute value (LIT), sequence relation ($\circ$), as well as [5] operations of full ($\models$) and partial ($\models$) derivation, constrIndex, constrIndexPart strings.

Λ_{tabl} includes the semantics of operations on attributes:

- $\#(a, c, operation)$ – the «operation» in the # operation is performed when $a = c$;
- $@(a)$ – input a from an external actor;
- $:=(a, b)$ value b assignments to a ;
- $\cdot(a, b, c)$ – a concatenation of b and c strings with result in a ;
- $AND(operation, operation)$ – logical AND, returns true if both operations return «true».

Λ_{tabl} includes the following constraint: the partial derivation is performed considering the derivation relation attribute ($_t \rightarrow$), if $t = 0$, then the rule is not available.

The derivation rules are defined when the constructor is instantiated.

We interpret the constructor through an algorithmic constructor whose actor is DB Browser SQLite:

$$\langle C_{\text{tabl}} = \langle M_{\text{tabl}}, \Sigma_{\text{tabl}}, \Lambda_{\text{tabl}} \rangle \rangle,$$

$$C_{A,L} = \langle M_{A,tabl}, \Sigma_{A,tabl}, \Lambda_{A,tabl} \rangle_I \rightarrow$$

$$C_{I,L} = \langle M_{I,tabl}, \Sigma_{I,tabl}, \Lambda_{I,tabl} \rangle,$$

where $_I \rightarrow$ is the interpretation operation,

$M_{A,tabl}$ includes a set of algorithms implemented by the actor, as well as sets of input and output data for them, $\Sigma_{A,tabl} = \{\cdot, \cdot\}$ includes the signature of operations of sequential and conditional execution of algorithms [5].

Below are the algorithms $V_{A,tabl}$ that implement the

corresponding operations on the attributes: $A_1|_{a,c}^{A_j}$ –

the algorithm A_j is executed if $a = c$, $A_2|_a^a$ is the im-

plementation of the @ operation; $A_3|_b^a$ – $a = b$;

$A_4|_{b,c}^a$ – $\cdot(a, b, c)$, $A_5|_{A_j, B_j}^{true, false}$ – $AND(operation, op-$

eration), where A_j is the identifier of the algorithm, X_j, Y_j are the domains and values of the algorithm

$A_1|_{Y_i}^{X_i}$.

$$\text{Carrier } M_{I,table} = M_{\text{tabl}} \cup M_{A,tabl}.$$

Information support $\Lambda_{A,tabl}$ is presented in [5],

$$\Lambda_{I,tabl} = \Lambda_{\text{tabl}} \cup \left\{ \left(A_1|_{a,c}^{A_j} \dashv \# \right), \left(A_2|_a^a \dashv @ \right), \left(A_3|_b^a \dashv := \right), \left(A_4|_{b,c}^a \dashv \cdot \right), \left(A_5|_{A_j, B_j}^{true, false} \dashv AND \right) \right\}$$

Consider the concretization of the constructor:

$C_{I,tabl} = \langle M_{I,tabl}, \Sigma_{I,tabl}, \Lambda_{I,tabl} \rangle_K \rightarrow$
 $C_{K,tabl} = \langle M_{K,tabl}, \Sigma_{K,tabl}, \Lambda_{K,tabl} \rangle, ,$ where $K \rightarrow$ op-
 eration specification, $M_{K,tabl} = M_{I,tabl}$
 $\Sigma_{K,tabl} = \Sigma_{I,tabl}, \Lambda_{K,tabl}$ includes the following.

Initial conditions: table header count headerCnt = 0, number of columns (b), number of rows (f), key column number keyColNum = 0, row counter tupleCnt = 0, value counter elementCnt = 0, constructor-constructed value index constrIndex, part of index constructed constrIndexPart, $t_0 = 1, t_1 = 0, t_2 = 0, t_3 = 0, t_4 = 0, t_5 = 0, t_6 = 0, t_7 = 0, t_8 = 0, t_9 = 0, t_{10} = 0, t_{11} = 0$.

Non-terminals: TABLE, TUPLE, TUPLE1, VECTOR, LIT, HEADER1, TUPLE2, TUPLE3, ELEMENT1.

Terminals: b, f, key, table name, header, value, element, index.

The initial non-terminal is TABLE.

Input data – an application for issuing a warning, for example «at 23 km, give trains a warning to go at a speed of no more than 60 km/h»;

Restrictions described earlier.

Termination condition – all derivation relations are invalid.

The output is a warning database table (Table 1); Derivation rules (include derivation relationships s and attribute operations g):

$s_1 = \langle \text{lit attr table}_{t_0} \rightarrow \text{TUPLE1} \circ \text{VECTOR} \circ \text{lit attr TUPLE} \rangle$
 where $\text{lit attr} = \text{lit b, lit f, lit key, lit table name}$.

$g_1 = \langle :=(t_0, 0), :=(t_1, 1), @(\text{LIT} \downarrow \text{b} \downarrow \text{TABLE}),$
 $@(\text{LIT} \downarrow \text{f} \downarrow \text{TABLE}), @(\text{LIT} \downarrow \text{key} \downarrow \text{TABLE})$
 $@(\text{LIT} \downarrow \text{table name} \downarrow \text{TABLE}) \rangle$

Table 1

Shortened warning form DU-61	
Place	Speed
23 km	60

Consider the realization example corresponding to Table 1.

Derivation 1.

$\text{lit b, lit f, lit key, lit table name} \xRightarrow{s_1} \text{TABLE} \Rightarrow$
 $\text{TUPLE1} \circ \text{VECTOR} \circ$

$\text{lit b, lit f, lit key, lit table name} \xRightarrow{s_2} \text{TABLE} \Rightarrow$
 $\langle t_0 = 0, t_1 = 1, \text{LIT} \downarrow \text{b} \downarrow \text{TABLE} = 2$

$\text{LIT} \downarrow \text{f} \downarrow \text{TABLE} = 1$

$\text{LIT} \downarrow \text{key} \downarrow \text{TABLE} = \text{place}$

$\text{LIT} \downarrow \text{table name} \downarrow \text{TABLE} = \text{DU 61} \rangle$

$s_2 = \langle \text{TUPLE1}_{t_1} \rightarrow \text{lit value header} \circ \text{HEADER1} \rangle$

$g_2 = \langle :=(t_2, 1), +(\text{headerCnt}, \text{headerCnt}, 1)$

$@(\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{header}),$

$\#(\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{header}, \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{key},$
 $:=(\text{kelCol}, \text{Num}, \text{headerCnt})) \rangle$

$\#(\text{headerCnt}, b, :=(t_2, 0))$

$\#(\text{headerCnt}, b, :=(t_3, 1)) \rangle$

Derivation 2.

$\text{lit value header} \circ \text{HEADER1} \circ \text{VECTOR} \circ$

$2b, 1f, \text{place key, DU 61 table name} \xRightarrow{s_3} \text{TABLE} \Rightarrow$

$\langle t_2 = 1, \text{headerCnt} = 1,$

$\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{header} = \text{place}$

$\text{keyColNum} = 1 \rangle.$

$s_3 = \langle \text{HEADER1}_{t_2} \rightarrow \text{lit value header} \circ \text{HEADER1} \rangle$

$g_3 = \langle +(\text{headerCnt}, \text{headerCnt}, 1)$

$\#(\text{headerCnt}, b, :=(t_2, 0))$

$@(\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{header}),$

$\#(\text{headerCnt}, b, :=(t_3, 1))$

$\#(\text{headerCnt}, b, :=(t_7, 1))$

$\#(\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{header}, \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{key},$

$:=(\text{kelCol}, \text{Num}, \text{headerCnt})) \rangle \rangle$

Derivation 3.

$$\begin{aligned}
& \text{place value header} \circ \text{LIT value header} \circ \\
& \text{HEADER1} \circ \text{VECTOR} \circ \\
& \xRightarrow{s_4, s_8} \text{TABLE} \\
& \langle \text{headerCnt} = 2, t_2 = 0, \\
& \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{header} = \text{speed} \\
& t_3 = 1, t_7 = 1 \rangle. \\
& s_4 = \langle \text{VECTOR}_{t_3} \rightarrow \text{TUPLE2} \circ \text{TUPLE3} \rangle \\
& g_4 = \langle :=(t_5, 1), +(\text{tupleCnt}, \text{tupleCnt}, 1) \\
& \#(\text{tupleCnt}, f, :=(t_8, 1)) \rangle
\end{aligned}$$

Derivation 4.

$$\begin{aligned}
& \text{place value header} \circ \text{LIT value header} \circ \text{TUPLE2} \circ \text{TUPLE3} \circ \\
& \xRightarrow{s_6, s_9} \text{TABLE} \\
& \langle t_5 = 1, \text{tupleCnt} = 1, t_8 = 1 \rangle. \\
& s_5 = \langle \text{TUPLE3}_{t_3} \rightarrow \text{TUPLE2} \circ \text{TUPLE3} \rangle \\
& g_5 = \langle :=(t_5, 1), +(\text{tupleCnt}, \text{tupleCnt}, 1) \\
& :=(t_4, 1), \#(\text{tupleCnt}, f, :=(t_8, 1)) \rangle \\
& s_6 = \langle \text{TUPLE2}_{t_5} \rightarrow \text{LIT value element} \circ \\
& \text{ELEMENT1} \rangle, \\
& \text{where } \text{LIT attr element} = \text{LIT type, LIT index, LIT value element}. \\
& g_6 = \langle :=(\text{elementCnt}, 1), \\
& @(\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{element}), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{headerCnt}, :=(t_9, 1)), :=(t_6, 1), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{headerCnt}, :=(t_{10}, 1)), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{keyColNum}, \\
& :=(\text{constrIndexPart}, \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{element})), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{keyColNum}, \\
& \cdot(\text{constrIndex}, \text{constrIndexPart}, \\
& \text{LIT} \downarrow \text{table name} \downarrow \text{element})) \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{keyColNum}, :=(\text{elementCnt}, 0)) \rangle
\end{aligned}$$

Derivation 5.

$$\begin{aligned}
& \text{place value header} \circ \text{speed value header} \circ \\
& \text{LIT type, LIT index, LIT value element} \circ \text{ELEMENT1} \circ \\
& \xRightarrow{s_7} \text{TABLE} \\
& \langle \text{elementCnt} = 1, \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{element} = 23\text{km} \\
& t_6 = 1, j = 23\text{km}, \text{constrIndex} = 23\text{kmDU61} \rangle. \\
& s_7 = \langle \text{ELEMENT1}_{t_6} \rightarrow \text{LIT value element} \circ \\
& \text{ELEMENT1} \rangle, \\
& g_7 = \langle +(\text{elementCnt}, \text{elementCnt1}), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{headerCnt}, :=(t_6, 0)) \\
& @(\text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{element}), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{headerCnt}, :=(t_{10}, 1)), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{headerCnt}, :=(t_{10}, 1)), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{keyColNum}, \\
& :=(\text{constrIndexPart}, \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{element})), \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{keyColNum}, \\
& \cdot(\text{constrIndex}, \text{constrIndexPart}, \\
& \text{LIT} \downarrow \text{table name} \downarrow \text{element})) \\
& \#(\text{elementCnt}, \text{keyColNum}, :=(\text{elementCnt}, 0)) \rangle
\end{aligned}$$

Derivation 6.

$$\begin{aligned}
& \text{place value header} \circ \text{speed value header} \circ \\
& \text{string type, LIT index, 23km value element} \circ \\
& \text{LIT type, LIT index, LIT value element} \circ \text{ELEMENT} \circ \\
& \xRightarrow{s_{11}} \text{TABLE} \\
& \langle \text{elementCnt} = 2, t_6 = 0, \\
& \text{LIT} \downarrow \text{value} \downarrow \text{element} = 60, t_{10} = 1, \\
& \text{constrIndex} = 23\text{kmDU61}, \text{elementCnt} = 0 \rangle. \\
& s_8 = \langle \text{HEADER1}_{t_7} \rightarrow \varepsilon \rangle, \\
& g_8 = \langle \varepsilon \rangle. \\
& s_9 = \langle \text{TUPLE3}_{t_8} \rightarrow \varepsilon \rangle, \\
& g_9 = \langle \varepsilon \rangle. \\
& s_{10} = \langle \text{ELEMENT1}_{t_9} \rightarrow \varepsilon \rangle,
\end{aligned}$$

$$g_{10} = \langle \#(AND((tupleCnt, f), (elementCnt, headerCnt)), := (t_{11}, 1)), := (t_4, 1), := (t_5, 0), := (t_8, 0), := (t_9, 0) \rangle$$

Derivation 9.

$$\begin{aligned} & place\ value\ header \circ speed\ value\ header \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 23km\ value\ element \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 60\ value\ element \circ \\ & {}_2b, {}_1f, place\ key, DU\ 61\ table\ name\ TABLE \xRightarrow{S_{12}} \\ & s_{11} = \langle LIT \downarrow index_{t_7} \rightarrow n \rangle, \\ & g_{11} = \langle +(elementCnt, elementCnt1), \\ & \#(elementCnt, headerCnt, := (t_{10}, 0)) \\ & \#(elementCnt, headerCnt, := (t_9, 0)) \rangle \end{aligned}$$

Derivation 7.

$$\begin{aligned} & place\ value\ header \circ speed\ value\ header \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 23km\ value\ element \circ \\ & string\ type, LIT\ index, 60\ value\ element \circ ELEMENT1 \circ \\ & {}_2b, {}_1f, place\ key, DU\ 61\ table\ name\ TABLE \xRightarrow{S_{11}} \\ & \langle elementCnt = 1 \rangle \end{aligned}$$

Derivation 8.

$$\begin{aligned} & place\ value\ header \circ speed\ value\ header \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 23km\ value\ element \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 60\ value\ element \circ ELEMENT1 \circ \\ & {}_2b, {}_1f, place\ key, DU\ 61\ table\ name\ TABLE \xRightarrow{S_{10}} \\ & \langle elementCnt = 1, t_9 = 1, t_{10} = 0 \rangle \\ & s_9 = \langle TABLE_{t_{11}} \rightarrow eof \rangle, \\ & g_{12} = \langle \varepsilon \rangle. \end{aligned}$$

Derivation 10.

$$\begin{aligned} & place\ value\ header \circ speed\ value\ header \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 23km\ value\ element \circ \\ & string\ type, 23kmDU\ 61\ index, 60\ value\ element \circ eof \end{aligned}$$

Originality and practical value

The basis for automating the formation of the ontology of the railway domain by the constructive-synthesizing method has been laid.

The authors laid the foundations of using constructive-synthesizing modelling in the railway transport ontological domain to form the structure and data of the railway train speed restriction warning tables (database and csv format), their transformation into a common tabular format, vocabulary, rules and ontology individuals. As well as ontology population.

Ontology learning methods have been developed to integrate data from heterogeneous sources (the structure of the table DU-61 TMR, the form and application for issuing a warning), and is also railway-oriented. It allows forming an ontology from its data sources (database format and csv) to schema and instances.

Integration and consistency checking of data from information systems and regulatory documentation is one of the aspects of increasing the train traffic safety level.

Conclusions

The formalization of the ontology formation has been performed, which allows expanding the possibilities of automating the data integration and checking its consistency using ontologies.

In the future, it is planned to expand the structural system for the formation of ontologies based on textual sources of regulatory documentation and information systems of the railway.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Amardeilh F. OntoPop or how to annotate documents and populate ontologies from texts. *ESWC 2006 Workshop on Mastering the Gap : From Information Extraction to Semantic Representation*. 2006. P. 1–16.
2. An J., Park Y. B. Methodology for Automatic Ontology Generation Using Database Schema Information. *Mobile Information Systems*. 2018. Vol. 2018. P. 1–13. DOI : <https://doi.org/10.1155/2018/1359174>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3. Bischof S., Schenner G. Rail Topology Ontology : A Rail Infrastructure Base Ontology. *The semantic web - ISWC 2021*. 2021. P. 597–612. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88361-4_35
4. Cimiano P., Völker J. A Framework for Ontology Learning and Data-Driven Change Discovery. *NLDB'05 : Proceedings of the 10th international conference on Natural Language Processing and Information Systems*. 2005. Vol. 3513. P. 227–238. DOI: https://doi.org/10.1007/11428817_21
5. Crispino G. *Une Plateforme Informatique de l'Exploration Contextuelle: Modelisation, Architecture et Realisation (ContextO). Application au Filtrage Semantique de Textes* : Thesis or Dissertation. Universite De Paris Iv – Sorbonne, 2003. 241 p.
6. Cruz C., Nicolle N. Ontology enrichment and automatic population from XML data. *Proceedings of the 4th International VLDB Workshop on Ontology-based Techniques for DataBases in Information Systems and Knowledge Systems*. 2008. P. 1–5.
7. Dinşoreanu M., Salomie I., Pop C. B. Integrated System for Developing Semantically-Enhanced Archive Econtent. *Revista Romana de Informatica si Automatică*. 2011. Vol. 21, No. 4. P. 67–77.
8. Fonseca J. M. S. *Converting ontologies into DSLs* : Master Dissertation. Universidade do Minho Escola de Engenharia Departamento de Informática, 2014. 80 p.
9. Klie J. C., Bugert M., Boullosa B., de Castilho R. E., Gurevych I. The inception platform: Machine-assisted and knowledge-oriented interactive annotation. *Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics : System Demonstrations*. 2018. P. 5–9.
10. Knoblock C. A., Szekely P. Exploiting semantics for big data integration. *AI magazine*. 2015. Vol. 36, No. 1. P. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.1609/aimag.v36i1.2565>
11. Ma C., Molnar B. Ontology Learning from Relational Database : Opportunities for Semantic Information Integration. *Vietnam Journal of Computer Science*. 2022. Vol. 9, No. 1. P. 31–57. DOI: <https://doi.org/10.1142/s219688882150024x>
12. Quirino G. K. S., Barcellos M. P., Falbo R. A. OPL-ML : A Modeling Language for Representing Ontology Pattern Languages. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017. P. 187–201. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70625-2_18
13. Ruy F. B., Guizzardi G., Falbo R. A., Reginato C. C., Santos V. A. From reference ontologies to ontology patterns and back. *Data & Knowledge Engineering*. 2017. Vol. 109. P. 41–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2017.03.004>
14. Tilakaratna P., Rajapakse J. Conceptual and System Modeling with UML : Guidelines. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*. 2012. Vol. 6, No. 22. P. 90–97. DOI: <https://doi.org/10.4156/jdcta.vol6.issue22.9>
15. Tutchter J. *Development of semantic data models to support data interoperability in the rail industry* : Thesis of Dissertation. University of Birmingham, 2016. 355 p.
16. Shynkarenko V., Ilman V. M. Constructive-synthesizing structures and their grammatical interpretations. i. Generalized formal constructive-synthesizing structure. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50. Iss. 5. P. 655–662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z>
17. Shynkarenko V., Zhuchyi L., Ivanov O. Conceptualization of the tabular representation of knowledge. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2021. P. 248–251. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648761>
18. Shynkarenko V., Zhuchyi L. Constructive-synthesizing modeling of ontological document management support for the railway train speed restrictions. URL: <https://tinyurl.com/2p9eeand>
19. *Ukrainian railway train management rules*. 2005. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0507650-05#Text>
20. *Ukrainian railway train speed restriction form*. URL: <https://images.app.goo.gl/mgrtnegyDKTsHbYF7>
21. Xiao G., Lanti D., Kontchakov R., Komla- Ebri S., Güzel-Kalaycı E., Ding L., ... Botoeva E. The Virtual Knowledge Graph System Ontop. *Lecture Notes in Computer Science*. 2020. P. 259–277. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-62466-8_17

В. І. ШИНКАРЕНКО^{1*}, Л. І. ЖУЧИЙ^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 489 49 15, ел. пошта shinkarenko_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 965 92 36, ел. пошта larisa_zhuchiy@ukr.net, ORCID 0000-0002-9209-7262

Конструкційно-продукційне моделювання онтологічного забезпечення документообігу з обмеження швидкості руху поїздів

Мета. Під час розробки онтологій залізничного домену необхідно враховувати як дані інформаційних систем, так і нормативне забезпечення для перевірки їхньої узгодженості. Для цього виконують інтеграцію даних. Основною метою роботи є формалізація методів інтеграції різномірних джерел інформації та формування онтології. **Методика.** Розроблено конструкційно-продукційну модель формування онтології та її джерел. **Результати.** Виконано формалізацію формування онтології, що дозволяє розширити можливості автоматизації інтеграції та узгодження даних засобами онтологій. Надалі заплановано розширити конструкційну систему формування онтологій на основі текстових джерел нормативної документації та інформаційних систем залізничної. **Наукова новизна.** Обґрунтовано можливості використання в онтологічному домені на залізничному транспорті конструкційно-продукційного моделювання для формування структури й даних таблиць попереджень про обмеження швидкості (форма бази даних і csv), їх перетворення в загальний табличний формат, словник, правила та екземпляри онтології, а також заповнення схеми екземплярами. Набули розвитку методи ontology learning для інтеграції даних різномірних джерел. **Практична значимість.** Розроблені методи дозволяють виконати інтеграцію різномірних джерел даних (структури таблиці ДУ–61 інструкції з руху поїздів, бланка та заявки на видачу попередження), що предметно орієнтовані на залізницю, сформувати онтологію від її джерел даних (форматів бази даних і csv) до схеми та екземплярів. Інтеграція та узгодженість даних інформаційних систем і нормативної документації є одним з аспектів підвищення рівня безпеки руху поїздів.

Ключові слова: конструкційно-продукційне моделювання; онтологія; інформаційна система; залізниця; база даних; таблиця; обмеження швидкості; онтологічне навчання

REFERENCES

1. Amardeilh, F. (2006). OntoPop or how to annotate documents and populate ontologies from texts. *ESWC 2006 Workshop on Mastering the Gap: From Information Extraction to Semantic Representation*, 1-16. (in English)
2. An, J., & Park, Y. B. (2018). Methodology for Automatic Ontology Generation Using Database Schema Information. *Mobile Information Systems*, 2018, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1359174> (in English)
3. Bischof, S., & Schenner, G. (2021). Rail Topology Ontology: A Rail Infrastructure Base Ontology. In *The semantic web - ISWC 2021* (pp. 597-612). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88361-4_35 (in English)
4. Cimiano, P., & Völker, J. (2005). A Framework for Ontology Learning and Data-Driven Change Discovery. In *NLDB'05: Proceedings of the 10th international conference on Natural Language Processing and Information Systems* (Vol. 3513, pp. 227-238). DOI: https://doi.org/10.1007/11428817_21 (in English)
5. Crispino, G. (2003). *Une Plateforme Informatique de l'Exploration Contextuelle: Modelisation, Architecture et Realisation (ContextO). Application au Filtrage Semantique de Textes* (PhD dissertation). Universite De Paris Iv –Sorbonne. (in French)
6. Cruz, C., & Nicolle, N. (2008). Ontology enrichment and automatic population from XML data. In *Proceedings of the 4th International VLDB Workshop on Ontology-based Techniques for DataBases in Information Systems and Knowledge Systems* (pp. 1-5). (in English)
7. Dinşoreanu, M., Salomie, I., & Pop, C. B. (2011). Integrated System for Developing Semantically-Enhanced Archive Econtent. *Revista Romana de Informatica si Automatică*, 21(4), 67-77. (in English)
8. Fonseca, J. M. S. (2014). *Converting ontologies into DSLs* (PhD dissertation). Universidade do Minho Escola de Engenharia Departamento de Informática. (in English)

9. Klie, J. C., Bugert, M., Boullosa, B., de Castilho, R. E., & Gurevych, I. (2018). The inception platform: Machine-assisted and knowledge-oriented interactive annotation. In *Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics: System Demonstrations* (pp. 5-9). (in English)
10. Knoblock, C. A., & Szekely, P. (2015). Exploiting semantics for big data integration. *AI magazine*, 36(1), 25-38. DOI: <https://doi.org/10.1609/aimag.v36i1.2565> (in English)
11. Ma, C., & Molnar, B. (2022). Ontology Learning from Relational Database: Opportunities for Semantic Information Integration. *Vietnam Journal of Computer Science*, 9(1), 31-57. DOI: <https://doi.org/10.1142/s219688882150024x> (in English)
12. Quirino, G. K. S., Barcellos, M. P., & Falbo, R. A. (2017). OPL-ML: A Modeling Language for Representing Ontology Pattern Languages. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 187-201). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70625-2_18 (in English)
13. Ruy, F. B., Guizzardi, G., Falbo, R. A., Reginato, C. C., & Santos, V. A. (2017). From reference ontologies to ontology patterns and back. *Data & Knowledge Engineering*, 109, 41-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2017.03.004> (in English)
14. Tilakaratna, P., & Rajapakse, J. (2012). Conceptual and System Modeling with UML: Guidelines. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 6(22), 90-97. DOI: <https://doi.org/10.4156/jdcta.vol6.issue22.9> (in English)
15. Tutchter, J. (2016). *Development of semantic data models to support data interoperability in the rail industry* (PhD dissertation). University of Birmingham. (in English)
16. Shynkarenko, V., & Ilman, V. M. (2014). Constructive-synthesizing structures and their grammatical interpretations. i. Generalized formal constructive-synthesizing structure. *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(5), 655-662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z> (in English)
17. Shynkarenko, V., Zhuchyi, L., & Ivanov, O. (2021). Conceptualization of the tabular representation of knowledge. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies* (pp. 248-251). DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648761> (in English)
18. Shynkarenko, V., & Zhuchyi, L. Constructive-synthesizing modeling of ontological document management support for the railway train speed restrictions. (n. d.). URL: <https://tinyurl.com/2p9eeand> (in English)
19. *Ukrainian railway train management rules*. (2005). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0507650-05#Text> (in English)
20. *Ukrainian railway train speed restriction form*. URL: <https://images.app.goo.gl/mgrtncgyDKTsHbYF7> (in English)
21. Xiao, G., Lanti, D., Kontchakov, R., Komla- Ebri, S., Güzel-Kalaycı, E., Ding, L., ... & Botoeva, E. (2020). The Virtual Knowledge Graph System Ontop. *Lecture Notes in Computer Science*, 259-277. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-62466-8_17 (in English)

Received: 18.02.2022

Accepted: 20.06.2022

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 621.333-048.24

В. Є. ВАСИЛЬСВ^{1*}, А. М. АФАНАСОВ^{2*}, О. М. ГУЛІВЕЦЬ^{3*}, Ю. Я. ПОПУДНЯК^{4*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{2*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{3*}Каф. «Фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 23, ел. пошта agulivets@outlook.com, ORCID 0000-0003-3410-9605

^{4*}Каф. «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 774 17 47, ел. пошта 19brit18@ukr.net, ORCID 0000-0002-1383-9863

Експериментальні дослідження енергетичної ефективності прискорених теплових випробувань тягових електромашин

Мета. Випробування на нагрівання тягових електричних машин є найбільш енергоємним. Ураховуючи необхідність вибору раціонального варіанта схеми взаємного навантаження для зменшення витрат електричної енергії під час випробувань, автори передбачають провести дослідження кількості сумарних корисних енергій джерел живлення стенда за годинного і пускового струму. **Методика.** Експериментальні дослідження проведено на стенді взаємного навантаження. Як джерела живлення (вольтододаткова машина й лінійний генератор) використано обертові машини. Напругу та коефіцієнт ослаблення поля тягових двигунів під час випробувань підтримували номінальними. Умовою рівності кінцевих перевищень температур випробовуваних тягових двигунів для обох режимів було досягнення однакового сумарного опору кола. Для аналізу результатів випробувань використано методи теоретичного дослідження й аналітичного розрахунку електричних кіл, теоретичних основ електротехніки, математичного моделювання електричних та енергетичних процесів. **Результати.** Проведений комплекс випробувань на нагрівання тягових двигунів моторвагонного електрорухомого складу показав, що витрати електричної енергії за пускового струму менші на 36 % порівняно з годинним режимом навантаження. Випробування на стенді взаємного навантаження підтвердили практичну можливість проведення прискорених випробувань тягових електричних двигунів. **Наукова новизна.** Доведено, що використання режиму випробування на нагрівання пусковим струмом забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на прийнятно-здавальні випробування. Намічено подальші дослідження для визначення резервів енергозбереження під час післяремонтних випробувань тягових електричних двигунів магістрального, кар'єрного і приміського транспорту. **Практична значимість.** Результати випробувань можуть стати основою модернізації стендів взаємного навантаження локомотиворемонтних підприємств для теплових випробувань тягових двигунів постійного та пульсуючого струму. Проведені дослідження дозволяють розробити рекомендації щодо проектування раціональних схем випробних стендів із підвищеною енергетичною ефективністю системи взаємного навантаження тягових електричних машин, які відрізняються врахуванням коефіцієнта корисної дії джерел та перетворювачів потужності.

Ключові слова: взаємне навантаження; випробування; режим навантаження; нагрівання; тягова електромашини; корисна енергія; температура; лінійний генератор; вольтододаткова машина; час випробування; годинний режим; пусковий струм

Вступ

Якісне проведення післяремонтних випробувань тягових електромашин можливе тільки під навантаженням [8, 10, 12]. На станціях для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту, як правило, використовують схему взаємного навантаження з лінійним генератором та вольтододатковою машиною.

Енергоємність випробувань тягових електромашин визначають тривалістю випробувань та сумарною потужністю, споживаною з мережі, яка складається з втрат потужності у випробовуваних тягових електромашинах та втрат у перетворювачах випробного стенда взаємного навантаження [1, 2, 9, 11, 13]. Умови проведення випробувань повинні забезпечувати повну відповідність характеру втрат потужності в тягових електромашинах реальним умовам експлуатації. Сумарні втрати у випробовуваних тягових електромашинах не повинні залежати ні від структури випробного стенда, ні від характеристик його джерел та перетворювачів. Сумарні втрати потужності в джерелах та перетворювачах пов'язані із забезпеченням випробувань і повинні бути мінімізовані.

Особливістю тягових двигунів постійного та пульсувального струму електрорухомого складу промислового транспорту (тягових агрегатів) є наявність п'ятнадцятихвилинного режиму навантаження [4]. Струм п'ятнадцятихвилинного режиму для цих тягових двигунів є типовим параметром, і під час їх випробування на нагрівання найбільш раціональним із точки зору максимуму енергетичної ефективності випробувань за мінімуму сумарної наведеної потужності джерел випробного стенда може бути взятий саме струм навантаження, що дорівнює струму п'ятнадцятихвилинного режиму.

Відношення п'ятнадцятихвилинного струму до годинного для тягових двигунів тягових агрегатів є величиною, близькою до відношення пускового та годинного струмів тягових двигунів моторвагонного електрорухомого складу. Тому для досягнення економії енергетичних ресурсів необхідно визначити раціональні режими взаємного навантаження електричних машин постійного та пульсувального струму тягового рухомого складу приміського сполу-

чення, що мають забезпечити високу енергетичну ефективність і якість приймально-здавальних випробувань електромашин [6, 7].

Мета

Основною метою цього експериментального дослідження є визначення різниці сумарних корисних енергій джерел системи взаємного навантаження, витрачених на випробування на нагрівання тягових електродвигунів РТ–51Д за пускового та годинного струму навантаження, й отримання аналітичних виразів для знаходження сумарної приведеної потужності джерел живлення випробної системи, яку можна розглядати як один із критеріїв вибору раціонального варіанта схеми взаємного навантаження випробовуваних електромашин тягового рухомого складу магістрального, промислового та приміського залізничного транспорту.

Методика

Упровадження нових технологій і технічних засобів на електрорухомому складі не виключає проведення післяремонтних випробувань і складання звіту результатів стендового навантаження. Під час проведення приймально-здавальних випробувань спираються на нормативи і правила. Так, чинними документами [4, 5] передбачена перевірка тягових електродвигунів на нагрівання.

Випробування проведено на стенді взаємного навантаження, устаткованого в лабораторії кафедри «Електрорухомий склад залізниць» Українського державного університету науки і технологій ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту». Об'єкт випробування – тягові електродвигуни РТ–51Д.

Тяговий електродвигун РТ–51Д призначений для встановлення на електропоїздах змінного струму ЕР9, ЕР9п і є чотириполюсною некомпенсованою електричною машиною пульсувального струму із самовентиляцією й опорно-рамною підвіскою. Збудження двигуна – послідовне. Кріплення обмотки якоря – клинове. Осердя якоря й додаткових полюсів шихтовані з листів електротехнічної сталі марки Е12 завтовшки 0,5 мм, головних полюсів – завтовшки 2 мм, кріплення до остова – за допомогою болтів. Нагрівостійкість ізоляції всіх

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

обмоток двигуна – за класом ізоляції F. Технічні дані тягового електродвигуна ТР–51Д представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні дані тягового двигуна РТ–51Д

Table 1

Technical data of the RT-51D traction motor

Збудження головних полюсів, %	92,5 %	32 %
Напруга, В	825	825
Струм якоря, А	215	266
Потужність на валу, кВт	182	200
Частота обертання, об./хв	645	1 140
Опір обмоток тягового двигуна за температури 20 °С/110 °С, Ом		
Якір (Я)	0,056/0,0762	
Головні полюси (ГП)	0,128/0,174	
Додаткові полюси (ДП)	0,025/0,034	
Загальний опір обмоток двигуна	0,209/0,2842	

Вимірювання опору обмоток проведено методом амперметра-вольтметра приладами класу точності 0,5. Значення опорів після вимірювання зведені до температури 20 °С. Температуру колектора, охолоджувального й навколишнього повітря виміряно спиртовими термометрами. Перевищення температур визначено за різних струмів якоря і номінальної кількості охолоджувального повітря методом опору відповідно до [3, 5].

Експериментальне дослідження проведено на стенді взаємного навантаження з використанням вольтододаткової машини (ВДМ) та лінійного генератора (ЛГ). Схему стенда наведено на рис. 1.

На першому етапі проведено випробування на нагрівання тягових двигунів РТ–51Д з годинним струмом навантаження $I_T = 215$ А та номінальною напругою $U_H = 825$ В протягом години. Коефіцієнт ослаблення поля під час випробування був номінальним $\beta_H = 0,535$.

Наприкінці випробування методом опору визначено перевищення температури обмоток якорів обох тягових електромашин (генератора G та двигуна M).

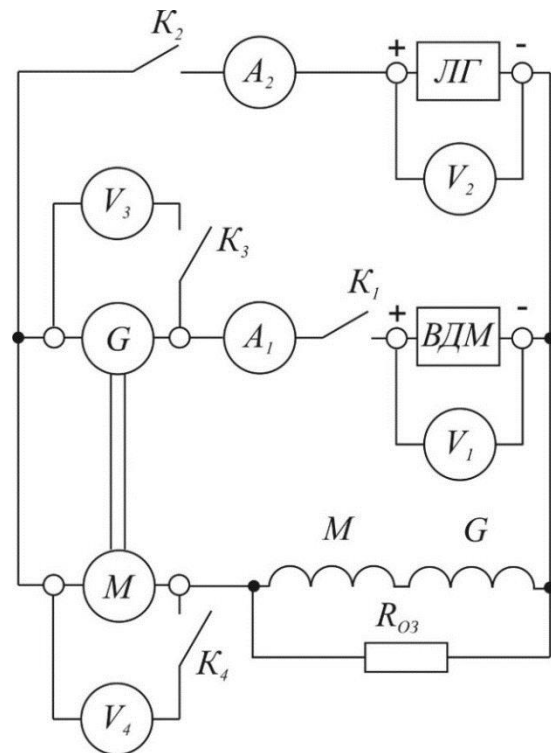


Рис. 1. Схема випробного стенда

Fig. 1. Scheme of the test stand

На другому етапі проведено випробування на нагрівання цих двигунів, із використанням цієї ж схеми, але за пускового струму навантаження $I_{\text{ПУСК}} = 370$ А. Напругу та коефіцієнт ослаблення поля тягових двигунів на другому етапі підтримували номінальними: U_H і β_H відповідно.

Випробування на нагрівання за пускового струму $I_{\text{ПУСК}} = 370$ А проведено протягом часу досягнення сумарного опору кола випробуваних двигунів того ж значення, яке було зафіксовано під час випробування протягом години за годинного струму навантаження $I_T = 215$ А. Сумарний опір цього кола оцінено за величиною напруги на затискачах вольтододаткової машини (ВДМ), яку попередньо фіксували протягом випробування на нагрівання за годинного струму навантаження на першому етапі.

Таким чином, було досягнуто умов рівності кінцевих перевищень температур випробуваних тягових двигунів для обох режимів випробування.

Корисні енергії джерел випробного стенда (ВДМ і ЛГ) визначено за значеннями їх напруги та струмів, які періодично зафіксовано про-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тягом усього часу випробування для обох режимів навантаження за допомогою вольтметрів V_1 і V_2 , а також амперметрів A_1 і A_2 .

Результати

Загальна витрата корисної електроенергії кожного з джерел (ВДМ та ЛГ) за час випробування може бути визначена у вигляді:

$$Q_{\text{ЛГ}} = \int_0^{t_B} U_{\text{ЛГ}} \cdot I_{\text{ЛГ}} dt;$$

$$Q_{\text{ВДМ}} = \int_0^{t_B} U_{\text{ВДМ}} \cdot I_{\text{ВДМ}} dt.$$

де $U_{\text{ЛГ}}$, $I_{\text{ЛГ}}$ – напруга та сила струму лінійного генератора; $U_{\text{ВДМ}}$, $I_{\text{ВДМ}}$ – напруга та сила струму вольтододавальної машини; t_B – час проведення випробування.

Як показує досвід численних випробувань на нагрівання, струм лінійного генератора протягом випробування практично не змінюється. Це зумовлено відсутністю впливу температури обмоток тягових електромашин на величину втрат холостого ходу, які визначають струм лінійного генератора.

Необхідно відзначити, що в разі розбіжності магнітних характеристик випробовуваних електромашин струм лінійного генератора може змінюватися зі зміною температури їх обмоток і, відповідно, електричних втрат. У випробуваннях використано тягові двигуни з магнітними характеристиками, що практично збігаються, тому такого явища в експерименті не спостерігалось.

Сумарна корисна енергія лінійного генератора за умови сталості струму $I_{\text{ЛГ}} = \text{const}$ може бути визначена у спрощеному вигляді як

$$Q_{\text{ЛГ}} = U_{\text{ЛГ}} \cdot I_{\text{ЛГ}} \cdot t_B.$$

За умови $I_{\text{ЛГ}} = \text{const}$ і $I_{\text{Д}} = \text{const}$ струм ВДМ також постійний.

$$I_{\text{ВДМ}} = \text{const}.$$

Тоді вираз визначення $Q_{\text{ВДМ}}$ може бути представлено у вигляді

$$Q_{\text{ВДМ}} = I_{\text{ВДМ}} \cdot \int_0^{t_B} U_{\text{ВДМ}} dt.$$

Для підтримки постійного значення струму навантаження тягових двигунів напруга ВДМ по мірі зростання перевищення температури та опору їх обмоток повинна підвищуватися. Форма залежності $U_{\text{ВДМ}}(t)$ повинна повторювати форму зміни в часі сумарного опору всіх обмоток тягових двигунів $\sum R(t)$ і мати такий самий експоненціальний характер.

Фіксацію результатів вимірювання струмів та напруг під час випробування під струмом навантаження $I_{\Gamma} = 215$ А проводили кожні 10 хвилин, а під час випробування струмом навантаження $I_{\text{ПУСК}} = 370$ А – кожні три хвилини.

Результати вимірювання струмів та напруг джерел для режиму $I_{\Gamma} = 215$ А (перший етап) наведено в табл. 2, результати вимірювання цих параметрів для режиму $I_{\text{ПУСК}} = 370$ А (другий етап) – у табл. 3.

Перевищення температур обмоток якорів випробовуваних тягових двигунів визначено за формулою [2]:

$$\tau = \frac{R_{\text{ГОР}} - R_{\text{ХОЛ}}}{R_{\text{ХОЛ}}} (235 + \Theta_{\text{ХОЛ}}) + \Theta_{\text{ХОЛ}} + \Theta_{\text{В}},$$

де $R_{\text{ГОР}}$, $R_{\text{ХОЛ}}$ – опори обмотки якоря в гарячому та холодному стані відповідно; $\Theta_{\text{ХОЛ}}$ – температура обмотки якоря в холодному стані; $\Theta_{\text{В}}$ – температура навколишнього повітря.

Випробування за двома етапами проведено з проміжком часу, що дорівнює дві доби. Температура обмоток якорів у холодному стані дорівнює температурі навколишнього повітря $\Theta_{\text{ХОЛ}} = \Theta_{\text{В}}$. Перевищення температури визначено за формулою:

$$\tau = \frac{R_{\text{ГОР}} - R_{\text{ХОЛ}}}{R_{\text{ХОЛ}}} (235 + \Theta_{\text{ХОЛ}}).$$

Опір обмоток якорів визначено методом амперметра-вольтметра на стенді з використанням вимірювальних щіток. Падіння напруги на якірних обмотках визначено вольтметрами V_3 і V_4 за нерухомих якорів (ЛГ вимкнено).

Перевищення температур якоря електромашини, яку випробовували в режимі двигуна

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

у двох дослідах ($I_{\Gamma} = 215 \text{ A}$ і $I_{\text{ПУСК}} = 370 \text{ A}$) склали відповідно 110 та 112 °C.

Час випробування за струму $I_{\text{ПУСК}} = 370 \text{ A}$ склав $t_2 = 16 \text{ хв}$.

Значення корисної енергії вольтодобаткової машини для обох випробувань визначено шляхом підсумовування окремих складових, отри-

маних для кожного відрізка часу за середнім значенням $U_{\text{ВДМ}}$ на відповідному відрізку.

Результати розрахунку корисних енергій ВДМ та ЛГ, відданих за час випробування, для годинного режиму навантаження ($I_{\Gamma} = 215 \text{ A}$) наведено в табл. 2, а для пускового режиму навантаження ($I_{\text{ПУСК}} = 370 \text{ A}$) – у табл. 3.

Таблиця 2

Дані випробувань і результати розрахунку корисних енергій ВДМ та ЛГ для годинного режиму навантаження

Table 2

Test data and results of calculation of useful energies of VDM and LH for an hourly load mode

$t, \text{ хв}$	$U_{\text{ВДМ}}, \text{ В}$	$U_{\text{ВДМСР}}, \text{ В}$	$I_{\text{ВДМ}}, \text{ А}$	$Q_{\text{ВДМ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$	$I_{\text{ЛГ}}, \text{ А}$	$U_{\text{ЛГ}}, \text{ В}$	$Q_{\text{ЛГ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$
0	87	–	215	–	11	–	–
10	97	92	215	3 297	11	825	1 513
20	105	101	215	3 619	11	825	1 513
30	111	108	215	3 870	11	825	1 513
40	117	114	215	4 085	11	825	1 513
50	122	119,5	215	4 282	11	825	1 513
60	126	124	215	4 443	11	825	1 513

Таблиця 3

Дані випробувань і результати розрахунку корисних енергій ВДМ та ЛГ для пускового режиму навантаження

Table 3

Test data and results of calculation of useful energies of VDM and LH for starting load mode

$t, \text{ хв}$	$U_{\text{ВДМ}}, \text{ В}$	$U_{\text{ВДМСР}}, \text{ В}$	$I_{\text{ВДМ}}, \text{ А}$	$Q_{\text{ВДМ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$	$I_{\text{ЛГ}}, \text{ А}$	$U_{\text{ЛГ}}, \text{ В}$	$Q_{\text{ЛГ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$
0	157	–	370	–	10	–	–
3	170	163,5	370	3 025	10	825	412,5
6	182	176	370	3 256	10	825	412,5
9	193	187,5	370	3 469	10	825	412,5
12	202	197,5	370	3 654	10	825	412,5
15	212	207	370	3 830	10	825	412,5
16	215	213,5	370	1 317	10	825	137,5

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Сумарна корисна енергія ВДМ для годинного режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ВДМ.Г.}} = 23\,600 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія ЛГ для годинного режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ЛГ.Г.}} = 9\,075 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія двох джерел (ВДМ та ЛГ) для годинного режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{Г.}} = 32\,675 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія ВДМ для пускового режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ВДМ.П.}} = 18\,550 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія ЛГ для пускового режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ЛГ.П.}} = 2200 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія двох джерел (ВДМ та ЛГ) для пускового режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{П.}} = 20\,750 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Відношення сумарних корисних енергій двох джерел (ВДМ та ЛГ) у годинному та пусковому режимах навантаження

$$\frac{Q_{\text{Г.}}}{Q_{\text{П.}}} = 1,57.$$

Економія сумарної корисної енергії двох джерел (ВДМ та ЛГ) у пусковому режимі навантаження порівняно з годинним режимом:

$$\Delta Q = \sum Q_{\text{Г.}} - \sum Q_{\text{П.}} = 11\,925 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

що становить 36 % від сумарної корисної енергії двох джерел годинного режиму.

Особливістю тягових двигунів із самовентиляцією є відносно висока частка в сумарних втратах потужності втрат холостого ходу, які зі зростанням струму навантаження дещо знижуються через падіння частоти обертання тягових електромашин. Потужність втрат холостого ходу мало впливає на перевищення температури обмотки якоря, але становить істотну частку в загальній потужності втрат у стенді взаємного навантаження, для компенсації якої потрібна

потужність із мережі. Істотне скорочення часу випробування на нагрівання (у три – чотири рази) водночас зменшує загальну корисну енергію джерел системи взаємного навантаження тягових електромашин, що витрачається на компенсацію втрат холостого ходу.

Із результатів розрахунку видно, що загальна корисна енергія лінійного генератора, який компенсує втрати холостого ходу, під час випробування на нагрівання з пусковим струмом навантаження вчетверо нижча, ніж під час випробування годинного режиму навантаження. Такий характер зниження загальної енергії втрат холостого ходу зі збільшенням струму навантаження буде притаманний усім варіантам систем взаємного навантаження, незалежно від того, як у них компенсуються втрати холостого ходу.

Результати розрахунку під час експериментальних досліджень досить добре узгоджуються з результатами теоретичних досліджень впливу величини струму навантаження тягових випробовуваних електромашин на енергетичну ефективність випробування на нагрівання.

Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведених досліджень на стенді взаємного навантаження:

– визначено величину економії сумарної корисної енергії двох джерел (ВДМ та ЛГ), що дозволило обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробування на нагрівання тягових двигунів електрорухомого складу магістрального залізничного транспорту за рахунок збільшення струму навантаження до пускового значення;

– науково обґрунтовано доцільність проведення випробувань на нагрівання тягових двигунів моторвагонного рухомого складу залізничного транспорту за струму навантаження пускового режиму, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на приймально-здавальні випробування;

– удосконалено метод визначення енергетичної ефективності системи взаємного навантаження тягових електричних машин, який відрізняється врахуванням у ньому к.к.д. джерел та

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

перетворювачів потужності, а також уведених понять енергетичної ефективності – непрямих методів компенсації втрат.

Висновки

Зниження витрати електроенергії на випробування на нагрівання тягових електродвигунів зі збільшенням струму навантаження підтверджено експериментально. Проведення випробувань на нагрівання тягових двигунів моторвагонного електрорухомого складу за струмів навантаження, що дорівнюють пусковому, дозволяє знизити витрати електроенергії на прийнятно-здавальні випробування на 36 % порівняно з годинним режимом навантаження.

Схеми та режими взаємного навантаження

тягових електричних машин, які використовуються під час їх прийнятно-здавальних випробувань, є нераціональними. Наявні станції з випробування тягових електричних машин, стан яких не відповідає сучасним вимогам організації технічного контролю, потребують модернізації, яка повинна бути направлена на зниження сумарної потужності джерел живлення випробної системи, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

Подальші дослідження слід спрямувати на скорочення тривалості випробувань за мінімуму джерел системи взаємного навантаження за рахунок регулювання кількості охолоджувального повітря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Друбецкий А. Е. Синтез систем взаимного нагружения тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока. *Електрифікація транспорту*. 2017. № 13. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823>
2. Афанасов А. М. Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока. *Електричні машини та апарати*. 2015. № 1. С. 12–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.1.02>
3. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : підручник у 2 т. Т. 2. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. 492 с.
4. *ДСТУ ГОСТ 2582:2017 Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні умови (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)* [Дійсний від 2017-03-01]. Київ : ДП «Укр-НДНЦ», 2017. 50 с.
5. *Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063*. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. 286 с.
6. *Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top>
7. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
8. Gavrilovic B. A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors. *American journal of mechanics and applications*. 2017. Vol. 5. Iss. 6. P. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11>
9. Jacobs S., Vandenbossche L., Attrazic E. How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550>
10. Sahoo S. K., Bhattacharya T. Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 4429–4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398>
11. Sequeira, J. L., Casimiro, T. M. Portable steam engines and traction engines and their use in rural areas : The case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*. 2018. Vol. 40. Iss. 1. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921>
12. Tudor E., Strambeanu D., Lipcinski D., Nicolaie S., Ilie C., Ovezee D., Tanase N., Voina A., Fartan M. Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995>

V. Y. VASYLIEV^{1*}, A. M. AFANASOV^{2*}, O. M. HULIVETS^{3*}, Y. Y. POPUDNIAK^{4*}^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332^{2*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361^{3*}Dep. «Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 23, e-mail agulivets@outlook.com, ORCID 0000-0003-3410-9605^{4*}Dep. «Architectural Design, Landscaping and Building Materials», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 774 17 47, e-mail 19brit18@ukr.net, ORCID 0000-0002-1383-9863

Experimental Research of the Energy Efficiency of Accelerated Thermal Tests of Traction Electric Machines

Purpose. Heating tests of traction electric machines are the most energy-intensive tests. Taking into account the need to choose a rational variant of the mutual load scheme in order to reduce the consumption of electrical energy during the tests, a study of the amount of total useful energy of the power sources of the stand at hourly and starting current was carried out. **Methodology.** Experimental studies were carried out on a mutual load stand. Rotating machines were used as power sources (voltage booster and linear generator). The voltage and field attenuation coefficient of the traction motors during the tests were kept nominal. The condition of the equality of the final temperature excesses of the tested traction motors for both test modes was the achievement of the same total circuit resistance. For analysis of test results, methods of theoretical research and analytical calculation of electric circuits, theoretical foundations of electrical engineering, mathematical modeling of electrical and energy processes were used. **Findings.** The conducted set of tests on heating the traction motors of electric rolling stock practically showed that the consumption of electrical energy at the starting current is 36% lower compared to the hourly load mode. Tests on the mutual load stand confirmed the practical possibility of accelerated tests of traction electric motors. **Originality.** It has been practically proven that the use of the heating test mode with the starting current ensures an increase in the energy efficiency of the tests and a corresponding reduction in the total electricity consumption for acceptance tests. Further development of practical research is planned for the purpose of determining energy saving reserves during post-repair tests of traction electric motors of highway, quarry and suburban transport. **Practical value.** The results of practical tests can become the basis for modernization of mutual load stands of locomotive repair enterprises for thermal tests of traction motors of direct and pulsating current. The conducted tests allow us to create recommendations for the design of rational schemes of test benches with increased energy efficiency of the system of mutual loading of traction electric machines, which differ by accounting the efficiency of sources and power converters.

Keywords: mutual load; test; load mode; heating; traction electric machine; useful energy; temperature; linear generator; voltage booster; test time; hour mode; starting current

REFERENCES

1. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., & Drubetskiy, A. Yu. (2017). Synthesis of systems of mutual loading of drive motors of direct and pulsing current. *Electrification of Transport*, 13, 33-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823> (in Russian)
2. Afanasov, A. M. (2015). Increase of Energy Efficiency of Testing of Traction Electric Machines of Direct and Pulsating Current. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1, 12-15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.1.02> (in Russian)
3. Hetman, H. K. (2015). *Teorija elektrychnoji tjaghy: pidruchnyk* (Vol. 2). Dnipropetrovsk: Akcent PP. (in Ukrainian)
4. *Mashyny elektrychni obertovi tjaghoivi. Zaghaljni tekhnichni umovy* (GhOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ), 50 DSTU GOST 2582:2017. (2017). (in Ukrainian)
5. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropojizdiv. CT-0063*. (2003). Kyiv: Vydavnychy dim «SAM». (in Ukrainian)
6. *Pro skhvalennja Energhetychnoji strateghiji Ukrajiny na period do 2035 roku «Bezpeka, energhoefektyvnistj, konkurentospromozhnistj»*. (2017). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top> (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. *Pro skhvalennja Nacionaljnoji transportnoji strategiji Ukrajiny na period do 2030 roku.* (2021). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
8. Gavrilovic, B. (2017). A Mechatronic Approach for the Detection of Wheel Slip/Slide and Antislip Control of Locomotive with AC Traction Motors. *American Journal of Mechanics and Applications*, 5(6), 47-52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11> (in English)
9. Jacobs, S., Vandenbossche, L., & Attrazic, E. (2019). How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design: A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 39-48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550> (in English)
10. Sahoo, S. K., & Bhattacharya, T. (2016). Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4429-4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398> (in English)
11. Sequeira, J. L., & Casimiro, T. M. (2018). Portable Steam Engines and Traction Engines and Their Use in Rural Areas: The Case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*, 40(1), 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921> (in English)
12. Tudor, E., Strambeanu, D., Lipcinski, D., Nicolaie, S., Ilie, C., Ovezee, D., Tanase, N., Voina, A., & Fartan, M. (2021). Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. In *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* (pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.02.2022

Прийнята до друку: 20.06.2022

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.191:[622.1:519.6]

Н. К. БОНДАРЕНКО¹, О. Л. ТЮТКІН^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (093) 696 14 44, ел. пошта vidpsec.mit@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

Порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену

Мета. У роботі передбачено провести порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену й отримати достовірність авторської системи параметричного аналізу. **Методика.** Порівняльний аналіз результатів досліджень переміщень перегінного тунелю проведено за двома етапами. На першому етапі проаналізовано переміщення оправи перегінних тунелів між станціями «Славутич» – «Осокорки», «Осокорки» – «Позняки» та «Позняки» – «Харківська», отримані в ході маркшейдерських досліджень. На другому етапі виконано чисельний аналіз методом скінчених елементів. Для цього аналізу створено моделі трьох кілець оправи. Саме ці кільця обрані тому, що в них спостерігався максимальний рівень вертикальних переміщень, спричинених впливом інженерно-геологічних умов частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі Дніпра. Ці умови характеризуються шаруватістю слабких та водонасичених ґрунтів (піски різної крупності та щільності, супіски, легкі суглинки та глини). Оправа реального перегінного тунелю є стандартною конструкцією, яку застосовано під час щитової проходки Київського метрополітену. У моделях відображено геометричні розміри перегінних тунелів, а також деформаційні характеристики та щільність ґрунтів шаруватого масиву. **Результати.** Автори проаналізували характеристики шаруватого масиву та максимальні переміщення тунелів частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі р. Дніпро. У ході чисельного аналізу отримано вертикальні переміщення моделей трьох кілець оправи. Проведено порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень. Отриманий рівень похибки (до 15 %) між результатами маркшейдерських та чисельних досліджень доводить, що розроблені основи параметричного аналізу є достовірними. **Наукова новизна.** Уперше впроваджено теоретичні основи параметричного аналізу для реального підземного об'єкта. Авторські розробки, пов'язані зі створенням скінчено-елементних моделей на основі реальних характеристик ґрунтів шаруватого масиву, надають високий рівень близькості результатів теоретичних розробок та інструментальних маркшейдерських вимірювань. **Практична значимість.** Обґрунтовано параметри деформованого стану, що виникає в горизонтальній виробці під час щитової проходки.

Ключові слова: метрополітен; перегінний тунель; шаруватий масив; щитова проходка; порівняльний аналіз; параметричний аналіз; маркшейдерські вимірювання; метод скінчених елементів

Вступ

Освоєння підземного простору мегаполісів та розвиток пов'язаної з ним інфраструктури є важливим завданням будівництва як галузі [9]. Спорудження метрополітену – один зі способів його вирішення, однак існує низка факторів, що перешкоджають нормальній експлуатаційній роботі цього виду міського транспорту.

Відомо, що найбільш ефективним способом спорудження перегінних тунелів, які з'єднують станції метрополітену, є щитова проходка [3, 6]. Однак навіть наявність повністю підкріпленого прохідницьким щитом забою не виключає ситуації зменшення міцності та стійкості горизонтальної виробки [2, 10]. Під час спорудження перегінних тунелів за допомогою прохідницького

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

щита спостерігався негативний вплив породного шаруватого масиву, а саме поява значних вертикальних переміщень [5].

Причиною подібного розвитку деформованого стану є складна інженерно-геологічна ситуація. Наприклад, у м. Києві більша частина Сирецько-Печерської лінії метрополітену на лівому березі р. Дніпро знаходиться в межах старого русла й характеризується складним шаруватим масивом, що складений водонасиченими (піски різної крупності та щільності) та слабкими (супіски, легкі суглинки та глини) ґрунтами.

Безсумнівно, навіть однорідний масив із таких ґрунтів викликав би в оправі перегінного тунелю значні переміщення, що вимірюються десятками міліметрів [2, 3, 5]. Наявність шаруватості, яку на деяких ділянках Київського метрополітену доповнюють ґрунтові вклинювання та лінзи, ускладнює цю ситуацію, збільшуючи рівень переміщень.

Оцінити деформований стан перегінного тунелю, що залягає в шаруватому масиві, можна за допомогою чисельного аналізу [4, 7], од-

нак будь-які скінченно-елементні моделі потребують перевірки та верифікації. А їх можна провести лише за умови порівняння чисельного дослідження, що складає основи параметричного аналізу [1], та маркшейдерських вимірювань переміщень оправи перегінного тунелю.

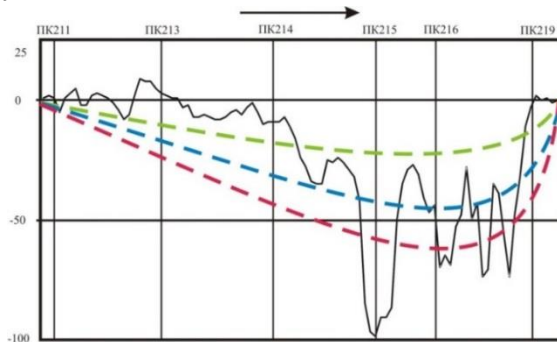
Мета

Ми ставимо за мету статті провести порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену й отримати достовірності авторської системи параметричного аналізу на основі близькості отриманих результатів скінченно-елементного аналізу й інструментальних вимірювань.

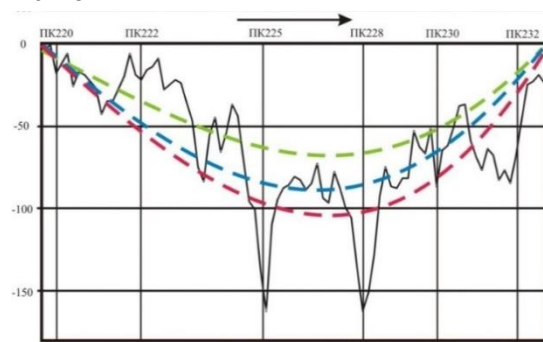
Методика

У рамках статті проаналізовано переміщення перегінних тунелів, споруджених за допомогою щитової проходки (рис. 1).

a – a



б – б



в – в

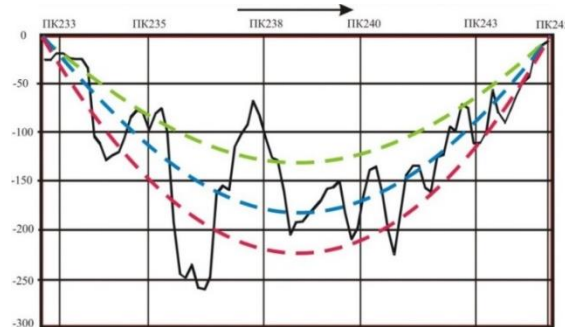


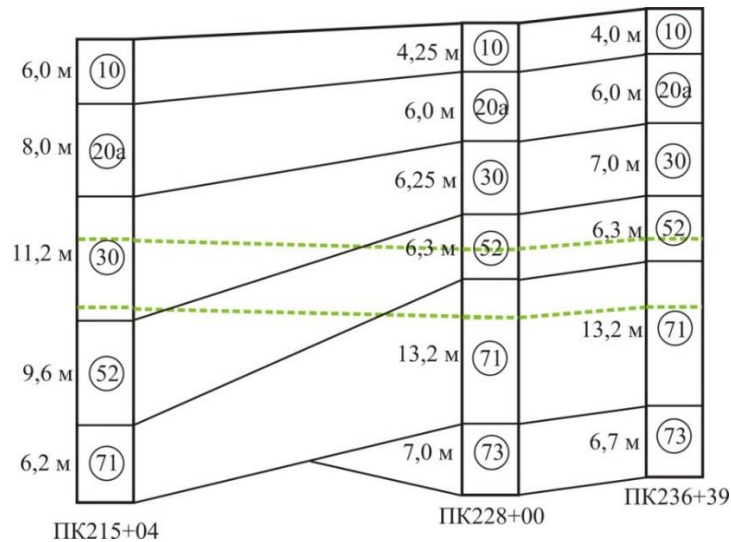
Рис. 1. Діаграми вертикальних переміщень перегінних тунелів між станціями:
а) «Славутич» – «Осокорки»; б) «Осокорки» – «Позняки»; в) «Позняки» – «Харківська»

Fig. 1. Diagrams of vertical movements of running tunnels between stations:
а) «Slavutych» – «Osokorky»; б) «Osokorky» – «Pozniaky»; в) «Pozniaky» – «Kharkivska»

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Переміщення оправи отримано спеціалістами АТ «Київметробуд» і ДП «Укргеодезмарк» у ході маркшейдерських досліджень протягом 1995–2001 рр. Слід звернути увагу, що в плані, окрім звичайних ліній, застосовано так звані «короткі» пікети (50 і 75 м), тому на графіках переміщень по осі абсцис сітка не є рівномірною (рис. 1). На них визначено чотири рівні переміщень: чорна суцільна лінія – вертикальні переміщення, виміряні 1995 року після спорудження перегінних тунелів; зелена пунктирна лінія – вертикальні переміщення, прогнозовані під час проєктування; синя пунктирна лінія – вертикальні переміщення, притаманні інженерно-

a – a



б – б

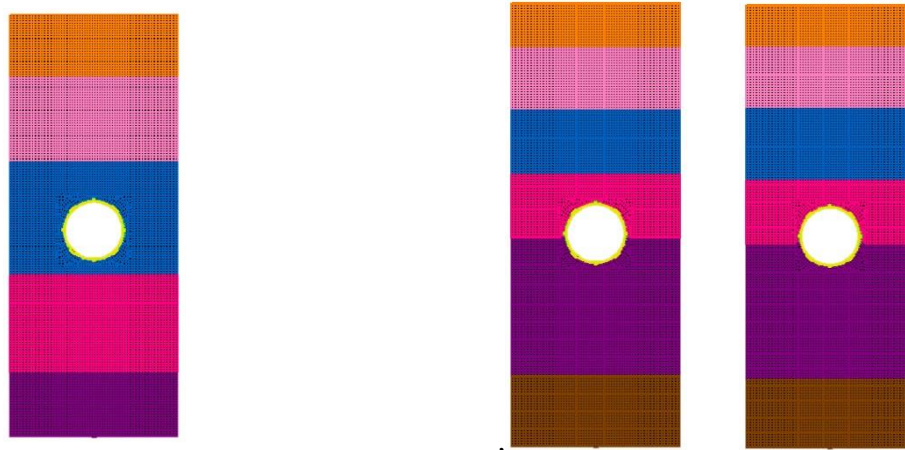


Рис. 2. Інженерно-геологічний розріз (а) (зеленою пунктирною лінією показано розташування перегінного тунелю) і карти деформаційних характеристик моделей, що йому відповідають (б)

Fig. 2. Engineering and geological section (a) (the location of the running tunnel is shown by the green dashed line) and maps of the deformation characteristics of the models corresponding to it (b)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Слід також зазначити, що масив, який у реальності характеризується значними нашаруваннями, дещо спрощено. Далі шари з близькими значеннями модулів пружності (у рамках діапазону $\chi=1,05\dots1,07$) вважаємо одним шаром із середньозваженими характеристиками модуля пружності E_m (рис. 2, а). Після надання деформаційних характеристик (рис. 2, б), прикладення власної ваги та граничних умов проведено аналіз методом скінченних елементів.

Результати

Результати параметричного аналізу перегінного тунелю Київського метрополітену, основи якого викладено в [1], є підґрунтям для порівняння з інструментальними даними (вертикальні переміщення кілець).

Оправа перегінного тунелю є стандартною конструкцією, яку застосовано під час щитової проходки Київського метрополітену. Параметри оправи: матеріал трапецієподібних блоків із гумовою гідроізоляцією шириною 1,2 м – залізобетон, внутрішній діаметр – 5,1 м (габарит перегінного тунелю), зовнішній діаметр – 5,6 м, модуль пружності $E_k=32,5 \cdot 10^3$ МПа.

До подальшого аналізу взято такі кільця оправи перегінного тунелю: кільце № 1 (дільниця між станціями «Славутич» – «Осокорки», ПК215+04); кільце № 2 (дільниця між станціями «Осокорки» – «Позняки», ПК228+00); кільце № 3 (дільниця між станціями «Позняки» – «Харківська», ПК236+39).

Саме ці кільця обрано тому, що в них спостерігався максимальний рівень вертикальних переміщень, причиною чого є вплив інженерно-геологічних умов частини Сирецько-Печерської лінії на лівому березі Дніпра, що характеризується шаруватістю слабких та водонасичених ґрунтів. Аналіз цих властивостей свідчить, що інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) мають малі деформаційні характеристики, а саме максимальний модуль пружності $E_m=45$ МПа (глина тугопластична (ІГЕ–73)) та мінімальний $E_m=10\dots15$ МПа (якщо не брати до уваги ІГЕ–1, який не бере участі в проходці, межами діапазону є пісок дрібний гумусований (ІГЕ–10) та супісок плинний (ІГЕ–20а)). Таким чином, κ -параметр для меж визначеного діапазону модуля пружності матриці $E_m=10\dots45$ МПа складає відповідно $\kappa=722,2\dots3250$, і залізобетонної оправи

не вистачає, щоб протидіяти значному деформуванню ґрунтового масиву.

Значення χ -параметру для меж визначеного діапазону, що характеризує відношення між модулем пружності матриці та шару [1], перебуває в діапазоні $\chi=2,0\dots2,33$ (до 3,0 для піску дрібно-водонасиченого (ІГЕ–30) з $E_m=30$ МПа та супіску плинного (ІГЕ–20а) з $E_s=10$ МПа). Із рис. 1 зрозуміло, що вертикальні переміщення в характерних точках виробки за товщини шару навіть 0,5R для $\chi=2,0$ є такими, що призведуть до обвалення виробки $R=3,0$ м. Тому застосування щитової проходки, під час якої всі частини виробки захищені конструкцією прохідницького щита, є логічним, однак потребує обґрунтування параметрів та матеріалу оправи.

Розрахунок напружено-деформованого стану виробки з одиничним радіусом та скейлінг переміщень і напружень для радіуса $R=3,0$ м дозволяють стверджувати, що для діапазону $\kappa=1\,000\dots3\,000$ (залізобетонна оправа, що знаходиться в ґрунтовій матриці, складеній слабкими пісками, супісками та суглинками) застосування оправи із залізобетонних блоків потребує перегляду й заміни на чавунну. Щоб проаналізувати цей розрахунковий випадок і довести правильність авторських положень параметричного аналізу, було розраховано реальні кільця оправи в реальному ґрунтовому масиві Київського метрополітену.

Аналіз деформованого стану свідчить (див. рис. 1), що в реальній ситуації будівництва та експлуатації цієї частини Сирецько-Печерської лінії спостерігаються зони надмірних переміщень, незначний відсоток вірогідності їх появи на «червоному» рівні. Так, пікові вертикальні переміщення між станціями «Славутич» – «Осокорки» відзначено на ПК215+04 (–99 мм), ПК216+20 (–70 мм), ПК217+39 (–74 мм), ПК218+20 (–74 мм); між станціями «Осокорки» – «Позняки» – два явні піки на ПК225+19 (–163 мм) й ПК228+00 (–163 мм), два піки на ПК223+20 (–84 мм) й ПК230+00 (–87 мм) та протяжна зона значного деформування між ПК230+61 (–77 мм) й ПК231+60 (–85 мм); між станціями «Позняки» – «Харківська» – на ПК236+39 (–263 мм), ПК238+80 (–205 мм), ПК239+70 (–210 мм) та ПК241+00 (–226 мм).

Оскільки результати вимірювання під час маркшейдерських досліджень наведено для

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

шелиги склепіння, то максимальні значення чисельного аналізу надаємо також для неї. Вертикальні переміщення шелиги склепіння для кільця № 1 (ПК215+04) становлять –114,49 мм, кільця № 2 (ПК228+00) – –190,61 мм, кільця № 3 (ПК236+39) – –255,07 мм. Потрібні для порівняльного аналізу результати наведено на рис. 3.

Максимальні вертикальні переміщення кільця № 2 і 3 пояснюються тим, що вони перетинають два шари ґрунту, що було досліджено раніше для випадку переходу тунелю від буча-

цьких пісків до спондилової глини [8]. Найбільш точно відображає авторську систему параметричного аналізу кільце № 1, яке майже повністю відповідає розрахунковому випадку (див. рис. 2, а). Слід підкреслити, що розглянуті розрахункові випадки дещо ускладнюються наявністю декількох шарів. Відповідно, під час порівняння вертикальних переміщень, отриманих у ході чисельного аналізу та маркшейдерських вимірювань, спостерігаються деякі похибки.

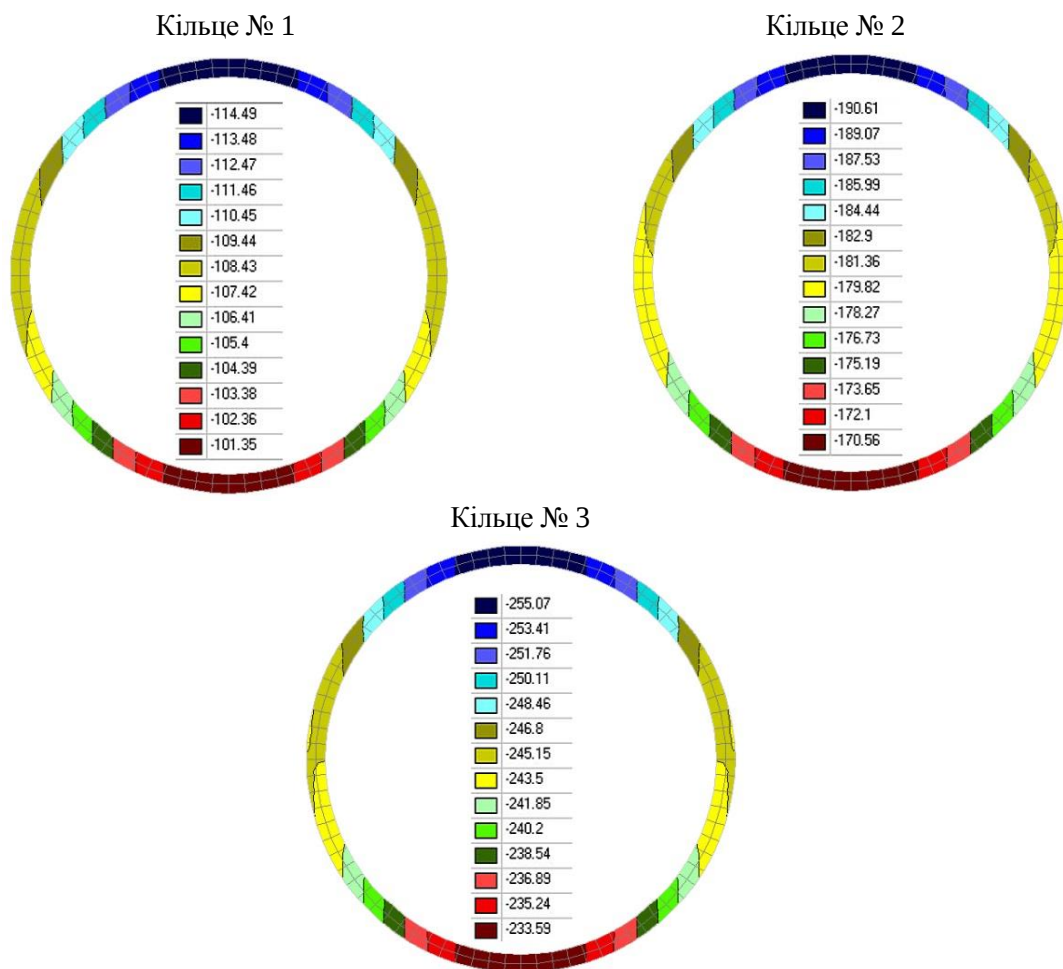


Рис. 3. Вертикальні переміщення фрагмента скінченно-елементної моделі (оправа перегінного тунелю)

Fig. 3. Vertical movements of a fragment of a finite element model (lining of running tunnel)

Для доведення достовірності авторських положень проведено порівняння вертикальних переміщень, отриманих у ході чисельного аналізу

та маркшейдерських вимірювань реальних кільць перегінного тунелю частини Сирецько-Печерської лінії (табл. 1).

Таблица 1

Порівняння параметрів деформованого стану

Table 1

Comparison of parameters of the deformed state

Вертикальні переміщення, мм	Кільце № 1 (ПК215+04)	Кільце № 2 (ПК228+00)	Кільце № 3 (ПК236+39)
Результат чисельного аналізу	–114,5	–190,6	–255,1
Результат маркшейдерських вимірювань	–99,0	–163,0	–263,0
Похибка, %	13,5	14,5	3,0

Діапазон похибки (3,0...14,5 %) свідчить про високий ступінь адекватності розроблених теоретико-практичних положень параметричного аналізу, який дозволяє з достатньою мірою точності прогнозувати стан закріпленої горизонтальної виробки, що залягає в шаруватому масиві.

Наукова новизна та практична значимість

У рамках наукової статті вперше впроваджено теоретичні основи параметричного аналізу для реального підземного об'єкта. Авторські розробки, пов'язані зі створенням скінченно-елементних моделей на основі реальних характеристик ґрунтів шаруватого масиву, свідчать про високий рівень близькості результатів теоретичних розробок та інструментальних маркшейдерських вимірювань. Практична значимість наукового дослідження полягає в обґрунтуванні параметрів деформованого стану, що виникає в горизонтальній виробці під час щитової проходки.

Висновки

На підставі викладеного можемо зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз маркшейдерських вимірювань частини Сирецько-Печерської лінії

Київського метрополітену на лівому березі р. Дніпро доводить, що вплив шаруватості слабких і водонасичених порід ґрунту є вирішальним для генезису деформованого стану (вертикальні переміщення в десятки та сотні міліметрів).

2. Розроблені скінченно-елементні моделі, що враховують реальні параметри оправи перегінного тунелю та характеристики ґрунтів шаруватого масиву, можуть характеризуватися як такі, що забезпечують високу точність отриманих у ході чисельного аналізу результатів.

3. Отриманий рівень похибки (до 15 %) між результатами чисельних та маркшейдерських досліджень доводить, що розроблені основи параметричного аналізу є достовірними й можуть бути запроваджені під час практичних розрахунків перегінних тунелів та інших горизонтальних виробок Київського метрополітену.

У ході подальших досліджень заплановано створити спеціалізований алгоритм, який дозволить прогнозувати деформований стан горизонтальної виробки безпосередньо під час проведення щитової проходки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alkhdour A., Radkevych A., Tiutkin O., Bondarenko N. The parametric analysis of the supported circular working interacting with the layered massif. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. Iss. 012033. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012033>
2. Atkinson J. H., Potts D. M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Geotechnique*. 1977. Vol. 27. Iss. 2. P. 203–215. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.2.203>

3. De Oliveira D. G. G., Thewes M., Diederichs M. S., Langmaack L. EPB tunnelling through clay-sand mixed soils: Proposed methodology for clogging evaluation. *Geomechanics and Tunneling*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 375–387. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800009>
4. Do N., Dias D., Oreste P., Djeran-Maigre I. Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunneling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*. 2014. Vol. 9. Iss. 4. P. 673–694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0279-7>
5. Hefny A., Chua H. An investigation into the behavior of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Vol. 21. Iss. 3–4. P. 428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070>
6. Maidl B., Herrenknecht M., Maidl U., Wehrmeyer G. *Mechanised shield tunneling*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag, 2012. 490 p.
7. Migliazza M. R., Chiorboli M., Giani G. P. Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*. 2009. Vol. 36. Iss. 1–2. P. 113–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.005>
8. Petrenko V. D., Huzchenko V. T., Tiutkin O. L., Tiutkin D. V. Analysis of deformed state structures of the Kyiv metro running tunnels on a transition zone from spondylov's clay to buchatskiy sands. *Science and Transport Progress*. 2014. Vol. 4. Iss. 52. P. 127–138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27321>
9. Pshynko O., Radkevych A., Netesa M., Netesa A. Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15. Iss. 1. P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008>
10. Yang X. L., Wang J. M. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011. Vol. 26. P. 462–471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.01.002>

N. K. BONDARENKO¹, O. L. TIUTKIN^{2*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (093) 696 14 44, e-mail vidpsec.mit@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

^{2*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytiutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

Comparative Analysis of the Results of Mine Surveying and Numerical Studies of the Running Tunnel of the Kyiv Metro

Purpose. The article is aimed to perform a comparative analysis of the results of mine surveying and numerical studies of the running tunnel of the Kyiv metro and obtain the reliability of the author's system of parametric analysis. **Methodology.** The comparative analysis of the results of research on the displacements of the running tunnel was carried out in two directions. In the first direction, the movement of the lining of the running tunnels between the stations «Slavutych» – «Osokorky», «Osokorky» – «Pozniaky» and «Pozniaky» – «Kharkivska» obtained in the course of mine surveying studies was analyzed. In the second direction, a numerical analysis using the finite element method was performed. For this analysis, models of three lining rings were created. These rings were chosen because the maximum level of vertical movements was observed in them. Their reason is the influence of the engineering and geological conditions of the part of the Syretsko-Pecherska line on the left bank of the Dnipro River. These conditions are characterized by the layering of weak and water-saturated soils (sands of various sizes and densities, sandy loams, light loams and clays). The lining of the real tunnel is a standard structure used for shield tunneling of the Kyiv metro. The models reflect the geometric dimensions of the running tunnels, as well as the deformation characteristics and soil density of the surrounding layered massif. **Findings.** The authors analyzed the characteristics of the layered massif and the maximum displacements of the running tunnels of the part of the Syretsko-Pecherska line on the left bank of the Dnipro River. In the course of the numerical analysis, the vertical displacements of the models of the three lining rings were obtained. A comparative analysis of the results of mine surveying and numerical studies was carried out. The obtained level of error (up to 15 %) between the results of mine surveying and numerical studies proves that the developed bases of parametric analysis are reliable. **Originality.** For the first time, the theoretical foundations of parametric analysis for a real underground object were introduced. The author's developments related to the creation of finite-element models based on the real characteristics of the soils of the layered massif provide a high level of similarity to the results of theoretical developments and instrumental

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

mine surveying measurements. **Practical value.** It consists in the substantiation of the parameters of the deformed state that occurs in the horizontal working during shield tunneling.

Keywords: metro; running tunnel; layered massif; shield tunneling; comparative analysis; parametric analysis; mine surveying measurements; finite element method

REFERENCES

1. Alkhdour, A., Radkevych, A., Tiutkin, O., & Bondarenko, N. (2022). The parametric analysis of the supported circular working interacting with the layered massif. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 970, Iss. 012033, pp. 1-7). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012033> (in English)
2. Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (1977). Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil. *Geotechnique*, 27(2), 203-215. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.2.203> (in English)
3. De Oliveira, D. G. G., Thewes, M., Diederichs, M. S., & Langmaack, L. (2018). EPB tunnelling through clay-sand mixed soils: Proposed methodology for clogging evaluation. *Geomechanics and Tunnelling*, 11(4), 375-387. DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201800009> (in English)
4. Do, N., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2014). Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*, 9(4), 673-694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0279-7> (in English)
5. Hefny, A., & Chua, H. (2006). An investigation into the behavior of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070> (in English)
6. Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised shield tunneling*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag. (in English)
7. Migliazza, M. R., Chiorboli, M., & Giani, G. P. (2009). Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground. *Computers and Geotechnics*, 36(1-2), 113-124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.005> (in English)
8. Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., Tiutkin, O. L., & Tiutkin, D. V. (2014). Analysis of deformed state structures of the Kyiv metro running tunnels on a transition zone from spondylov's clay to buchatskiy sands. *Science and Transport Progress*, 4(52), 127-138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27321> (in English)
9. Pshynko, O., Radkevych, A., Netesa, M., & Netesa, A. (2020). Problems of development of an underground transport infrastructure of cities. *Transport Problems*, 15(1), 81-91. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-008> (in English)
10. Yang, X. L., & Wang, J. M. (2011). Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 462-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.01.002> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.02.2022

Прийнята до друку: 15.06.2022

UDC 621.311.25:[627.5:627.81]

V. Y. ULIANOV^{1*}, V. V. BILYK^{2*}

^{1*}Dep. «Engineering Geology and Geotechnics», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756 33 43, e-mail ulianov.vasily@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-9028-3408

^{2*}Laboratory of Research of Nuclear and Thermal Power Plants, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (063) 247 27 42, e-mail kolemasakar@gmail.com, ORCID 0000-0002-4435-2388

Research Results for the Earth Dam Condition of Cooling Pond of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant

Purpose. The work is aimed to determine the real location in space and conduct possible measurement of the true geometric dimensions of the NPP cooling pond dam, especially its underwater part and to detect the additional and previously unaccounted factors that could affect these parameters, as well as the state of the entire structure in general. **Methodology.** A comprehensive analysis of all available materials about engineering surveys and geotechnical studies was carried out at the dam of the cooling pond of the Zaporizhzhia NPP. Due to this, a more comprehensive look at the results of engineering and geological surveys was obtained. **Findings.** The state of soils in the body of the earth dam can be influenced by weakened and poorly studied zones of the dam. These zones were determined based on the analysis of the soil studies data of the dam's ground. Previously uncovered issues on the operation of the facility were raised and considered. The ways and methods for additional study of the earth dam of the cooling pond were selected, the conditions for their use were substantiated. A numerical relationship between the thickness of loose soils and the amount of surface subsidence were determined for the first time. A generalized geological section of the dam body was compiled for further modeling of geotechnical processes. **Originality.** For the first time since construction, a comprehensive program was developed for assessing the technical condition of the cooling pond dam using innovative methods from the Laboratory of Research of Nuclear and Thermal Power Plants in Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA). In particular, combined hydrographic-geodetic and aerovisual methods were proposed using specially designed universal leading signs that have no analogues in world practice. **Practical value.** The application of the developed comprehensive program using innovative methods allows assessing the technical condition of the cooling pond dam of the NPP.

Keywords: Zaporizhzhia NPP; cooling pond dam; alluvial sands; soil liquefaction; dynamic instability; subsidence; slope creep

Purpose

The objectives of the research are to collect data for the development of a substantiated technical project for monitoring the soils in the body of cooling pond dam of the Zaporizhzhia NPP (ZNPP) for the entire estimated period of operation.

The purpose of the research is to determine the parameters of the actual location in space and the possible measurement of the geometric dimensions of the NPP cooling pond dam, as well as to identify additional and previously unaccounted factors that can affect these parameters, as well as the state of the entire structure as a whole.

Issue status

The results of high-precision geodetic observations, analysis of the main buildings and structures conditions on the power units of Zaporizhzhia NPP, as well as the results of engineering and geological surveys, led to the conclusion that many factors affect the bearing properties of sandy foundations.

One of the significant indicators is the morphological features of the sands of eolian-alluvial genesis. Mostly, the change in the properties of sandy soils affected the on-ground artificial structures of the site. This also applies to hydraulic structures. The main one is the cooling pond dam. This is one of the key facilities for the safe operation of nuclear power plants. There is a high necessity to monitor earth dam of the cooling pond regularly. The

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

need to monitor this facility is justified by common sense and the requirements of current regulatory documents and job descriptions for operation. The importance of an additional study of the cooling pond was repeatedly reminded in their letters by the scientists of PSACEA.

The special significance of this object in its current state requires the allocation of all studies in a separate section. This section should be considered separately from other hydraulic structures of the industrial site.

The article is devoted to resolving some questions about the possible causes of subsidence of some buildings and structures on the NPP site that have not been stabilized so far.

Physical and geographical conditions.

Administratively, the work area is located in the city of Enerhodar, Zaporizhzhia region. The research area is located in the western part of the NPP industrial area within the hydraulic structures.

Geomorphologically, the territory is located on the first floodplain (sandy) left bank of the Vytachivsko-Buzka terrace of the river Dnipro and is located on the left bank of the Kakhovka reservoir.

Before the start of construction, the study area was represented by the water area of the Kakhovka reservoir, formed mainly in the floodplain of the river Konka and, partially, on the coastal terrace of the river Dnipro with eolian relief forms (the so-called «hills») and absolute surface elevations from +18.00 m to +25.0 m. Absolute elevations of the Kakhovka reservoir bottom surface vary from +8.0 m to +9.8 m. The relief of the surface of the earth dam is slightly hilly, mainly eolian, formed by the winding of sands. In some places, the sands are fixed by arboreal and herbaceous vegetation. The absolute elevation of the surface is +16.0...+22.0 m. The average elevation of the dam crest is +18.5...+19.8 m.

The main water bodies that affect the hydrogeological situation of the study area include:

- Kakhovka reservoir;
- cooling pond.

Characteristics of hydraulic structures of Zaporizhzhia NPP.

The hydraulic structures of the Zaporizhzhia NPP are a complex set of engineering structures. This complex includes a cooling pond dam with blowdown facilities, inlet and outlet channels,

pumping stations for various purposes, spray ponds, cooling towers, access roads, and underground utility networks.

The combined use of such hydraulic structures as a cooling pond, spray ponds, and cooling towers allows you to combine the maneuverability of coolers in changing weather conditions. This scheme has no analogues and, in fact, at one time was experimental. This led to the problems associated with the soils on which the individual structures of this system are located, in particular, the dam of the cooling pond.

The cooling pond of the Zaporizhzhia NPP was formed by blocking off part of the water area of the Kakhovka reservoir by the method of filling a sand dam. It is a water object where the effect of heated waste water from nuclear power plants closes.

From the south and east, the earth dam adjoins the shore. From the north and west it is washed by the waters of the Kakhovka reservoir. The normal retaining level (NRL) of the Kakhovka reservoir is +16.0 m and the dead volume level (DVL) is +12.0 m.

The cooling pond dam has an irregular arc shape and reaches a length of 5,830 km (including the cargo pier dam). The absolute marks of the dam crest are +19.0...+22.0 m. The width along the water's edge is 216...590 m.

Type of dam – soil filled without anti-filter systems (devices). It is homogeneous with freely formed slopes, wide-profile (spread profile). The dam was adopted on the basis of the Feasibility Study of the General Designer in connection with the need to reduce the amount of slope support.

Material – fine and medium Quaternary eolian-alluvial sands of the valley of the rivers Dnipro and Konka. Laying method – mainly alluvium by means of hydromechanization under water to a depth of 8 m, partially – by dry digging.

History of construction the cooling pond dam of the nuclear power plant.

Since the mid-1980s, alluvial low-pressure barrier dams have been widely used in cooling reservoirs of nuclear and thermal power plants. Such dams are also used for protective dams on reservoirs with beach dynamic wave-damping slopes. This method of damping waves in shallow water is taken from the natural analogue of sea sandy beaches.

The design of alluvial dams made of sandy or sandy-gravel soils with the laying of the upper slope 1: 30 – 1:40 with a height of dams up to 5 m turned out to be more economical than with the traditional laying 1: 3 – 1: 5 with the slope fastened with stone or concrete. The increase in the volume of alluvium in terms of cost was offset by the rejection of fastening and the simplification of the alluvium technology.

A representative example of the use of alluvial dams with a beach wave-damping slope was the construction of the enclosing dam of the Zaporizhzhia NPP on the Kakhovka reservoir.

The initial project provided the dumping of a stone banquet with a volume of 1.7 million m³ into the water. The decision to replace the rock banquet with sand dam fill with a 1:50 embankment inclination (note: in later designs the embankment inclination was 1:40 and 1:45) and the submerged slope with a 1:7 inclination was made after research and heated debate in Ministry of Energy of the USSR. The decision was supported by the chief engineer of the Hydroproject Institute T.P. Dotsenko and the chief hydraulic engineer of Atomteploelektroproekt R.G. Minosyan. The real savings from the implementation of this decision amounted to about 30 million USD [2, 6].

The construction of sand dams with a wave-resistant beach slope became possible only thanks to the use of hydromechanization technology, which in those years was a major achievement of domestic hydraulic engineering.

The site in the city Enerhodar in the Dniprodzerzhynsk Hidromekhanizatsiia construction department (currently Enerhohidromekhanizatsiia OJSC in the city of Kamianske) was created in 1970 with the start of construction of the Zaporizhzhia State District Power Plant and existed until 1988. The administration itself was created in 1955 in Dniprodzerzhynsk (now Kamianske). Specialization: creation of reservoirs and construction of dams. During the construction of the ZNPP, the construction department was headed by Lotov A. A. Three dredgers of the «350-50L» series worked on the construction.

Engineering and geological characteristics of the site

The geological structure of the area is due to the participation of granites of the Archean-Proterozoic age. They form the crystalline base-

ment of the Ukrainian Crystalline Massif (approximately, at a depth of about 60 m), overlain by a layer of clays of the Sirohozkyi (former Kharkiv) Paleogene stage, which presumably lie on the sandstones of the Buchatskyi Paleogene stage.

In the studied area, the clays of layer 9 are greenish-gray, dense with rare inclusions of sandstone concretions, uncovered at a depth of 33-35 m (absolute elevation -13.0.-14.0 m). Paleogene clays underlie the Quaternary alluvial sands, about 20 m thick, on which the cooling pond dam rests.

The dam was built on fine alluvial sands by hydraulic reclamation. The body of the dam is not uniform in density. At the base of the dam sandy loams GTE-6 and dark gray loams with an admixture of plant residues of soft-plastic consistency (GTE-7) with a thickness of 0.2-1.2 m lie. Fine alluvial sands of natural composition (GTE-4) with a thickness of up to 14 m lie below. Alluvial sands of medium size (GTE-5) were uncovered at absolute elevations of -2.3...-6.0 m.

Additionally, in the thickness of alluvial soils, according to the results of late engineering surveys in certain sections of the dam, the following GTEs were identified, namely:

GTE-1A1 – sand is fine, loose, with a low degree of water saturation;

GTE-11A – fine, loose, dynamically unstable, water-saturated sand;

GTE-1A2 – fine sand, medium density, low degree of water saturation;

GTE-1A3 – sand is fine, dense, saturated with water;

GTE-1a1 – sand is medium, loose, with a low degree of water saturation;

GTE-1a2 – medium sand, medium density, low degree of water saturation.

On the sections of the dam, erected by the so-called «dry method», the following GTEs have been identified:

GTE-1B1 – bulk sand, fine, loose, wet;

GTE-1B2 – bulk sand, fine, medium density, wet.

In the thickness of natural soils GTE-4, the following sublayers are additionally identified:

GTE-4b – fine sand, medium density, water-saturated;

GTE-4v – fine, dense, water-saturated sand.

Hydrogeological conditions.

Two aquifers have been explored on the site to a depth of 60 m. The first (non-pressure) is divided into two subhorizons. The first subhorizon is confined to the thickness of alluvial soils (GTE -1A). The second subhorizon is confined to the thickness of Quaternary sands of layers 4.5 m.

The depth of the groundwater level is from 2.3 m to 4.6 m (absolute elevation +16.34...+16.92 m). The thickness of the aquifer is 16.0...20.0 m. The position of the groundwater level is determined by the normal retaining level (NRL) of the Kakhovka reservoir and cooling pond. The maximum calculated water level at 1% supply in the Kakhovka reservoir is 16.35 m. The clays of layer 9 at depths of 33.0...35.0 m (absolute elevation +13.0...+14.0 m) serve as an aquiclude. The permeability of the water-bearing strata is medium and high. The filtration coefficient of sands in layer 1A is 10 m/day, layer 4-5 is 3 m/day, layer 5 is 20.7 m/day.

For the survey period, the groundwater level was revealed at +15.6...+16.2 m (1986). The chemical composition of the water was hydrocarbonate-sulfate-calcium-sodium. The value of bicarbonate alkalinity of water was 0.61-1.4 mg/dm³, the pH value was (pH=6.5). Waters are moderately aggressive to concrete structures.

The position of the water table at the dam is affected by leakage from the discharge channel, from cooling towers and spray ponds. Outside built-up areas, the position of the groundwater table is simpler.

Methodology*Analysis of hydrogeological observations.*

According to the results of long-term observations, there is a periodic change in the chemical composition of groundwater, presumably associated with water-chemical processes in the recycling water supply system of the Zaporizhzhia NPP.

The Kakhovka reservoir and the NPP cooling pond are the basic water objects that affect the hydrological and hydrogeological conditions of the study area.

The main unfavorable technogenic factor slowing down the processes of stabilization in the ground base of the cooling pond dam, is the high level of groundwater due to the accepted general configuration of the NPP hydraulic structures. The

degree of influence of high groundwater levels together with the constant change in the chemical composition and temperature of groundwater, on these processes has yet to be assessed [3].

It is known that the stabilization of alluvial sand massifs, among other factors, also depends on the formation of silica gels around sand particles, which are usually represented by quartz and feldspars. However, this process is rather complicated and depends on the physicochemical situation in the bulk of the massif. It has been established that with aging or a decrease in pH of silicate solutions, occurs their gradual transition from a molecularly dispersed state to a colloidal one. In this process, relatively stable particles with a certain molecular weight are formed, which could exist for a long time. After the polymerization of silicic acid, a certain amount of it in molecular form remains in solution. This amount is equal to the solubility of amorphous silica.

The solubility of silica depends on the form of the solid phase. Under normal conditions, the solubility of amorphous silica is, according to various authors, from 0 to 120 mg/l. The solubility of crystalline modifications of silica is estimated at 6-22 mg/l. With an increase in the temperature and pH of the environment, the solubility of all forms of silica increases, which generally slows down the processes of stabilization of the alluvial sand massif [5, 9].

Another factor that directly affects the above processes may be the chemical contamination of groundwater and soil with oil products and synthetic surfactants. A consequence of chemical pollution is a decrease in the shear strength of dispersed soils due to the adsorption of oil products and formation of surfactants on the surface of sand grains with the formation of a hydrophilic film. The number of mechanical contacts that cause shear resistance is reduced. The degree of influence of the groundwater and high temperatures on the decrease in the strength and deformation characteristics of sands has not been quantitatively determined. This circumstance is confirmed by the belonging of dynamically unstable layers of alluvial sands to zones near the groundwater table. This is clearly manifested in almost all graphs of dynamic sounding.

To test the validity of goals for improving hydrogeological monitoring of the cooling pond dam,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

a special extended cycle of measurements of the groundwater levels, their temperature, and chemical composition was proposed.

For example, the temperature of groundwater in regime wells located outside the areas of spray pools, discharge channel and cooling towers had to be measured at 2 points: in the standard way (1 m below the groundwater level) and additionally at the bottom of the wells. Similarly, it was planned to expand the collection of water samples for chemical analysis. In addition to samplings from the wells for the first time, water sampling and temperature measurements along profiles near the coastline in the cooling pond and the Kakhovka reservoir should be carried out. However, for a number of reasons, it was not possible to implement the plan till present days.

Analysis of information from the construction period and engineering surveys during the operation of the facility.

According to the information from the design solutions, the main method of forming the dam of the NPP cooling pond sand alluvium into the water to a depth of 8 m was chosen. It is also known that, in addition to obvious advantages, the method of alluvial dams also has significant disadvantages:

- poor seismic resistance of dams due to low soil density during alluvium;
- large subsidence during seismic action and the possibility of sliding slopes;
- increased demands on the composition of quarry soil, which may not always be available;
- a large need for energy during construction of the dam (in cases where the supply of pulp occurs through pressure pipelines);
- high demands on metal (pipes, vanes and casings of pumps quickly wear out and abrade, especially in coarse sandy and gravelly soils).

The disadvantages of winter alluvium are:

- reduction (by 20-30%) of work intensity;
- freezing of above-water slopes, which makes it difficult to drain water from the alluvial structure and can cause slopes to slide in spring (especially if the dam base is waterproof);
- higher cost of work.

The fact of slope slippage during alluvium was recorded at the beginning of work on the dam, despite all the technical measures taken. As already mentioned above, the dam of the Zaporizhzhia NPP cooling pond had no analogues and was ex-

perimental in its own way. This predetermined the problems associated with its stability in the future. So, during the operation of hydraulic structures, the following negative technogenic processes were recorded at the dam site:

1993 – collapse of the bucket slope adjacent to pumping station No 1 which supplies water to the cooling towers from the side of the spray pools;

1993 – slumping of the coastal ledge, composed of loose backfill sands in the area adjacent to the building of pumping station No 1;

1993 – surfacing the section of the pressure pipeline for supplying water to the spray pools.

Engineering surveys in the bulk of loose sands revealed zones of their technogenic decompaction to a dynamically unstable state (GTE-11A). It should be especially noted that during the period of surveys at the design stage, there were not found soils in this state within this section of the industrial site. However, according to conversations with local residents, there were areas of the so-called quicksand, in which repeatedly happens loss of large domestic animals.

Perhaps, for the first time, the detailed mechanism of loose soils displacement in the dam was described in the report on soils sliding into the bowl of the onshore pumping station NS-1, which supplies water to the cooling towers. The conclusions of the report, based on field research, laboratory work and office processing, stated the following:

- sands were characterized by an inhomogeneous degree of compaction and were divided into loose and medium density sands. Moreover, loose sands prevailed with the following soil characteristics: porosity coefficient 0.72 – 0.81, conditional dynamic resistance P_d – 1-2 MPa. Sands of the loose layer GTE-1B are characterized by free immersion of the drilling tool and probe;

- in natural conditions in the area of pumping station NS-1, the slope angle of the bank slope was 11° – 19°, and in the area of the dam body in the Kakhovka reservoir, the angle of the pool flattening was 7°. It should be expected that in the future the soils in the NS-1 area would tend to take a slip angle close to 7°. Sands with such a state and properties are characterized by dynamic instability and liquefaction;

– since the necessary additional compaction of the sand mass did not occur in time, the engineering and geological conditions for the survey period remain unstable. Thus, the possibility of further deformations is preserved. This will bring the backfill into motion;

– according to measurements of the cooling pond bottom at NS-1 there is a tendency for slope soils to slide towards the intake bucket of the pumping station. Taking into account the dynamics of water during the operation of the pumping station, a constant erosion of sagging soils should be expected in the water intake bucket. This will serve as an additional factor to the further sliding of the slopes.

In 1995 vibro-mapping of soils was carried out on the territory of pumping station No. 1 for supplying water to cooling towers No. 1 – 2 and to spray pools. The study was provided by the VIOGEM Research Institute (Belgorod) to assess the vibrational influence of process equipment on backfill soils.

The aim of the work was to obtain quantitative parameters of the vibrational influence on sandy soils in various parts of the backfill zone, to establish the main dependencies of their variability, and also to create a forecast for changes in the main parameters of soil vibrations during the joint operation of pumping station units.

The results of measuring the vibration parameters of backfill soils in the area of the operating pumping unit at the cooling tower No. 2 showed that the distribution of the total velocity and range of vibration displacements has an exponentially damping character.

The frequency of ground vibrations varied from 48...50 Hz at a distance of 1.0 m from the pipeline to 35 Hz at a distance of 18 m. With the simultaneous operation of two or more pumping units, an increase in the level of total vibration oscillations by 1,6...2,0 times. With an increase in the ground-water level in the backfill zone, the highest vibration level was in the flooded soil. There is a high probability of an increase in the vibrational characteristics of the soil by a factor of 3-4 times when the radial component of the damping exponent flattens out.

Subsequently, dynamically unstable soils were found in other sections of the dam. As indicated in the reporting materials, the causes of landslide pro-

cesses and technogenic decompaction of soils have not yet been clarified. The most probable causes of technogenic sands decompaction so far have been the following:

– insufficient compaction of sandy backfill soil during construction and planning works;

– change in the properties of technogenic (bulk, alluvial) sands during additional compaction;

– influence of the hydrodynamic regime of the reservoir;

– suffusion (mechanical) removal of soil;

– influence of dynamic load from motor vehicles in conditions of unstable foundation soils. The influence of this load was especially strong during the period of existence of a permanent road to Kamenka-Dniprovskaya until the moment of closing the zone of hydraulic structures of the NPP.

– seismic influence on soils;

Note. A special case of the vibration-dynamic influence on the soils of the dam is the well-known military events in the spring-autumn of 2022. The consequences of this influence for the entire NPP site are yet to be studied.

In addition to the above questions, other issues related to the reasons for the lack of soil stabilization in the dam body required study. In particular, at one time, completely insufficient attention was paid to the study of the morphological characteristics of the Quaternary eolian-alluvial sands developed at the ZNPP industrial site in the upper part of the section (the so-called «hills»). These and other characteristics should be studied in accordance with the requirements of RD 34 15.073-91, since they can directly affect the stabilization of subsidence not only in hydraulic structures, but also in critical buildings and structures of the ZNPP itself [7].

As indicated in some reports, it was recognized from the results of experimental studies that the dynamic stability of sands varies depending on their structural features.

The greatest influence on the dynamic stability of sands is exerted by the bulk density, particle size, the presence of «films» on the surface, and the degree of grain roundness. Analysis of the research results and the presence of well-rounded fine-grained sands from loose to dense composition on the NPP industrial site leads to the conclusion that loose sands under dynamic loads have

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

low dynamic stability, which increases with increasing density.

An increase in the number of silt-clay particles and the formation of a hydrophilic film (due to the sorption of oil products, surfactants) leads to greater decrease in the dynamic stability of sands.

In 2022, the studies to obtain numerical parameters of morphology for eolian-alluvial and alluvial sands at the Zaporizhzhia NPP site were carried out. For the first time, these studies were also carried out in a vertical section. The dependence of

the morphology index on the genesis of deposits was confirmed. To obtain numerical indicators of morphology, criteria for identifying eolian and eolian-alluvial sands in the upper part of the local geological section were proposed [8].

The summary geological section, reflecting the composition and condition of the soils in the body of the cooling pond dam, was compiled for the first time based on the materials of the surveys of 2011-2018. It is shown in Table 1.

Table 1

Geological Section and Condition of Soils in the Body of the Cooling Pond Dam of ZNPP According to the Results of Research in 2011-2018 (Generalized Data PSACEA)

Average depth interval, from, to, m	Weighted average layer thickness, m	Granulometric composition of sands	Density of sands
0.0 ... 0.82	0.82	The sands are mostly fine, low-moisture and wet	Loose build (category 1A1, 1a1). In the areas of reprofiling the upper part of the crest of the dam in the Shandor area (category 1B1)
0.82 ... 4.36	3.54	Sands are medium and fine, wet and water-saturated (below GWL)	Medium-dense build (category 1A2, 1a2). In the areas of reprofiling the upper part of the crest of the dam in the floodboard area (category 1B2)
4.36 ... 7.74	3.38	Sands are mostly fine, water-saturated (below GWL)	Loose build (category 1A1)
7.74 ... 10.07	2.33	Sands are mostly fine, water-saturated (below GWL)	Medium-dense build (category 1A2), occasionally dense (category 1A3)

It should be especially noted that the isopach maps of layers 1A1, 1a1, 11A, 1B were also compiled for the first time at PSACEA. The engineering-geological conditions, the physical and mechanical properties of the soils in the dam section are set out in the reports of Kharkiv Energo-project Institute (KhIEP), Orsk Institute of Humanities and Technology, ZNPP, PSACEA, Fundamentstroymaks LLC, GIINTIZ LLC, etc. The list of scientific and technical reports and other materials on the object of research is traditionally so great that there is no way to bring it full list of references to this article.

Analysis of soil marks subsidence. Geodetic measurements at the site of hydraulic structures were implemented using a stationary system of soil marks. The marks are located along the dam crest and bank slopes. Observations have established that subsidence of marks varied from 1 to 8 mm for the period December 1997 – May 1998. The irregularity of subsidence was 6-12 mm, which indicated the development of the deformation in the dam body. Afterwards, 70% of soil marks were destroyed during the operation of the structure, mainly while repairing the road along the top of the dam.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

In 2009, the network of soil marks was restored and supplemented both along the axis of the dam and along the transverse profiles. The number of profiles still turned out to be clearly insufficient for the analysis of deformation processes, taking into account the size and area of the object.

Geodetic observations 2009-2012 showed that the deformation of the dam body continues at a rate of 2-7 mm/year. This indicates the lack of

stabilization of the alluvial sand massif even after 25 years of operation. The stabilization of the massif in similar soil conditions should have been completed by 1996 at the latest. According to the results of measurements, for the first time a graph of the dependence between the subsidence of ground benchmarks and thickness of loose zones in the body of the dam was created (see Fig. 1).

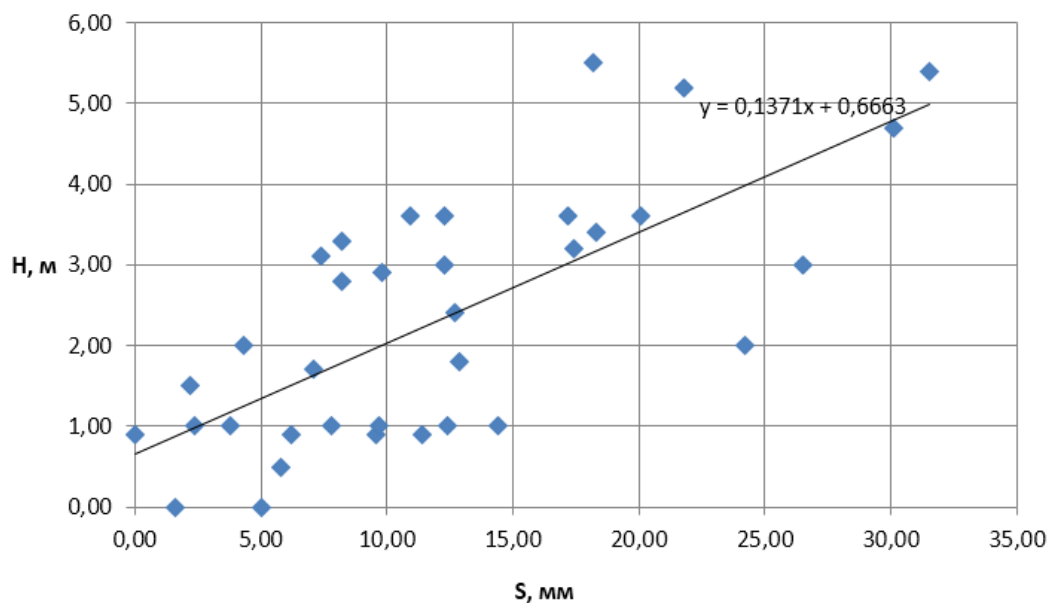


Fig. 1. Graph of the dependence between subsidences of ground benchmarks and thickness of loose zones in the body of the cooling pond dam of the Zaporizhzhia NPP

In general, it must be admitted that rare selective observations of soil marks subsidence provided in recent years cannot be considered sufficient. A radical reorganization of geodetic measurements on the cooling pond dam is required. The main proposals for the observing program will be outlined below.

Analysis of horizontal mark offsets. The results of observations of the soil marks in the new monitoring system for the period 2010–2013 are summarized in the Table. The final directions of horizontal offsets of soil marks in the body of the cooling pond dam of the Zaporizhzhia NPP are calculated.

Conclusions, based on the summary table of the final directions of soil marks horizontal offsets in the body of the NPP cooling pond dam for the period from 2010 to 2013:

– surface marks may not reflect the state of the soils in the dam body. These marks are fixed only

in the upper layer of soil, represented by sands of medium density. Loose varieties, located in the middle part of the section, are not observed;

– soil marks of the new monitoring system reflect only the movement of the upper layer of sands, mainly of medium density;

– mainly, the new soil marks are installed along the axis of the dam. Thus, soils of the dam core made in the early stages of construction are mainly observed. This part of the dam has almost stabilized subsidence values;

– analysis of the soil marks offsets shows that the offsets are mainly directed towards the cooling pond and the Kakhovka reservoir;

– the most stable soil positions are in the area where soil marks with circular offsets located;

– there are offsets of soil marks towards permanent water bodies;

– the dependence between the thickness of alluvial soils and the value of horizontal offsets of

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

soil marks in contrast to their subsidence is not traced;

- the most stable section of the dam body is in the western part, most of which was built by the so-called «dry digging method»;

- displacements of the upper layer of soils are most noticeable in the central and eastern parts of the dam, especially in the area of cooling towers and spray pools;

- some of the soil marks moved to the Kakhovka reservoir. This can be explained by the extreme lack of observation points on the coastal sections on the outer part of the dam body.

Similar approaches are widely used in the world practice of hydraulic engineering [12, 14–16].

Findings

Reasons to continue monitoring on the dam of the cooling pond of Zaporizhzhia NPP.

The bases for further work on the dam of the cooling pond of Zaporizhzhia NPP are as follows:

- results of work on the assessment of the technical condition of the structure;

- repeated appeals of the relevant services due to erosion in certain sections of the cooling pond dam from the side of the Kakhovka reservoir. The works to strengthen the coastline are performed regularly;

- preliminary results of the reasons for changing the lengths of the support profiles in certain sections of the dam body;

- the new methods and technical instrument for performing a qualitative survey of such structures and ensuring safe operation;

- requirements of SNiP 2.06.05-84 and SNiP 2.02.02-85;

- large-scale construction of various facilities on the dam is planned. This will lead to changes in the vertical position of individual sections;

- the dam of the cooling pond is located on the outer perimeter of the NPP industrial site. The outer perimeter is subject to the maximum influence during any natural and technogenic changes in the Kakhovka reservoir surface [11, 13];

- disturbance of the sod cover and woody vegetation, which fix the moving alluvial sands, due to the large-scale construction of various facilities on the dam;

- analysis of the results of engineering surveys on the dam of the cooling pond since 1996;

- subsidence of the structure 2-8 mm/year and more, exceeding the limit according to the requirements of regulatory documents, indicating the absence of soil stabilization in the dam body;

- analysis of the results of high-precision geodetic observations of PSACEA, incl. significant multidirectional horizontal displacements of soil marks recorded in the course of geodetic surveys;

- vibration-dynamic impact on the soils of the dam at the time of military events in the spring-autumn of 2022. The consequences of these events for the entire industrial site of the nuclear power plant must be studied [17, 18];

- non-compliance of the current situation with most of the requirements of individual clauses of the regulatory document SOU-N MEV 40.1-00013741-79:2012 [10].

Planned measures. It is planned to use a complex of geodetic, hydrological and aerovisual methods to solve different tasks. If necessary, a complex of shallow (near-surface) geotechnical studies.

This project is fundamentally different from all the work previously carried out at the facility. The first priority under this project is the installation of special aerovisual leading signs-benchmarks on selected transverse profiles. The design of aerovisual guiding signs was developed by PSACEA specifically for work on the ZNPP dam and has no analogues. The installation of signs precedes the entire complex of works on the dam. These signs will be used for performing a complex of geodetic, hydrological and aerovisual works. Before the installation of signs or simultaneously with it, conventional high-precision geodetic observations will be carried out on a network of soil marks.

The choice of locations for installation of signs should be made only after the completion of special reconnaissance activities on the ground, together with a comprehensive analysis of all available technical information on the dam. The final configuration, dimensions and location of benchmarks for geodetic, hydrological and aerovisual observations at the dam will be selected based on the results of reconnaissance work on the ground and analysis of information.

A serious factor that for decades hindered the high-quality geodetic observations at the ZNPP industrial site and at the location of hydraulic structures is the clearly insufficient number of depth benchmarks. Moreover, at the site of hydrau-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

lic structures (GTS), there were no deep benchmarks from the very beginning. This led to significant inconvenience and costs in observations.

The most acceptable option is to place one or several clusters of deep benchmarks directly on the territory of hydraulic structures section of the ZNPP. Based on the convenience of access and high-quality observations, the benchmark clusters should be placed outside the strict security perimeter of ZNPP.

It is very difficult to comply with all the requirements of SOU-N MEV 40.1-00013741-79:2012 and other regulatory documents due to the layout scheme of the ZNPP hydraulic structures. The most acceptable areas for the location of deep benchmarks clusters within the hydraulic structures section are located on the dam and near it, on the bedrock bank.

It is proposed to take the profiles of the geodetic survey measured in November 2012 as reference base profiles. The selected base profiles must be fixed in place in an accepted way.

In addition to geodetic observations along the profiles, it is necessary to perform similar work on selected sites, on the side of the Kakhovka reservoir. This side is presumably influenced by the most intense deformations of the coastline (erosion and landslide).

Hydrological studies must necessarily include work on the construction of hydrological posts and alignments, as well as observations on them. It is obligatory to carry out depth measurements along the side of the Kakhovka reservoir and the cooling pond with an echo sounder or by other means along the newly equipped profiles.

It is reasonable to provide the aerovisual surveys by unmanned aerial vehicles (UAVs) on the entire area of the cooling pond dam. Research should be carried out using special aerovisual benchmarks. The design of these benchmarks was developed for this object in the science research laboratory PSACEA. For high-quality research, first of all it is necessary to install aerovisual benchmarks on the dam according to the proposals of PSACEA. The installation must be coordinated with the ZNPP administration, taking into account the specifics of the facility.

In technical terms, the process of aeronautical monitoring using UAV consists of three stages:

- preparatory stage,
- shooting,
- post-processing of the received data.

At the preparatory stage, the coordinates of reference points (numbered aerovisual benchmarks – leading signs) are determined. During the installation, the benchmarks must be additionally equipped with geodetic centers, colored and numbered for their reliable recognition on aerial photos.

At the stage of surveying, the UAV moves in tacks along the profiles. The overlap of images should be 60-80%. The survey provides with the obligatory capture of the coastline of the dam, both from the side of the cooling pond and from the side of the Kakhovka reservoir. In order to avoid the loss of the device, moving it away from the shore and working above the water area is not recommended.

The choice of the flight profile in the area of the cooling towers is made taking into account the general weather conditions (including the actual wind direction). The flight altitude to ensure the required accuracy is no more than 100 m. In accordance with the requirements of Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations (GCINR) -02-036-02, to obtain topographic maps at a scale of 1:2000, a photo base with a resolution of 15 cm/pixel is required. The error in determining the coordinates at each point is no higher than 60 cm [4, 1]. Such a resolution is easily provided when shooting with modern civilian UAVs such as DJI Phantom Pro or their analogues.

The binding of the required accuracy is achieved by high-precision geodetic measurements of the coordinates of aerovisual benchmark centers. To determine the coordinates, it is recommended to use high-precision GNSS receivers. It is proposed to use the existing TNT-TPI network as base stations. It is also allowed to use the geodetic network built on the fundamental geodetic benchmarks of the Zaporizhzhia NPP.

At the stage of post-processing, the aerial photographs are combined into a single orthomosaic using Agisoft PhotoScan or similar software. Aerial photography of the site will be considered completed if its area is covered by continuous routes and successfully assembled into a single orthomosaic.

Originality and practical value

For the first time since construction, a comprehensive program has been developed for assessing the technical condition of the cooling pond dam using innovative methods of PSACEA. In particular, a monitoring system based on combined hydrographic, geodetic and aerovisual methods is proposed. The technique is proposed to be implemented using specially designed leading signs, which have no analogues in world practice.

Carrying out such studies, in the light of recent war events at the ZNPP industrial site, seems to be absolutely necessary and urgent.

For the first time, the numerical dependence between the thickness of loose soils and the magnitude of subsidence of the surface has been determined. The possible contours of weakened zones in the body of the dam are determined. A generalized geological section of the dam body was compiled for further perspective modeling of geotechnical processes.

Conclusions

The analysis of materials from studies of soils in the body of the dam made it possible to identify possible weakened and understudied zones. These zones can directly affect the state of the dam. Previously uncovered issues on the operation of the facility are raised and considered in this article.

A special case of the vibration-dynamic impact on the soils of the dam is the well-known military events of spring-autumn 2022. The consequences

of these events for the entire industrial site of the nuclear power plant have yet to be studied.

The measures for further study of the state of the earth dam of the cooling pond were selected and the conditions for their use were substantiated. For the first time since construction, a comprehensive program for assessing the technical condition of the cooling pond dam has been developed using the innovative methods of PSACEA. Also, for the first time, the numerical dependence between the thickness of loose soils and the magnitude of subsidence of the surface was determined. A generalized geological section of the dam body was compiled for further modeling of geotechnical processes.

The analysis of the soil conditions of the object is also quite consistent with previous studies on obtaining numerical parameters of morphology for eolian-alluvial and alluvial sands in the vertical section. The dependence of the morphology index on the genesis of deposits was also confirmed.

Criteria for identifying eolian and eolian-alluvial sands in the upper part of the local geological section were proposed. This will explain the reasons for the long-term unstabilized settlement of individual buildings and structures of the ZNPP.

The results of the conducted research can be applied to calculate the indicators of sandy soils in the foundations of buildings and structures. They can be used in the calculations of hydraulic structures of energy facilities – cooling ponds of nuclear power plants, thermal power plants, various dams, soil approaches to transport facilities, etc.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Акель М., Акл М., Алтынов А. Использование методов имитационного моделирования для поиска наилучших решений получения трехмерных моделей местности по данным с беспилотных авиационных систем. *Успехи современного естествознания*. 2022. № 8. С. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37882>
2. Антонова Л. Н., Канюк Г. И., Погонина Т. Е., Михайский Д. М., Омельченко Л. Н., Фокина А. Н. Назначение и особенности условий работы водоёмов-охладителей тепловых и атомных электростанций. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 2/10 (56). С. 56–63.
3. Бабич А. В., Вовк Н. И. Особенности гидрохимического и термического режимов водоема-охладителя Запорожской АЭС. *Проблемы зооинженерии и ветеринарной медицины*. 2011. Вып. 1. С. 313–319.
4. ГКИНП (ГНТА)-02-036-02 Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. Роскартография, 2002. 101 с.
5. Гольдштейн М. Н. *Механические свойства грунтов (напряжённо-деформационные и прочностные характеристики)*. Москва : Строиздат, 1979. 304 с.
6. Косач Н. И., Бейнер Н. В. Анализ эффективности охладительных устройств в оборотных системах водоснабжения АЭС. *Метрoлoгiя – 2014*. Харків, 2014. С. 231–234.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

7. РД 34 15.073-91 *Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве*. Ленинград, 1991. 434 с.
8. Скалзубов В. И., Богодист В. В., Козлов И. Л., Габлая Т. В., Кочнева В. Ю. Метод оценки критериев затопления промплощадки Запорожской АЭС при запроектных землетрясениях. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2013. № 4 (60). С. 16–19.
9. Слюсаренко С. А., Степаненко Г. Н., Глотова М. А., Новиков М. Ф. *Проектирование и устройство фундаментов на намывных песчаных грунтах*. Киев : Будівельник, 1990, 128 с.
10. СОУ-Н МЕН 40.1-00013741-79:2012 *Настанова з проведення спостережень за осіданням фундаментів, деформаціями конструкцій будівель і споруд та режимом підземних вод на майданчиках теплових та атомних електростанцій*. [Чинний від 2013-03-27]. Київ, 2013. 85 с.
11. Ульянов В. Ю. Результаты морфологического оценивания деяких особенностей алювиальных песков міста Дніпро. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6 (96). С. 95–104.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/256577>
12. Alfatlawi T. J. M., Al-temimi Y. K., Alomari Z. M. Evaluation of the upstream slope stability of earth dams based on drawdown conditions – Khassa Chai Dam: a case study. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 671. Iss. 1. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/671/1/012072>
13. *ENGINEERING EVALUATION ASSESSMENT*. 2016. 175 p. URL: <https://mtu.gov.ua/files/USACReport.pdf>
14. Mishal U., Khayyun T. Stability Analysis of an Earth Dam Using GEOSLOPE Model under Different Soil Conditions. *Engineering and Technology Journal*. 2018. Vol. 36. Iss. 5A. P. 523–532.
DOI: <http://dx.doi.org/10.30684/etj.36.5A.8>
15. Mostafa Y., Mehdi M. Stability analysis of earth dams based on construction pace on soft soil. *Life Science Journal*. 2013. Vol. 10, No. 6s. P. 436–443.
16. Mouyeaux A., Carvajal C., Bressollette P., Peyras L., Breul P., Bacconnet C. Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 101. P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.017>
17. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine : 2nd Summary Report by the Director General*. IAEA, Vienna, 2022. URL: <https://reliefweb.int/report/ukraine/nuclear-safety-security-and-safeguards-ukraine-summary-report-director-general-24-february-28-april-2022>
18. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine : 2nd Summary Report by the Director General*. IAEA, Vienna, 2022. 52 p. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/22/09/ukraine-2ndsummaryreport_sept2022.pdf

В. Ю. УЛЬЯНОВ^{1*}, В. В. БЛИК^{2*}

^{1*}Каф. «Інженерна геологія і геотехніка», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 43, ел. пошта ulianovvu@gmail.com, ORCID 0000-0002-9028-3408

^{2*}Лабораторія досліджень атомних і теплових електростанцій, ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (063) 247 27 42, ел. пошта kolemasakar@gmail.com, ORCID 0000-0002-4435-2388

Результати дослідження стану ґрунтової дамби ставка-охолоджувача Запорізької атомної електростанції

Мета. У роботі передбачено визначити реальне розташування в просторі, провести можливе вимірювання справжніх геометричних розмірів дамби водойми-охолоджувача АЕС, особливо її підводної частини, та виявити додаткові і раніше не враховані фактори, які можуть вплинути на ці параметри, а також на стан конструкції в цілому. **Методика.** На дамбі ставка-охолоджувача Запорізької АЕС проведено комплексний аналіз усіх наявних матеріалів про інженерні вишукування та геотехнічні дослідження, завдяки чому отримано більш повне уявлення про результати інженерно-геологічних вишукувань. **Результати.** На стан ґрунтів у тілі ґрунтової дамби можуть впливати ослаблені та маловивчені зони. Ці зони визначено на основі аналізу даних досліджень ґрунтів дамби. Порушено та розглянуто раніше висвітлені питання щодо функціонування об'єкту. Запропоновано шляхи та методи додаткового дослідження ґрунтової дамби ставка-охолоджувача, обґрунтовано умови їх використання. Уперше встановлено чисельну залежність між товщиною насипних ґрунтів і величиною поверхневого осідання. Для подальшого моделювання геотехнічних процесів складено

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

узагальнений геологічний розріз тіла дамби. **Наукова новизна.** Уперше з моменту будівництва розроблено комплексну програму оцінки технічного стану дамби водойми-охолоджувача за інноваційними методами Лабораторії досліджень атомних і теплових електростанцій ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (ПДАБА). Зокрема, запропоновано комбіновані гідрографічно-геодезичні та аерофотографічні методи з використанням спеціально розроблених універсальних провідних знаків, які не мають аналогів у світовій практиці. **Практична значимість.** Застосування розробленої комплексної програми з використанням інноваційних методів дозволяє проводити оцінку технічного стану дамби ставка-охолоджувача АЕС.

Ключові слова: Запорізька АЕС; дамба ставка-охолоджувача; алювіальні піски; розрідження ґрунту; динамічна нестабільність; осідання; повзучість схилу

REFERENCES

1. Akel, M., Akl, M., & Altynov, A. (2022). Methodology and Recommendations for Improving the Accuracy of Digital Terrain Models Using Low-Cost Uav Photogrammetry. *Advances in current natural sciences*, 8, 150-159. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37882> (in Russian)
2. Antonova, L. N., Kanyuk, G. I., Ponina, T. E., Mikhaiskiy, D. M., Omelchko, L. N., & Fokina, A. N. (2012). Naznachenie i osobennosti usloviy raboty vodoemov-okhladiteley teplovykh i atomnykh elektrostantsiy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10(56), 56-63. (in Russian)
3. Babich, A. V., & Vovk, N. I. (2011). Osobennosti gidrokhimicheskogo i termicheskogo rezhimov vodoema-okhladitelya Zaporozhskoy AES. *Problemy zooinzhenerii i veterinarnoy meditsiny*, 1, 313-319. (in Russian)
4. GKNP (GNTA)-02-036-02 Instruksiya po fotogrammetricheskim rabotam pri sozdanii tsifrovyykh topograficheskikh kart i planov (2002). Roskartografiya. (in Russian)
5. Goldstein, M. N. (1979). *Mekhanicheskie svoystva gruntov (napryazhenno-deformatsionnye i prochnostnye kharakteristiki)*. Moscow: Stroizdat. (in Russian)
6. Kosach, N. I., & Beiner, N. V. (2014). Analiz effektivnosti okhladitelnykh ustroystv v oborotnykh sistemakh vodosnabzheniya AES. In *Metrolohiia- 2014* (pp. 231-234). Kharkiv, Ukraine. (in Russian)
7. RD 34 15.073-91 Rukovodstvo po geotekhnicheskomu kontrolyu za podgotovkoy osnovaniy i vozvedeniyem gruntovyykh sooruzheniy v energeticheskoy stroitelstve. (1991). Leningrad. (in Russian)
8. Skalozubov, V. I., Bogodist, V. V., Kozlov, I. L., Gablaya, T. V., & Kochneva, V. Yu. (2013). Metod otsenki kriteriev zatopleniya promploshchadki Zaporozhskoy AES pri zaproektnykh zemletryaseniakh. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 4(60), 16-19. (in Russian)
9. Slyusarenko, S. A., Stepanenko, G. N., Glotova, M. A., & Novikov, M. F. (1990). *Proektirovanie i ustroystvo fundamentov na namyvnykh peschanykh gruntakh*. Kyiv: Budivelnik. (in Russian)
10. SOU-N MEV 40.1-00013741-79:2012 Nastanova z provedennia sposterezhen za osidanniam fundamentiv, deformatsiiamy konstrukttsii budivel i sporud ta rezhymom pidzemnykh vod na maidanchykakh teplovykh ta atomnykh elektrostantsii. (2013). (in Ukrainian)
11. Ulyanov, V. Y. (2021). Morphological Evaluation Results of Some Features of Alluvial Sands in the City of Dnipro. *Science and progress in transport*, 6(96), 95-104. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/256577> (in Ukrainian)
12. Alfatlawi, T. J. M., Al-temimi, Y. K., & Alomari, Z. M. (2020). Evaluation of the upstream slope stability of earth dams based on drawdown conditions – Khassa Chai Dam: a case study. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 671, Iss. 1, pp. 1–16). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/671/1/012072> (in English)
13. ENGINEERING EVALUATION ASSESSMENT. (2016). Retrieved from <https://mtu.gov.ua/files/USACereport.pdf> (in English)
14. Mishal, U., & Khayyun, T. (2018). Stability Analysis of an Earth Dam Using GEO-SLOPE Model under Different Soil Conditions. *Engineering and Technology Journal*, 36(5A), 523-532. DOI: <https://doi.org/10.30684/etj.36.5a.8> (in English)
15. Mostafa, Y., & Mehdi, M. (2013). Stability analysis of earth dams based on construction pace on soft soil. *Life Science Journal*, 10(6s), 436-443. (in English)
16. Mouyеaux, A., Carvajal, C., Bressolette, P., Peyras, L., Breul, P., & Bacconnet, C. (2018). Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. *Computers and Geotechnics*, 101, 34-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.017> (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

17. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine: 2nd Summary Report by the Director General*. (2022). IAEA, Vienna. Retrieved from <https://reliefweb.int/report/ukraine/nuclear-safety-security-and-safeguards-ukraine-summary-report-director-general-24-february-28-april-2022> (in English)
18. *Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine: 2nd Summary Report by the Director General*. (2022). IAEA, Vienna. Retrieved from https://www.iaea.org/sites/default/files/22/09/ukraine-2ndsummaryreport_sept2022.pdf (in English)

Received: 10.02.2022

Accepted: 13.06.2022

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Ю. В. ЗЕЛЕНЬКО, М. В. КАЛИМБЕТ

Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності взаємодії складових системи «відправник – перевізник – одержувач»..... 5

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. О. ХАВРУК

Оцінка резервів підвищення ефективності використання рухомого складу автотранспортного підприємства 17

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**Є. С. РЯБОВ, Л. Ю. КОНДРАТЬЄВА,
Л. В. ОВЕР'ЯНОВА, Б. Х. ЄРІЦЯН, С. О. ГУЛАК**

Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту 26

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

**М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН, М. А. ГУСАК,
М. О. ГАВРИЛОВ, О. Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ**

Оцінка безпеки руху транспортних засобів на перетині автомобільної дороги й залізниці в одному рівні 45

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В. І. ШИНКАРЕНКО, Л. І. ЖУЧИЙ

Конструкційно-продукційне моделювання онтологічного забезпечення документообігу з обмеження швидкості руху поїздів..... 59

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**В. Є. ВАСИЛЬЄВ, А. М. АФАНАСОВ,
О. М. ГУЛІВЕЦЬ, Ю. Я. ПОПУДНЯК**

Експериментальні дослідження енергетичної ефективності прискорених теплових випробувань тягових електромашин 69

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Н. К. БОНДАРЕНКО, О. Л. ТЮТЬКІН

Порівняльний аналіз результатів маркшейдерських та чисельних досліджень перегінного тунелю Київського метрополітену 78

В. Ю. УЛЬЯНОВ, В. В. БЛИК

Результати дослідження стану ґрунтової дамби ставка-охолоджувача Запорізької атомної електростанції..... 86

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

Y. V. ZELENKO, M. V. KALYMBET

Development of Recommendations for Improving
the Interaction Efficiency Between the Components
of the «Sender-Carrier-Recipient» System 5

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. O. KHAVRUK

Evaluation of Reserves for Improving the Efficiency of Using
Rolling Stock of a Motor Transport Enterprise 17

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

**Y. S. RIABOV, L. Y. KONDRATIEVA,
L. V. OVERIANOVA, B. K. YERITSYAN,
S. O. HULAK**

Justification of the Structure of the Electric Traction Drive
of the Electric Locomotive for Railway Quarry
Transport 26

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

**M. B. KURHAN, D. M. KURHAN, M. A. HUSAK,
M. O. HAVRYLOV, O. F. LUZHYTSKYI**

Vehicle Traffic Safety Assessment at the Intersection
of Highways and Railways at the Same Level..... 45

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

V. I. SHYNKARENKO, L. I. ZHUCHYI

Constructive-Synthesizing Modelling of Ontological
Document Management Support for the Railway Train
Speed Restrictions 59

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**V. Y. VASYLIEV, A. M. AFANASOV, O. M. HULIVETS,
Y. Y. POPUDNIAK**

Experimental Research of the Energy Efficiency of
Accelerated Thermal Tests of Traction Electric Machines.... 69

TRANSPORT CONSTRUCTION

N. K. BONDARENKO, O. L. TIUTKIN

Comparative Analysis of the Results of Mine Surveying and
Numerical Studies of the Running Tunnel
of the Kyiv Metro 78

V. Y. ULIANOV, V. V. BILYK

Research results of the earth dam condition of cooling pond
of the Zaporizhzhia nuclear power plant 86

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250–300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 2 (98) 2022

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 12,09. Тираж 100 пр. Зам. №02/02

Український державний університет науки і технологій

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 2 (98) 2022

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 12,09. Circulation 100. Order no. 02/01

Ukrainian State University of Science and Technologies

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

