



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№1 (97)

.. 2022 ..

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 1 (97) 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); Жуковичський 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 28.03.2022 р., протокол № 5

Видавець Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 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. 1 (97) 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 28.03.2022, Protocol no. 5

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003

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»

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.424:621.318.563

В. Н. СЕРДЮК^{1*}, О. Б. ОЧКАСОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта vns1201@gmail.com, ORCID 0000-0003-2337-3478

^{2*}Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

Розробка напівпровідникового реле часу для локомотивів

Мета. Необхідність заміни застарілої елементної бази електричних апаратів локомотивів є актуальною в умовах проведення капітально-відновлюваних ремонтів локомотивів для продовження терміну їх експлуатації. Основною метою роботи є скорочення витрат на експлуатацію та ремонт рухомого складу за рахунок підвищення надійності електричних апаратів, упровадження уніфікованих технічних рішень. **Методика.** Із використанням системно-історичного підходу з'ясовано переваги та недоліки основних принципів побудови електричних апаратів локомотивів. Визначено напрями вдосконалення елементної бази реле часу. Обґрунтовано необхідність розробки уніфікованих технічних рішень для реалізації реле часу локомотивів. За допомогою методів прикладної теорії цифрових автоматів та схемотехніки розроблено напівпровідникове реле часу локомотивів, що забезпечує можливість реалізації 23 варіантів витримки часу без зміни конструкції реле. Запропонована методика дозволяє проєктувати універсальні електронні реле з будь-якими діапазонами часових затримок. Як основні елементи регулювання витримки часу використано комбінацію двійкових лічильників імпульсів та мультиплексора. Відсутність у схемі запропонованого напівпровідникового реле часу елементів регульованої ємності та активного опору (RC-контурів) дозволяє забезпечити стабільність характеристик реле часу на всьому інтервалі експлуатації, зменшити витрати на обслуговування та ремонт електричних апаратів. **Результати.** Розроблено уніфіковане реле часу з широким діапазоном витримки часу та можливістю під'єднання електричних схем локомотивів із напругою живлення 50 та 110 В. Отримані результати дозволяють спрогнозувати подальший розвиток напівпровідникових реле часу та застосувати розроблене напівпровідникове (електронне) реле часу для всіх видів рухомого складу залізниць. **Наукова новизна.** У роботі проведено аналіз розвитку технологій та елементної бази електричних апаратів локомотивів. Обґрунтовано необхідність удосконалення елементної бази електричних апаратів на прикладі реле часу. **Практична значимість.** На базі запропонованих технічних рішень можливе виготовлення універсального напівпровідникового реле часу локомотивів.

Ключові слова: електричні апарати локомотивів; напівпровідникове реле; уніфікація електричних апаратів

Вступ

Високий ступінь зношення локомотивного парку вимагає розробки та впровадження заходів із комплексної модернізації наявних транспортних засобів для продовження термінів їх експлуатації та зменшення експлуатаційних витрат. Комплексна модернізація локомотивів передбачає впровадження енергоощадних технологій, розробку енергоефективних методів і систем управління, заміну силового обладнання. Найбільший економічний ефект очіку-

ється від заміни силового обладнання (дизель-генератора, гідравлічної передачі та ін.), оскільки ці агрегати мають досить суттєвий вплив на загальні експлуатаційні витрати, проте і вартість такої модернізації, відповідно до даних АТ «Укрзалізниця», складає до 75 % від вартості нового тепловоза. Скорочення експлуатаційних витрат та підвищення надійності тепловозів можна досягти і за рахунок модернізації електричного обладнання.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Останнім часом у підприємств, які експлуатують локомотиви, виник попит на розробку технічних рішень щодо вдосконалення систем управління допоміжним обладнанням. Метою цієї модернізації є скорочення витрат енергоресурсів на привід такого обладнання та підвищення надійності систем відбору потужності дизеля. Серед варіантів модернізації – заміна механічних, гідравлічних та гідромеханічних систем відбору потужності на електричні, бажано асинхронні, із подальшим упровадженням економічних методів управління.

Для тепловозів з електричними машинами приводу допоміжних агрегатів актуальним є впровадження електронного управління режимами їх роботи, наприклад, розробка засобів регулювання частоти роботи вентиляторів систем охолодження залежно від реальної потреби у відведенні тепла, упровадження систем плавного пуску електричних машин. Цей варіант модернізації вимагає значних конструкційних змін, але дозволить отримати відчутну економію енергоресурсів. За даними досліджень, скорочення витрат енергоресурсів на привід вентиляторів ТЕД складає до 30 %.

Заміна колекторних електричних машин на асинхронні електричні машини, заміна компресорних агрегатів, заміна електромашинних перетворювачів на статичні перетворювачі є варіантом вузлової модернізації і вирішує певну технічну проблему. Відомі приклади такої модернізації локомотивного парку промислових підприємств, а також електровозів. Як правило, такий варіант модернізації використовують у комплексі з попереднім.

Упровадження сучасних електронних систем управління та діагностування тепловоза в цілому є складною технічною задачею, воно є доцільне в рамках глибокої модернізації тепловоза із заміною силових агрегатів. Прикладом упровадження систем електронного управління в масштабах модернізації вузлів та агрегатів є системи управління тяговим приводом локомотивів.

Розвиток промислової електроніки, перетворювальної техніки та інформаційних технологій протягом останніх років сприяв створенню бази для модернізації електричного обладнання локомотивів під час капітальних ремонтів та розробки нових типів електричного

обладнання. Це обумовлює необхідність пошуку подальших наукових і технічних рішень для модернізації електричного обладнання тепловозів [2].

Мета

Відповідно до викладеного метою роботи є скорочення витрат на експлуатацію та ремонт електричного обладнання локомотивів за рахунок провадження універсальних напівпровідникових реле.

Методика

Для з'ясування переваг та недоліків основних принципів роботи побудови електричних апаратів локомотивів використано системно-історичний підхід. Виконано огляд наявних реле часу для умов роботи та тяговому рухомому складі, обґрунтовано необхідність розробки уніфікованих технічних рішень для реалізації реле часу локомотивів. Застосовано методи прикладної теорії цифрових автоматів і схемотехніки для розробки напівпровідникового реле часу локомотивів. За основні елементи регулювання витримки часу взято комбінацію двійкових лічильників імпульсів та мультиплексора.

Результати

В електричних схемах локомотивів використовують значну кількість типів реле часу [3–5, 11] з різними напругами живлення та різноманітними діапазонами затримки й конструкційними особливостями, що ускладнює ремонт та експлуатацію схем. Крім того, вимоги та умови роботи на рухомому складі суттєво відрізняються від умов експлуатації промислових приладів.

Актуальність розробки уніфікованих електричних апаратів підтверджено низкою досліджень, виконаних під керівництвом проф. Л. В. Дубинця [3–5]. У роботі [3] терміном «уніфікація» позначено раціональне скорочення кількості релейних елементів однакового функціонального призначення. Низький відсоток уніфікації електричних апаратів призводить до збільшення суми коштів, які витрачають на створення оборотного фонду електричних апаратів у локомотивних депо. Збільшення номенклатури реле ускладнює процеси ремонту та

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

випробування апаратів, оскільки вимагає додаткових витрат на налаштування обладнання й навчання персоналу.

Особливість електричних апаратів захисту та управління локомотивів полягає в тому, що, незважаючи на відносно невисоку вартість самих електричних апаратів, їх вплив на надійність локомотива та вартість усунення відмов обладнання значно перевищує вартість самих апаратів. Відмови електричних апаратів також впливають на безпеку руху локомотивів [1, 11, 12]. Відповідно до результатів досліджень [1], вартість усунення наслідків відмов електричних апаратів у десятки разів перевищує вартість цих апаратів, що також підтверджує актуальність нашого дослідження.

Пристрої релейної автоматики будують із використанням електромеханічного, мікроелектронного або мікропроцесорного принципів. Аналіз переваг і недоліків принципів побудови пристроїв релейної автоматики наведено в [7, 10].

Найбільшу кількість пристроїв релейної автоматики побудовано з використанням електромеханічного та мікроелектронного принципів. До переваг такого типу пристроїв належать:

- порівняно невисока вартість;
- значний досвід експлуатації та обслуговування;
- простота конструкції;
- наявність ремонтного обладнання.

Недоліками пристроїв релейної автоматики, побудованих із використанням електромеханічного та мікроелектронного принципів, є:

- значне зниження надійності та зміна характеристик елементної бази під час експлуатації;
- відсутність можливості зміни режиму роботи апаратури (як правило, кожен апарат має жорсткі характеристики, закладені на етапі проектування);
- унаслідок невисокої надійності збільшуються витрати на обслуговування.

Методологія створення сучасних електричних апаратів орієнтована на уніфіковані мікропроцесорні пристрої. Перевагою мікропроцесорного покоління електричних апаратів є:

- висока точність характеристик;
- стабільність характеристик апаратів під час експлуатації;
- широкий діапазон уставок із можливістю їх дистанційної зміни та перепрограмування;
- наявність зворотного зв'язку щодо спрацьовування та засобів самодіагностування;
- низькі затрати на обслуговування;
- мале енергоспоживання.

Із метою усунення недоліків наявних реле часу для умов роботи на тяговому рухомому складі виконаємо їх огляд. Із розвитком технологій та переходом від макрорівня до мікрорівня в експлуатацію локомотивів впроваджено напівпровідникові (електронні) реле часу: ВЛ–21, ВЛ–31, ВЛ–50. Сьогодні напівпровідникові реле часу ВЛ–21, ВЛ–31, ВЛ–41, ВЛ–50, ВЛ–51А, ВЛ–52 застосовують у локомотивах для отримання необхідних витримок часу під час вмикання та вимикання електричних апаратів в автоматичних системах управління й захисту (попереднє прокачування масла перед пуском, тривалість пуску дизеля і тощо).

Щоб усунути перелічені вище недоліки реле часу для умов роботи на тяговому рухомому складі, в [6, 8, 9] розроблено напівпровідникове реле часу з широким діапазоном інтервалів витримки часу та робочою напругою живлення від 50 до 110 В (рис. 1).

Уніфіковане реле часу конструкцій складається з двох частин, замкнених в електричне коло за допомогою клем a і b (рис. 2). Вхідний сигнал із постійною напругою 110 В знаходить на вхідні клеми 1, 2.

Через нормально замкнутий контакт $K1$ герконового реле типу РПГ–8–2602 вхідна напруга (110 В) завдяки параметричному стабілізатору (резистори $R1$, $R2$ та стабілітрон $UD1$) перетворюється на понижену напругу, яка по клемі $a - b$ надходить на другу плату для живлення інтегральних мікросхем. Мікросхему DD1 (561ЛА7) використано у двох генераторах. Тактовий генератор, побудований на інверторі DD1.1 та кварцовому резонаторі ZQ1 (2 097 кГц) із резисторами $R2$, $R3$ та конденсаторами $C2$, $C3$ подає через інвертор DD1.2 сигнали прямокутної форми та стабільної частоти на вхід C чотирнадцятирозрядного двійкового лічильника DD2 (561ІЕ16).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

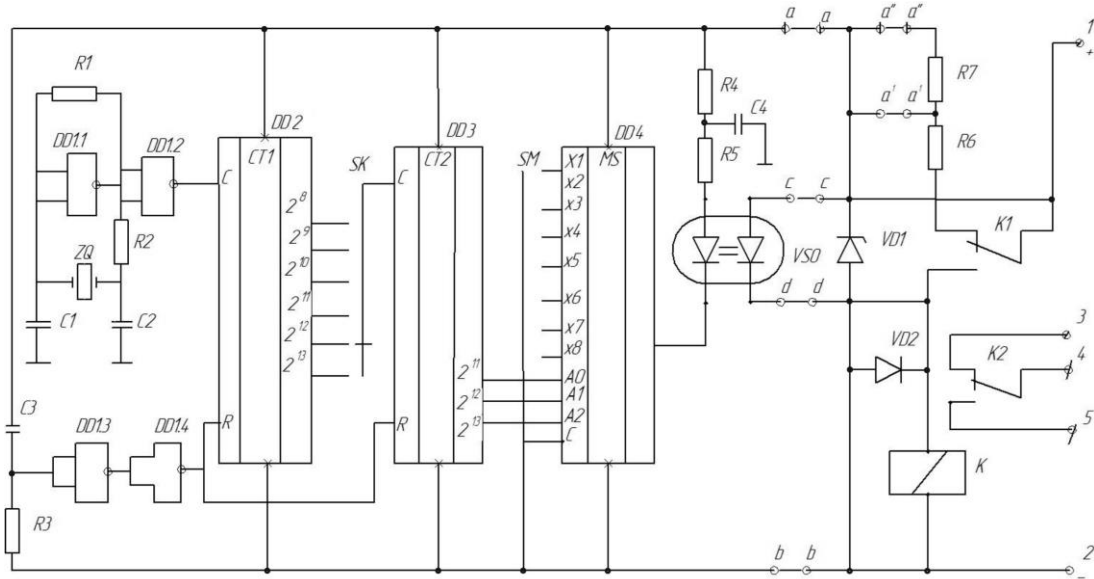
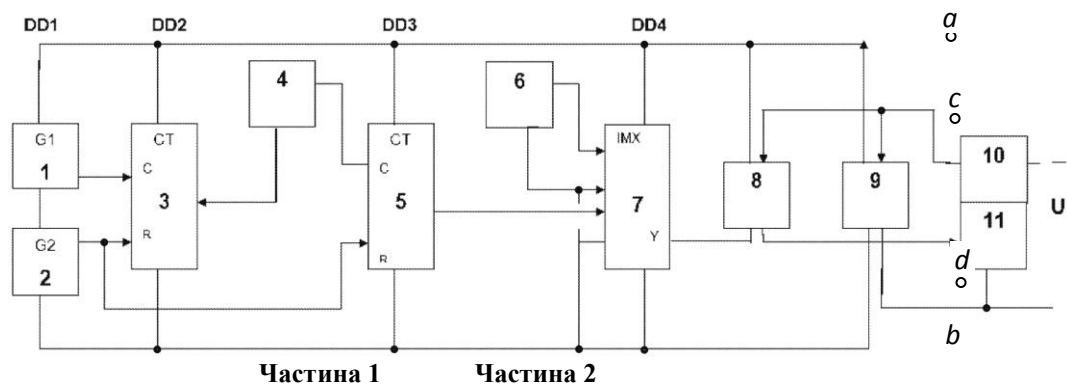


Рис. 1. Принципова електрична схема електронного реле часу

Fig. 1. Block schematic diagram of an electronic time relay



- | | |
|---------------------|--|
| Мікросхема DD1 | 1 – Генератор 1
Тактовий генератор (кварцовий резонатор ZQ) (мікросхема 561ЛА7) |
| | 2 – Генератор 2
Одновібратор (установлення двійкових лічильників у нульове початкове положення) |
| Мікросхеми DD2, DD3 | 3, 5 – Двійкові лічильники (мікросхема 561ІЕ16)
4, 6 – Перемикачі виходів-входів лічильників DD2 та DD3 (зміна коефіцієнтів перерахунку лічильників 3 та 5; перемикачі витримки часу:
4 – одиниць секунд, 6 – десятків секунд) |
| Мікросхеми DD4 | 7 – Мультиплексор (мікросхема 561КР2)
8 – Тиристорна оптронна пара (світотиристор, оптронний тиристор) – забезпечує електричне розділення кіл Частин 1 та 2; виключає потенціальний зв'язок (світлодіод – оптронний тиристор) |

- | |
|--|
| 9 – Параметричний стабілізатор живлення інтегральних мікросхем. Постійна напруга 110 В (75 В) перетворюється на понижену (7 В) |
| 10 – Котушка герконового реле типу РПГ–8–2602 |
| 11 – Перемикальні контакти герконового реле РПГ–8–2602 |

Рис. 2. Принципова блок-схема електронного реле часу

Fig. 2. Block schematic diagram of an electronic time relay

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Для встановлення двійкових лічильників DD2 та DD3 в нульове початкове положення в момент під'єднання схеми до напруги живлення використовують одновібратор, зібраний на інверторах DD1.3 і DD1.4 та вхідному R – C колі ($R1$, $C1$). Сформований прямокутний імпульс надходить на R виходи вказаних лічильників (рис. 1).

На виходах 2^8 , 2^9 , 2^{10} , 2^{11} , 2^{12} , 2^{13} лічильника DD2 формуються прямокутні сигнали з частотами 4 096, 2 048, 1 024, 521, 256, 128 Гц відповідно, які через перемикач SK надходять на вхід C лічильника DD3 (561IE16). Цей лічильник працює зі змінною частотою залежно від положення SK . Виходи 2^{11} , 2^{12} , 2^{13} лічильника DD3 під'єднані до адресних входів $A0$, $A1$, $A2$ мультиплексора DD4. Вихідна частота останнього розряду 2^{13} (DD3), яка надходить на старший адресний розряд $A2$ мультиплексора (DD4), змінюється залежно від положення перемикача SK від мінімальної $7,8128 \cdot 10^{-3}$ Гц до максимальної 0,25 Гц. Відповідно на молодший адресний розряд $A0$ мультиплексора (DD4) надходить сигнал від мінімальної частоти 0,03125 Гц до максимальної 1 Гц.

Сигнал із Y -виходу мультиплексора формується з затримкою за часом ($\Delta t_{\text{затр}}$) залежно від положення перемикача SM , яким з'єднано один з інформаційних виходів ($X2$ – $X8$) мультиплексора з нульовою шиною. Активний нульовий сигнал виходу Y мультиплексора (DD4) через резистори $R4$, $R5$ вмикає світлодіод тиристорної оптронної пари $US1$. Накопичувальний конденсатор $C6$ дозволяє сформувати крутий фронт імпульсу на світлодіоді для чіткого відкриття фототиристора оптронної пари $US1$, яким до вхідної напруги приєднується котушка K герконового реле РПГ–8–2602. На деякий нетривалий час опрацювання герконового реле фототиристор оптронної пари $US1$ виконує роль елемента пам'яті. Після закінчення перемикачання контакту $K1$ із герконового реле знімається живлення з мікросхем електронної плати реле часу та шунтується фоторезистор.

Із цієї миті знімається струм із фототиристора, а герконове реле стає в режим саможивлення по колу: клемма $+1$ – контакт реле $K1$ – котушка K реле – клемма 2.

Перемикальним контактом $K2$ герконового реле через вихідні клеми 3–4 можна здійснити

розрив електричного кола, а через вихідні клеми 4–5 здійснити увімкнення електричного кола будь-якого апарата локомотива. Указана операція розмикання 2^{13} або вмикання по вихідних клеммах 3–4–5 здійснюється після подання напруги на вхідні клеми 1–2 через деякий час затримки ($\Delta t_{\text{затр}}$), який залежить від положення двох перемикачів – SK та SM .

Шість положень перемикача SK дозволяє отримати сорок два значення затримки – від 0,5 до 112 с. Найменша затримка часу має місце для положення SK на виході 2^8 (DD2) та положення SM на вході $X2$ (DD4). У цьому разі затримка часу складає одну восьму частину періоду за частоти на виході двійкового лічильника DD3 0,25 Гц. Для відтворення максимальної затримки часу ($\Delta t_{\text{затр(max)}} = 112$ с) перемикач SK повинен стояти на виході лічильника DD2, а перемикач SM – на вході $X8$ мультиплексора DD4. Цей випадок відповідає 7/8 частинам періоду за частоти на виході (0,25 Гц). Проміжні положення перемикачів SK та SM дають можливість отримати, крім названих крайніх значень, ще такі значення затримок часу: 1; 1,5; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 12; 14; 16; 20; 24; 28; 32; 48; 56; 64; 80; 96 секунд.

Особливістю розробленого реле часу є те, що під час увімкнення після необхідної затримки герконового реле припиняється живлення мікросхем електронної частини схеми на весь час увімкненого стану реле.

У разі зняття напруги з вхідних клем припиняється струм у котушці K і реле зразу ж переходить у початкове положення, розриваючи своїми контактами $K1$ коло між клеммами 1 – 2; контактом $K2$ – коло між клеммами 4 – 5.

Шунтувальний діод $UD2$ не дає можливості під час розмикання виникати перенапруженості на індуктивній котушці $K1$. У разі чергової подачі живильної напруги на вхід 1 – 2 процеси в електронній частині повторюються, здійснюючи задану $\Delta t_{\text{затр}}$ витримку часу під час опрацювання герконового реле. Мікросхеми реле працюють тільки у період часу затримки. Для використання електронної частини реле в локомотивах із бортовою системою живлення з напругою 110 та 50 В передбачено перехід на перемикачання клем на a''/a'' клеми a'/a' .

Таким чином, електронна частина реле є універсальною, дає можливість відтворювати

великий діапазон часових затримок, її можна використовувати з різними типами контактних реле.

Наукова новизна та практична значимість

Із використанням методу історичної ієрархії в роботі проведено аналіз розвитку технологій та елементної бази електричних апаратів локомотивів. Обґрунтовано необхідність удосконалення елементної бази електричних апаратів на прикладі реле часу. Практична значимість дослідження полягає в розробці технічних рішень на базі яких можна виготовити універсальне напівпровідникове реле часу локомотивів.

Висновки

Проведений аналіз розвитку та використання електричних апаратів локомотивів показав необхідність переходу до впровадження мікроелектроніки та мікропроцесорної техніки як елементної бази електричного обладнання. Упровадження зазначених технічних рішень забезпечить підвищення надійності електричних апаратів за рахунок зменшення кількості елементів та з'єднань між ними, дозволить скоротити витрати на технічне обслуговування та ремонт електричного обладнання за рахунок універсальності електричних апаратів, сприятиме зменшенню габаритних розмірів, маси та споживання електричної потужності за рахунок сучасної елементної бази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гришечкіна Т. С. Удосконалення системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту з урахуванням залежних відмов їх елементів : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпро, 2021. 21 с.
2. Дорохин Б. П., Сердюк Т. Н. Внедрение новых типов двигателей стрелочных электроприводов. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2013. № 6. С. 71–84.
3. Дубинець Л. В., Муха А. М., Карзова О. О. Уніфікований блок захисту допоміжних електричних машин рухомого складу залізниць. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2008. № 7. С. 54–57.
4. Карзова О. О. Підвищення ефективності захисту силових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 2012. 23 с.
5. Момот А. И. Унификация релейных элементов в схемах подвижного состава железных дорог Украины : дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск, 1999. 205 с.
6. *Напівпровідникове реле часу* : пат. 136629 Україна : МПК H02M7/515. № u201902584 ; заявл. 18.03.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16, 3 с.
7. Панченко С. В., Блиндюк В. С., Баженов В. М. *Релейний захист і автоматика* : навч. посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2020. Ч. 1. 250 с.
8. *Реле часу* : пат. 61186 Україна : МПК H01H 45/00. № u201015673 ; заявл. 24.12.2010 ; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13, 2 с.
9. Чілікін Г. М. Уніфіковане електронне реле часу для рухомого складу залізниць. *Транспорт*. 1999. Вип. 1. С. 112–115.
10. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. *Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем* : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
11. Bodnar B., Ochkasov O., Hryscheckina T., Bodnar E., Skvireckas R. Consideration of Dependent Failures Impact on Selecting the System of Locomotive Maintenance. *Transport Means 2019 : Proc. of the 23rd Intern. Sci. Conf.* (Palanga, Oct. 02–04 2019). Kaunas Univ. of Technology [et al.]. Kaunas, 2019. Pt. III. P. 1103–1107.
12. Bodnar B., Ochkasov O., Bodnar Ye., Hryscheckina T., Keršys R. Safety Performance Analysis of the Movement and Operation of Locomotives. *Transport Means 2018 : Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Trakai, Oct. 03–05 2018). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai») [et al.]. Kaunas, 2018. Pt. II. P. 839–843.

V. N. SERDIUK^{1*}, O. B. OCHKASOV^{2*}

^{1*}Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 61, e-mail vns1201@gmail.com, ORCID 0000-0003-2337-3478

^{2*}Dep. «Locomotives», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 733 19 61, e-mail abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

Development of a Semiconductor Time Relay for Locomotives

Purpose. The need to replace the outdated element base of locomotive electrical apparatuses is urgent under conditions of locomotive overhaul to extend their service life. The main aim of the work is to reduce costs for the operation and repair of rolling stock by increasing the reliability of electrical apparatuses, the introduction of unified technical solutions. **Methodology.** Using the system-historical approach, the advantages and disadvantages of the main design principles of electrical apparatuses of locomotives are found out. The improvement directions of the elemental base of the time relay have been determined. The need to develop unified technical solutions for the implementation of locomotive time relays is substantiated. Using the methods of applied theory of digital machines and circuit engineering, a semiconductor time relay for locomotives was developed, which provides the possibility of implementing 23 options for time delay without changing the relay design. The proposed methodology allows designing universal electronic relays with any ranges of time delays. A combination of binary counters and a multiplexer is used as the main elements of the time delay control. The absence of elements of control capacitance and active resistance (RC circuits) in the scheme of the proposed semiconductor time relay allows ensuring the stability of the time relay characteristics over the entire operating interval, reducing the maintenance and repair costs of electrical apparatuses. **Findings.** A unified time relay with a wide range of time delay and the possibility of connecting electrical circuits of locomotives with a supply voltage of 50 and 110 V has been developed. The obtained results make it possible to predict the further development of semiconductor time relays and to apply the developed semiconductor (electronic) time relay for all types of railway rolling stock. **Originality.** In the work, the development of technologies and the element base of locomotive electrical apparatuses were analysed. The need to improve the element base of electrical apparatuses is substantiated using a time relay example. **Practical value.** Based on the proposed technical solutions, it is possible to produce a universal semiconductor time relay for locomotives.

Keywords: electrical apparatuses of locomotives; semiconductor relay; unification of electrical apparatuses

REFERENCES

1. Hryshechkina, T. S. (2021). *Udoskonalennia systemy utrymannia tekhnichnykh ob'ektiv zaliznychnoho transportu z urakhuvanniam zaleznykh vidmov yikh elementiv* (Extended abstract of PhD dissertation). Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
2. Dorohin, B. P., & Serdiuk, T. M. (2013). Implementation of new types of points motors. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 6, 71-84. (in Russian)
3. Dubinets, L. V., Mukha, A. M., & Karzova, O. O. (2008). Unifikovanyi blok zakhystu dopomizhnykh elektrychnykh mashyn rukhomoho skladu zaliznyts. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 7, 54-57. (in Ukrainian)
4. Karzova, O. O. (2012). *Pidvyshchennia efektyvnosti zakhystu sylovykh kil elektrorukhomoho skladu zaliznyts postiinoho strumu* (Extended abstract of PhD dissertation). Dnipropetrovsk, Ukraine. (in Ukrainian)
5. Momot, A. I. (1999). *Unifikatsiya releynykh elementov v skhemakh podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy* (PhD dissertation). Dnepropetrovsk, Ukraine. (in Russian)
6. Serdiuk, V. N., & Krasyl'nikov, V. M. (2019). *UA Patent № 136629 Semiconductor time relay*. (in Ukrainian)
7. Panchenko, S. V., Blyndiuk, V. S., & Bazhenov, V. M. (2020). *Releinyi zakhyst i avtomatyka: navchalnyi posibnyk*. (Vol. 1). Kharkiv: UkrDUZT. (in Ukrainian)
8. Serdiuk, V. N., Ustsov, T. A., & Stetsenko, O. O. (2011). *UA Patent № 61186 Time relay*. (in Ukrainian)
9. Chilikin, H. M. (1999). Unifikovane elektronne rele chasu dlia rukhomoho skladu zaliznyts. *Transport*, 1, 112-113. (in Ukrainian)
10. Yandul'skyi, O. S., & Dmytrenko, O. O. (2016). *Releinyi zakhyst. Tsyfrovi prystroi releinoho zakhystu, avtomatyky ta upravlinnia elektroenerhetychnykh system: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: NTUU «KPI». (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

11. Bodnar, B., Ochkasov, O., Hrysheckina, T., Bodnar, E., & Skvireckas, R. (2019). Consideration of Dependent Failures Impact on Selecting the System of Locomotive Maintenance. In *Transport Means 2019: Proc. of the 23rd Intern. Sci. Conf.* (Pt. III, pp. 1103-1107). Palanga, Lithuania. Kaunas Univ. of Technology [et al.]. Kaunas, Lithuania. (in English)
12. Bodnar, B., Ochkasov, O., Bodnar, Ye., Hryshechka, T., & Keršys, R. (2018). Safety Performance Analysis of the Movement and Operation of Locomotives. In *Transport Means 2018: Proc. of the 22nd Intern. Sci. Conf.* (Pt. II, pp. 839-843). Kaunas Univ. of Technology, Klaipėda Univ., JSC Lithuanian Railways (AB «Lietuvos Geležinkeliai») [et al.]. Kaunas, Lithuania. (in English)

Надійшла до редколегії: 22.11.2021

Прийнята до друку: 21.03.2022

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.424.3:621.313.12

С. В. АРПУЛЬ^{1*}, А. М. АФАНАСОВ^{2*}, Д. С. БІЛУХІН^{3*}, В. Є. ВАСИЛЬЄВ^{4*},
О. С. ШАПОВАЛОВ^{5*}, С. Ю. БУРЯК^{6*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{2*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{3*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта comandor04@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{4*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{5*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

^{6*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта ser.buryak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

Визначення раціонального режиму взаємного навантаження тягових двигунів магістральних електровозів

Мета. Реальний стан багатьох наявних станцій із випробування тягових електромашин не відповідає сучасним вимогам щодо організації ремонту й технічного контролю. На більшості таких станцій використовують стенди взаємного навантаження з низькою енергетичною ефективністю. Основною метою роботи є визначення раціонального режиму навантаження тягових електромашин, який забезпечить зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної станції та підвищення енергетичної ефективності і якості випробувань. **Методика.** Методологічною основою роботи є загальні теоретичні положення й принципи системного підходу теоретичної електротехніки, теоретичної механіки, теорії електричних машин та перетворювачів. Обґрунтування енергетичних та електромеханічних принципів взаємного навантаження тягових електромашин виконано з використанням основ узагальнення й систематизації фізичних величин і понять, теорії електричних кіл, теорії механічних систем, теорії електричних машин. Аналіз теплових процесів та енергетичних показників системи випробування електромашин виконано з використанням теорії нагрівання однорідного твердого тіла та відомих методів розрахунку теплових схем. Результати теоретичних досліджень підтверджено експериментально. **Результати.** Проведений аналіз виразу для визначення коефіцієнта енергетичної ефективності нагрівання обмоток тягових електромашин, отриманого в роботі, показує, що найбільш раціональними під час випробувань на нагрівання тягових двигунів електрорухомого складу магістрального транспорту є пусковий струм. Використання цього струму навантаження дозволяє знизити витрати електроенергії на випробування на 20–30 % (порівняно з годинним режимом) без зниження якості випробувань, а також зменшує час випробувань на нагрівання в 3 – 4 рази. **Наукова новизна.** Науково обґрунтовано доцільність проведення випробувань на нагрівання тягових двигунів магістрального електрорухомого складу за струму навантаження, який дорівнює струму пускового режиму, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на прийнятно-здавальні випробування. Запропоновано метод аналітичного визначення вагових коефіцієнтів впливу на перевищення температури обмотки якоря електричних втрат, використання якого дозволяє оцінити вплив режимів взаємного навантаження випробовуваних тягових електромашин на ступінь розбіжності теплових навантажень обмоток їх

якорів. **Практична значимість.** Визначення раціональних режимів взаємного навантаження тягових електричних машин дозволяє зменшити витрати електроенергії та скоротити час на проведення їх випробувань на нагрівання. Крім того, стає можливим запропонувати спосіб оцінювання якості приймально-здавальних випробувань тягових електричних машин, у якому враховано ступінь розбіжності теплових навантажень обмоток.

Ключові слова: навантаження; випробування; нагрівання; струм; напруга; тягова електромашини; режим випробування; час; ефективність; коефіцієнт; температура

Вступ

Особливістю тягових електричних двигунів (ТЕД) електровозів, що відрізняє їх від звичайних електродвигунів великої потужності, є компактність конструкції у зв'язку з обмеженим простором їх розміщення й умовами монтажу. Невеликі розміри ТЕД продиктовані необхідністю максимально використати внутрішній простір машини, що, у свою чергу, призводить до більш високої робочої температури її вузлів порівняно з електричними машинами загальнопромислового виробництва.

Надійна й безвідмовна робота електричної машини як складного пристрою залежить від надійності роботи її складових частин – магнітної системи, обмоток, а для двигунів постійного струму – колектора й щіткового пристрою. Вихід з ладу будь-якої із цих частин призводить до відмови в роботі всієї машини.

У цілому по мережі українських залізниць на сьогодні дні найчастіше застосовують тягові електродвигуни НБ–418К6 і ТЛ–2К1 (36 і 38 % від загальної кількості ТЕД). Аналіз статистичних даних щодо відмов тягових електродвигунів показав, що на зазначені типи припадає майже 50 % усіх псувань і несправностей.

Найбільша кількість відмов електродвигунів пов'язана з виходом із ладу ізоляції через перевищення допустимих норм теплового стану, вплив механічних зусиль (тиск, вібрація й удари), вологі, агресивного середовища, а також інші чинники. При цьому однією з головних причин виникнення несправностей як для машин постійного, так і змінного струму є порушення їх теплового стану (робота з недостатнім охолодженням або взагалі без нього). З огляду на те, що тягові електродвигуни ЕРС і постійного, і змінного струму працюють в однакових важких умовах експлуатації і навантажень, а також на те, що системи охолодження двигунів є аналогічними, можна зробити висновок, що застосовувана в ТЕД ізоляція буде схильна до передчасного старіння. Температура електродви-

гуна впливає на ізоляцію обмоток, на роботу підшипників та інші активні елементи машини. Гранично допустимі температури активних частин належать до числа найважливіших чинників, які обмежують потужність ТЕД, і значно впливають на підвищення надійності й ресурсу, а також на величину граничної одиничної потужності.

Таким чином, одним з основних факторів, що впливає на термін служби ізоляції обмоток ТЕД, є їх тепловий стан. Тому необхідний постійний контроль за температурою вузлів двигуна під час випробувань у разі взаємного навантаження.

Мета

Основною метою роботи є вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсувального струму шляхом обґрунтування режимів їх навантаження, щоб забезпечити зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної станції, підвищити енергетичну ефективність та якість випробувань. Досягнення поставленої мети передбачає виконання таких завдань:

- отримати аналітичні вирази для визначення енергетичної ефективності нагрівання обмоток випробовуваної тягової електричної машини

- подати тягову електричну машину у вигляді відношення зміни її сумарної термічної енергії до сумарної енергії втрат у ній;

- обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробування тягових двигунів електрорухомого складу магістрального залізничного транспорту на нагрівання за рахунок збільшення струму навантаження до пускового значення.

Методика

Чинний стандарт [9] передбачає перевірку всіх (як нових, так і тих, що пройшли ремонт) тягових електродвигунів на нагрівання. З урахуванням їх теплових параметрів за

номінальної кількості охолоджувального повітря.

Перевірку тягових електродвигунів на нагрівання виконують із використанням таких їх теплових параметрів, як перевищення температури τ_{∞} , що встановилося, і постійна часу нагрівання T [10]. Перевищення температури обмоток тягових електричних машин визначають за графіками, що показують залежність перевищення температури τ від часу t за певних значень струму й номінальної кількості охолоджувального повітря. Ці графіки будують за результатами теплових випробувань тягових електричних машин на стенді: у разі постійного навантаження вимірюють температури обмоток через певні проміжки часу й наносять на графік. Аналогічні графіки будують для інших струмів.

Програма випробувань передбачає:

- вимірювання опору обмоток постійного струму в практично холодному стані;

- створення режимів нагрівання й охолодження за різних струмів якоря та за різної кількості охолоджувального повітря, а саме:
 $Q = Q_{\text{НОМ}}$; $Q = 0,75Q_{\text{НОМ}}$; $Q = 0,5Q_{\text{НОМ}}$;
 $Q = 0 \text{ м}^3/\text{хв.}$

Вимірювання опору обмоток проведено методом вольтметра-амперметра приладами класу точності 0,5. Значення опорів зведено до температури 20 °С.

Режими нагрівання й охолодження створювали за номінального значення ступеня ослаблення збудження, на робочому струмі (постійному або пульсувальному), за схемою взаємного навантаження з лінійним генератором і вольтдопоматковою машиною. Випробування полягали у визначенні перевищення температур обмоток двигуна над охолоджувальним повітрям і визначенні величини нагріву колектора. Перевищення температур визначали за різних струмів якоря й різної кількості охолоджувального повітря методом опору відповідно до [9]. Температуру колектора, охолоджувального й навколишнього повітря вимірювали ртутними термометрами. Кількість продуваного через двигун повітря, контролювали за допомогою водяного манометра за величиною статичного тиску в колекторній камері відповідно до кривої $H_{\text{СТ}}(Q)$.

Відповідно до закону нагрівання однорідного твердого тіла [1], перевищення температури тягових електродвигунів τ , °С визначають аналітично:

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

де τ_0 – початкове перевищення температури для розрахункового проміжку часу, °С; τ_{∞} – значення перевищення температури обмоток якоря, що встановилося, °С; e – основа натуральних логарифмів; T – постійна часу нагрівання, хв., що відповідає такому часу, упродовж якого нагрілася б обмотка ТЕД до температури, що встановилася, за повної відсутності тепловіддачі.

У разі зміни кількості охолоджувального повітря Q певним чином змінюватимуться й теплові параметри. Для набуття достовірного значення τ під час виконання тягових розрахунків у формулу (1) необхідно підставляти змінні значення τ_{∞} і T . З метою отримання залежностей $\tau_{\infty}(I)$ і $T(I)$ за змінної кількості охолоджувального повітря, необхідно виконати статистичну обробку наявних кривих нагрівання ТЕД. Для цього потрібно провести розрахунки за такою методикою:

а) за наявними кривими нагрівання обчислити постійну часу нагрівання T для різних значень струму якоря I за певних величин кількості повітря Q , що охолоджує ТЕД;

б) розрахувати залежність $T(I)$ для певних значень Q ;

в) за наявними кривими нагрівання визначити значення перевищення температури τ_{∞} , що встановилося, для різних значень струму якоря I за постійної величини Q ;

г) побудувати залежності $\tau_{\infty}(I)$ для певних значень Q .

Для обчислення постійної часу нагрівання якірної обмотки T використовуємо аналітичний метод [2], згідно з яким T визначаються з формули:

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

Тоді шляхом логарифмування й подальшого перетворення отримуємо:

$$T = -\frac{t}{\ln \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \right)}. \quad (3)$$

Через відсутність у початкових даних функціональної залежності $\tau(t)$ для розрахунку у формулу (3) можна підставити тільки значення t і τ узяті з експериментальної кривої нагрівання, наявної в протоколі випробувань.

Для інших значень t і відповідних їм значень τ розрахунки виконано аналогічно.

У зв'язку з тим що сьогодні використовують в основному ступінчасте керування продуктивністю вентиляторів, для виконання тягових розрахунків під час перевірки можливості водіння поїздів локомотивами, обладнаними пристроями керування продуктивність вентиляторів, досить знати два значення T : значення Q_H і те значення Q , на яке перемикають вентилятор.

Результати

Режим навантаження тягових електромашин під час випробування характеризується такими параметрами, як:

- напруга на колекторі;
- струм навантаження;
- коефіцієнт ослаблення поля;
- витрата повітря, що охолоджує.

Розглянемо кожен із цих параметрів щодо можливості їхнього впливу на раціональність режиму навантаження тягових електромашин під час випробування.

Як критерії раціональності будемо розглядати:

- мінімум сумарної наведеної потужності джерел випробувального стенда;
- максимум енергетичної ефективності процесу випробування;
- максимум якості випробувань.

Відповідно вимогам [9], випробування на нагрівання тягових електродвигунів необхідно проводити за номінальної напруги, при цьому

частоту обертання випробовуваних електромашин визначають за струмом навантаження та їх електромеханічними характеристиками. У разі відхилення магнітних характеристик випробовуваних електромашин від типових залежностей їх частоти обертання за номінальної напруги також відрізнятимуться від типового значення, що відповідає номінальному (годинному) струму.

Напруга на колекторі. Результати досліджень [11] показують, що зміни випробувальної напруги у вузьких межах ($\pm 5\%$) не надають помітного впливу на характер протікання теплових процесів в обмотках випробовуваних електромашин. Отже, під час проведення випробувань на нагрівання немає необхідності в жорсткій стабілізації випробувальної напруги на рівні номінального значення. І більш раціонально, із точки зору керованості системи взаємного навантаження, буде стабілізувати частоту обертання якорів випробовуваних електромашин до значення, що відповідає струму навантаження за типовою електромеханічною характеристикою тягової електромашини.

Забезпечення величини напруги на колекторі, близької до номінального значення, під час проведення випробувань на нагрівання є вимогою якісної перевірки потенційних умов на колекторі та стійкості проти дугоутворення. Таким чином, випробувальну напругу не можна розглядати як фактор, варіювання якого впливає на критерій вибору раціонального режиму випробування.

По суті, вимоги до напруги на колекторі випробовуваної електромашини є обмеженням завдання вибору раціонального режиму навантаження.

Коефіцієнт ослаблення поля. І за вимогами [9], і з точки зору забезпечення якості випробувань на нагрівання коефіцієнт ослаблення поля повинен дорівнювати номінальному значенню. Для перевірки комутації коефіцієнт ослаблення поля потрібно взяти мінімальним, що зумовлено вимогами якості цієї перевірки [9].

Вимога до значення коефіцієнта ослаблення поля, як і вимоги до випробувальної напруги, є обмеженням завдання вибору раціонального режиму навантаження.

Витрата охолоджувального повітря. Як [9], так і [7] допускають, за узгодженням із замовником, проведення випробувань на нагрівання

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

в разі витрати охолоджувального повітря в кількості, меншій ніж номінальна, зокрема і вентиляції. При цьому еквівалентні значення струму навантаження випробовуваних електромашин встановлюють меншими за годинний і тривалий струм. Це зумовлено нагріванням частин випробовуваної електромашини за годину часу випробування до значень перевищення температури, що відповідають перевищенню в номінальному режимі [9].

Економічний ефект від упровадження такого методу випробувань на нагрівання полягає, як правило, в економії електроенергії, витраченої на вентиляцію, та у відсутності вентиляційної системи на випробувальній станції [5, 8]. Слід зазначити, що випробування на нагрівання без вентиляції ще й значно підвищує енергетичну ефективність нагрівання обмоток електромашин за рахунок зниження енергії тепловіддачі [3].

Істотним недоліком випробувань на нагрівання без вентиляції є відсутність перевірки ефективності охолодження елементів електромашини, яку визначають потужністю тепловіддачі [6]. За такого методу випробування малий вплив на характер теплообмінних процесів мають теплові опори конвективної та кондуктивної тепловіддачі, а також аеродинамічний опір електромашини. Усе це призводить до зниження якості випробувань на нагрівання.

Ще одним істотним недоліком випробувань на нагрівання без вентиляції, що знижує їх якість, є робота випробовуваних електромашин за еквівалентних струмів, значно менших за годинний і тривалий струм електромашини [5]. За таких умов навантаження знижується якість перевірки стійкості проти дугоутворення протягом випробувань на нагрівання. Незважаючи на те, що метою випробувань на нагрівання є визначення перевищення температури частин електромашини, деякі випадки бракування електромашин пов'язані з появою кругового вогню під час цього випробування.

Можливою перевагою проведення випробувань на нагрівання без вентиляції могла б бути менша наведена сумарна потужність джерел випробувального стенда, але в [9] передбачена перевірка комутації, яка потребує можливості встановлення значення струму навантаження нагрітих електромашин, що дорівнює пусковому струму. Отже, у діапазоні зміни від нуля до

пускового значення величина струму навантаження, яку обирають для проведення випробувань на нагрівання, на сумарну величину наведеної потужності джерел випробувального стенда не впливає.

Струм навантаження. За вимогами [9], струм навантаження електромашин під час випробування на нагрівання повинен дорівнювати годинному значенню. При цьому і [9], і [7] допускають проведення випробувань за еквівалентних струмів, що дають перевищення температур обмоток електромашин, які відповідають тривалому режиму.

Одним із критеріїв вибору раціонального режиму навантаження є максимум коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання обмоток електромашин.

Як показали результати попередніх досліджень, величина струму навантаження впливає на енергетичну ефективність випробувань на нагрівання та загальну витрату електроенергії на випробування. Проведемо аналіз виразу коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання, отриманого в [3]:

$$k_{\text{ефн}} = \frac{T_e \cdot \tau_1}{\tau_{\infty} (t_1 + \alpha (\tau_{\infty} t_1 - \tau_1 T_e))}, \quad (4)$$

де T_e – еквівалентна постійна часу нагрівання; τ_1 – перевищення температури обмотки наприкінці випробування; τ_{∞} – перевищення температури, що встановилося; t_1 – час випробувань на нагрівання; α – температурний коефіцієнт опору.

Час проведення випробувань на нагрівання визначають за формулою:

$$t_1 = T_e \ln \frac{\tau_{\infty}}{\tau_{\infty} - \tau_1}. \quad (5)$$

Значення перевищення температури τ_1 , відповідно до [9], беруть для кожної частини електричної машини (якір, полюси) таким, яке дорівнює максимально допустимому значенню, що відповідає класу нагрівостійкості ізоляції. Для більшості типів тягових електромашин обмоткою, що лімітує за нагріванням, є обмотка якоря [4], тому далі розглядатимемо перевищення температури саме цієї обмотки. При цьому необхідно відзначити, що вибір раціонального струму

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

навантаження для тягових електромашин з іншими обмотками, що лімітують, буде аналогічним за принципом.

Таким чином, у формулі (4) параметрами, що визначають критерій енергетичної ефективності $k_{\text{ефн}}$, є τ_{∞} і T_e . Як показано вище, еквівалентну постійну часу T_e для тягових двигунів можна брати постійною й незалежною від струму навантаження [4]. А перевищення температури τ_{∞} , що встановилося, є функцією струму навантаження, яку можна вважати відомою для кожного типу тягової електромашини [4].

Характер такої залежності наведено на рис. 1. Як було зазначено, залежність $\tau_{\infty}(I)$ із допустимим ступенем спрощення можна вважати параболічною.

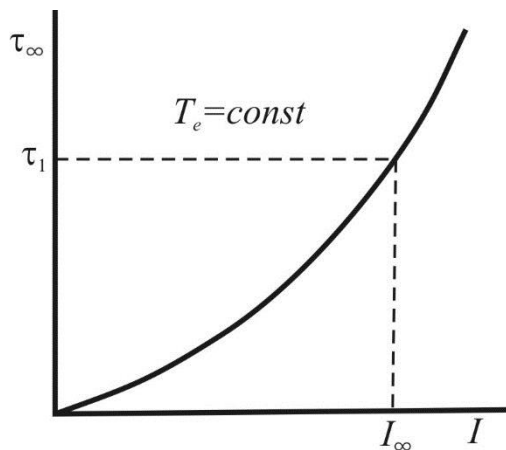


Рис. 1. Характер залежності $\tau_{\infty}(I)$

Fig. 1. Nature of dependence $\tau_{\infty}(I)$

З аналізу формул (4) і (5) можна зробити висновки, що за струму навантаження I , для якого $\tau_{\infty}(I) < \tau_1$, час випробування t_1 буде прагнути до нескінченності, а коефіцієнт енергетичної ефективності $k_{\text{ефн}}$ дорівнює нулю.

Умова $\tau_{\infty}(I) < \tau_1$ може бути представлена у вигляді:

$$I < I_{\infty}, \quad (6)$$

де I_{∞} – тривалий струм тягового електродвигуна (рис. 1).

Тоді матиме місце вираз:

$$\tau_1 \rightarrow \infty, \quad k_{\text{ефн}} = 0 \quad \text{за } I < I_{\infty}.$$

У разі зростання струму навантаження I та відповідного зростання перевищення $\tau_{\infty} \cdot t_1$ зменшується, а $k_{\text{ефн}}$ збільшується.

У випадку прагнення значень I і τ_{∞} до нескінченності час випробування t_1 буде прагнути до нуля, а коефіцієнт енергетичної ефективності – до одиниці. Прямая лінія $k_{\text{ефн}} = 1$ є асимптотою для характеристики $k_{\text{ефн}}(I)$:

$$\lim_{I \rightarrow \infty} t_1 = 0; \quad \lim_{I \rightarrow \infty} k_{\text{ефн}} = 1. \quad (7)$$

Характери залежностей $k_{\text{ефн}}(I)$ і $t_1(I)$ графічно представлені на рис. 2.

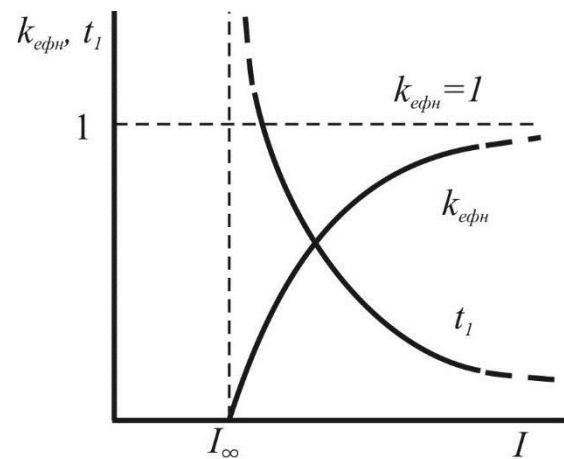


Рис. 2. Характери залежностей $k_{\text{ефн}}(I)$ і $t_1(I)$

Fig. 2. Nature of dependencies $k_{\text{ефн}}(I)$ and $t_1(I)$

Іншим критерієм вибору оптимального режиму навантаження є мінімум максимальної наведеної потужності джерела випробувального стенда. Цей критерій був використаний під час вибору раціональних схем навантаження випробовуваних тягових електромашин.

Мінімально допустимим значенням підведеної потужності джерела живлення є $\sum \bar{P}_{\text{дж}}(I_{\text{пуск}})$. Це зумовлено необхідністю перевірки комутації за пускового струму. Таким чином, діапазон зміни струму I , у якому слід шукати його раціональне значення, може бути представлений у вигляді:

$$I \in [I_{\text{пуск}}; \infty). \quad (8)$$

Аналіз залежностей $k_{\text{ефн}}(I)$, отриманих для реальних типів тягових електродвигунів [2], показує, що збільшення струму навантаження від годинного до пускового значення призводить до підвищення $k_{\text{ефн}}$ приблизно в 1,5 раза, у своїй величині $\sum \bar{P}_{\text{дж}}$ збільшується на 20–30 % (у разі використання одного джерела). Час проведення випробувань на нагрівання за пускового струму навантаження зменшується майже втричі порівняно з годинним режимом.

Подальше підвищення струму навантаження, наприклад, до $2I_{\text{год}}$, призводить до незначного зростання $k_{\text{ефн}}$ та значного збільшення $\sum \bar{P}_{\text{дж}}$. Із цього погляду найбільш раціональним буде значення струму навантаження під час випробувань на нагрівання, що дорівнює пусковому струму:

$$I_{\text{рац}} = I_{\text{пуск}}.$$

Наукова новизна та практична значимість

У роботі запропоновано енергетичну ефективність випробування тягових електромашин на нагрівання розглядати як залежність від енергетичної ефективності системи взаємного навантаження й процесу нагрівання, що дозволяє розв'язувати задачу підвищення енергетичної ефективності випробування тягових електричних машин у двох незалежних напрямках, один із яких – підвищення ККД джерел та перетворювачів потужності, а другий – вибір раціональних режимів навантаження. Для визначення енергетичної ефективності нагрівання обмоток випробовуваної тягової електричної машини введено поняття критерію енергетичної ефективності й отримано аналітичні вирази, які подано у вигляді відношення зміни сумарної термічної енергії електромашини до сумарної енергії втрат у ній. Це дозволило обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробувань на нагрівання тягових двигунів електродвигуна складу магістрального залізничного транспорту за рахунок збільшення струму навантаження до пускового значення. Доцільність проведення випробувань на нагрівання за пускового струму навантаження пов'язана з підви-

щенням енергетичної ефективності випробувань та відповідним зменшенням загальних витрат електроенергії на приймально-здавальні випробування.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, отримані в роботі, дозволили визначити раціональні режими систем взаємного навантаження, використання яких забезпечує зниження собівартості нових і матеріальні витрати на модернізацію наявних станцій для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту в 1,5 – 2 рази. Запропоновано спосіб оцінювання якості приймально-здавальних випробувань тягових електричних машин, у якому враховано ступінь розбіжності теплових навантажень їх обмоток. Результати досліджень упроваджені в навчальний процес Навчально-наукового інституту «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» (ДНІТ) Українського державного університету науки і технологій, курс «Теорія електропривода».

Висновки

1. Режими взаємного навантаження тягових електричних машин, які використовують під час їх приймально-здавальних випробувань, є нераціональними. Наявні станції з випробування тягових електричних машин, стан яких не відповідає сучасним вимогам організації технічного контролю, потребують модернізації, спрямованої на зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної системи, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

2. Аналіз енергообмінних і теплових процесів, виконаний у роботі, показав, що загальна енергетична ефективність процесу випробування електромашин на нагрівання може бути представлена у вигляді добутку коефіцієнта енергетичної ефективності системи взаємного навантаження та коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання обмоток тягових електромашин.

3. Використання критеріїв та методу вибору раціональних режимів взаємного навантаження, розроблених у роботі, дозволить установити найбільш раціональні варіанти систем взаємного навантаження для тягових електродвигунів та допоміжних електричних машин постійного й пульсувального струму тягового рухомого

складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

4. Аналіз виразу для визначення коефіцієнта енергетичної ефективності нагрівання обмоток тягових електромашин, отриманого в роботі, показує що найбільш раціональними під час випробування на нагрівання тягових двигунів еле-

ктрорухомого складу магістрального транспорту є пусковий струм. Використання цього струму навантаження дозволяє знизити витрати електроенергії на випробування на 20–30 % (порівняно з годинним режимом) без зниження якості випробувань, а також зменшує час випробувань на нагрівання в 3 – 4 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : підручник : у 2 т. Т. 1. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. 492 с.
2. *ДСТУ ГОСТ 2582:2017. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)*. [Действующий от 2017-01-30]. 2017. 50 с.
3. *Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063*. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. 286 с.
4. Afanasov A. M. Increase of energy efficiency of testing of traction electric machines of direct and pulsating current. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2015. Vol 1. P. 12–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.02>
5. Afanasov A. M., Shapovalov O. S., Holik S. N., Arpul S. V., Bilukhin D. S. Energy efficiency of heat tests for traction electric machines. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012026>
6. Jacobs S., Vandenbossche L., Attrazic E. How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/MELE.2018.2889550>
7. Popa G., Ilie C., Arsene S. Stand for testing electrical machines up to 1,500 kilowatts used in railway traction. *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*. 2010. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2010.5520829>
8. 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>
9. Sokol Y., Sychenko V., Voitovych Y., Styslo B., Hubskeyi P. AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2019. P. 116–121. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764207>
10. Sychenko V., Antonov A., Liashuk V., Rudevich N., Belukhin D., Danylov O., ... Bozhko V. Increased controllability of the distributed traction system in emergency mode. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 58–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160285>
11. Tudor E., Strambeanu D., 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>

S. V. ARPUL^{1*}, A. M. AFANASOV^{2*}, D. S. BILUKHIN^{3*}, V. Y. VASYLIEV^{4*},
O. S. SHAPOVALOV^{5*}, S. Y. BURIYAK^{6*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{2*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail afanasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{3*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail comandor04@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{4*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{5*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

^{6*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail ser.buriyak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

Determination of the Rational Mode of Mutual Loading of Traction Engines of Main Electric Locomotives

Purpose. The actual state of many of the existing testing stations for traction electric machines does not meet modern requirements for the organization of repair and technical control. At most of these stations, mutual loading stands with low energy efficiency are used. The purpose of the work is to determine the rational mode of loading electric traction machines, which will ensure a decrease in the total power of the power sources of the test station, an increase in energy efficiency and the quality of tests. **Methodology.** The methodological basis of the work is the general theoretical provisions and principles of the systematic approach of theoretical electrical engineering, theoretical mechanics, the theory of electric machines and converters. The substantiation of the energy and electromechanical principles of mutual loading of traction electric machines is performed using the basics of generalization and systematization of physical quantities and concepts, the theory of electric circuits, the theory of mechanical systems, and the theory of electric machines. The analysis of thermal processes and energy parameters of the electric machine test system was performed using the theory of heating a homogeneous solid body and known methods of calculating thermal circuits. The results of theoretical studies have been confirmed experimentally. **Findings.** The analysis of the expression for determining the energy efficiency coefficient of heating the windings of traction electric machines, obtained in the work, shows that the starting current is the most rational when testing the traction motors of electric rolling stock of mainline transport for heating. The use of this load current allows reducing the electricity consumption for tests by 20-30% (compared to the hourly mode) without reducing the quality of tests, as well as reduces the time of heating tests by three to four times. **Originality.** The expediency of conducting the heating tests of traction motors of main electric rolling stock with a load current equal to the current of the start-up mode has been scientifically substantiated, which ensures the energy efficiency increase of the tests and a corresponding reduction in the total cost of electricity for acceptance tests. The method of analytical determination of the weighting coefficients of influence on the temperature excess of the armature winding of electric losses was proposed, the use of which allows evaluating the influence of the mutual loading modes of the tested traction electric machines on the discrepancy degree of the thermal loads of their armature windings. **Practical value.** The results of theoretical studies allow determining the rational modes of mutual loading of traction electric machines, which make it possible to reduce the electricity consumption for conducting their heating tests and shorten the time of conducting heating tests. In addition, it becomes possible to propose a method of evaluating the quality of acceptance tests of traction electric machines, which takes into account the discrepancy degree in the thermal loads of the windings.

Keywords: load; test; heating; current; voltage; traction electric machine; test mode; time; efficiency; coefficient; temperature

REFERENCES

1. Hetman, H. K. (2015). *Teoriya elektrychnoji tzhaghy: pidruchnyk* (Vol. 1). Dnipropetrovsk: Akcent PP. (in Ukrainian)
2. *Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya tyagovyje. Obshchie tekhnicheskie usloviya (GOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)*, 50 DSTU GOST 2582:2017. (2017). (in Russian)
3. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropojizdiv. CT-0063*. (2003). Kyiv: Vydavnychy dim «SAM». (in Ukrainian)

4. 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 English)
5. Afanasov, A. M., Shapovalov, O. S., Holik, S. N., Arpul, S. V., & Bilukhin, D. S. (2020). Energy efficiency of heat tests for traction electric machines. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 985, pp. 21-30). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012026> (in English)
6. Jacobs, S., Vandenbossche, L., & Attrazic, E. (2019). How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. In *IEEE Electrification Magazine* (Vol. 7, pp. 39-48).
DOI: <https://doi.org/10.1109/MELE.2018.2889550> (in English)
7. Popa, G., Ilie, C., & Arsene, S. (2010). Stand for testing electrical machines up to 1,500 kilowatts used in railway traction. In *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)* (pp. 64-70). DOI: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2010.5520829> 64-70 (in English)
8. 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, 11-17.
DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921> (in English)
9. Sokol, Y., Sychenko, V., Voitovych, Y., Styslo, B., & Hubskeyi, P. (2019). AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation. In *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 116-121). DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764207> (in English)
10. Sychenko, V., Antonov, A., Liashuk, V., Rudevich, N., Belukhin, D., Danylov, O., ... & Bozhko, V. (2020). Increased controllability of the distributed traction system in emergency mode. In *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 58-62).
DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160285> (in English)
11. Tudor, E., Strambeanu, D., & 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> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.11.2021

Прийнята до друку: 18.03.2022

УДК 629.4.053:621.383.51

А. М. МУХА^{1*}, С. В. ПЛАКСІН^{2*}, Л. М. ПОГОРІЛА^{3*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{4*},
Ю. В. ШКІЛЬ^{5*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{3*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

^{4*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій НАН України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта yvs@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана

Мета. Основною метою цієї роботи є формування концептуальних підходів до побудови ефективної інтегрованої системи синхронізованого керування рухом та підвісом магнітолевітаційного транспортного засобу – магнітоплана. **Методика.** У ході дослідження використано метод одночасного керування рухом і підвісом магнітолевітаційного транспортного засобу, взаємоузгоджене застосування обох способів левітації – електромагнітного та електродинамічного – через індивідуальне керування енергопостачанням кожної шляхової котушки. **Результати.** Обґрунтовано концептуальні принципи керування тягово-левітаційною системою в гібридному режимі її роботи. Розкрито взаємодію шляхової структури та транспортного засобу на електродинамічному підвісі з лінійним приводом, висвітлено особливості реалізації силової частини. **Наукова новизна.** Показано, що значного поліпшення магнітолевітаційної технології можна досягнути завдяки взаємоузгодженій комбінації електромагнітного й електродинамічного способів левітації та використання принципово іншої побудови маглев-траси – не із довгих секцій з трифазними силовими обмотками, а з дискретних коротких котушок, які одночасно є і тяговими котушками лінійного двигуна, і складовим елементом (навантаженням) сонячної шляхової енергоустановки (СШЕУ), розміщеної уздовж шляхопроводу. До складу СШЕУ входять фотоелектричний модуль (сонячна батарея), що перетворює сонячну енергію в електроенергію, накопичувач та інвертор. Така будова робить можливим незалежне, автономне живлення кожної шляхової котушки та автономне керування нею з перемиканням або в тяговий режим, або в режим левітації. Концепція керування полягає в тому, щоб кожна шляхова котушка могла брати участь як у створенні статичного підвісу за рахунок взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітного поля шляхових котушок під час подачі на них постійного струму певної величини, так і динамічного підвісу в процесі руху поїзда в результаті взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітних полів, створюваних у шляхових котушках струмами, що надходять до них під час перетину магнітних полів бортового надпровідного магніту. **Практична значимість.** Використання такої комбінованої системи керування рухом та підвісом магнітоплана призведе до якісного поліпшення маглев-технології, збільшення ефективності та надійності високошвидкісного наземного транспорту на основі електродинамічної левітації з використанням надпровідних магнітів.

Ключові слова: магнітолевітаційний транспортний засіб; електромагнітна левітація; електродинамічна левітація; тягово-левітаційна система; комбінована система керування рухом та підвісом

Вступ

Серед різних видів високошвидкісного наземного транспорту саме магнітолевітаційний визнано найбільш перспективним. Це обумов-

лено поєднанням важливих переваг – високою енергоефективністю системи переміщення, низьким рівнем шуму в міських умовах, низькою експлуатаційною вартістю обслуговування

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

шляхопроводу (через відсутність механічного контакту типу «колесо – рейка»), доброю електромагнітною сумісністю тощо.

Інтерес до магнітолевітаційного транспорту у світі все зростає [7, 9–10]. На сьогодні цей вид транспорту вже реалізований у цілому ряді технологічно розвинених країн: у Південній Кореї (лінія до аеропорту Інчхон), Японії (у префектурі Яманаші встановлено світовий рекорд швидкості для наземного транспорту – 603 км/год), у Китаї (лінія від Шанхаю до аеропорту Пудонг) та ін. Проекти маглев-ліній на різних етапах дослідження/реалізації є і в ряді інших країн: Австралії, Індії, Ірані, Венесуелі, Бразилії, США, Канаді, Великобританії, Німеччині. Актуальність розвитку такого виду транспорту продиктована сучасними потребами суспільства в пришвидшенні доставки вантажів і людей, інтенсифікації виробничих процесів.

Аналіз сучасного стану магнітолевітаційного транспорту показує, що у світі продовжують активно розвиватися два основні способи магнітного підвісу – електромагнітний (німецька система «Трансрапід», упроваджена в Китаї) та електродинамічний (надпровідна система японської фірми «JR-MAGLEV») [1, 8]. Особливості кожного підвісу визначають і особливості відповідної системи керування рухом транспортного засобу.

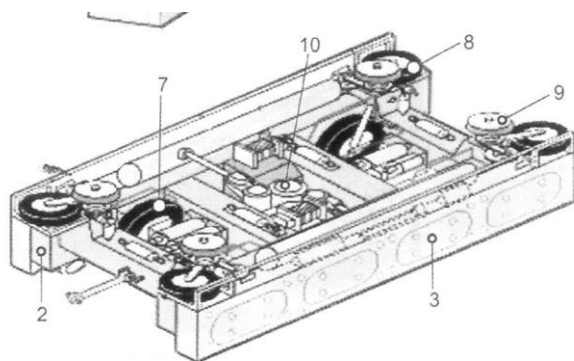


Рис. 1. Колісне шасі [1]:

- 2 – рама, до якої кріпляться надпровідні магніти;
- 3, 7 – колеса підвісу; 8 – колеса бічного напрямку;
- 9 – пневморесори, які використовує вторинна система підвісу; 10 – компресори та інше допоміжне обладнання

Fig. 1. Wheel undercarriage [1]:

- 2 – the frame to which the superconducting magnets are attached; 3, 7 – suspension wheels; 8 – lateral direction wheels;
- 9 – pneumatic springs used by the secondary suspension system; 10 – compressors and other auxiliary equipment

Насправді електромагнітний підвіс реалізується без використання коліс на ділянках розгону або гальмування поїзда, а також у статичному режимі на зупинках. Однак у разі використання цієї технології значно зростають вимоги до якості поверхні шляхового полотна, його рівності, оскільки левітаційний зазор у цьому випадку не перевищує 10 мм. Високі вимоги ставлять і до точності та швидкодії системи керування, що забезпечує необхідний зазор між днищем магнітоплану та шляховою структурою.

Електродинамічна система маглев-підвісу передбачає наявність досить важкого колісного шасі (рис. 1) на ділянках розгону та гальмування, але при цьому через значно більший левітаційний зазор (100–150 мм) відпадає необхідність у побудові прецизійної шляхової структури.

Подальше нарощування технологічного/комерційного успіху високошвидкісних транспортних маглев-засобів (магнітопланів) передбачає вдосконалення і систем магнітного підвісу, і лінійного електроприводу, і системи бортового енергозабезпечення, а також підвищення комфорту для пасажирів, насамперед – розробки ефективної системи керування рухом та підвісом магнітоплану [5, 6].

Мета

Відповідно до викладеного основною метою цієї роботи є формування концептуальних підходів до побудови комплексної системи синхронізованого керування рухом та підвісом магнітоплану.

Методика

Суттєвого вдосконалення маглев-технології можна досягти за рахунок взаємоузгодженого поєднання обох способів левітації та створення нової системи керування рухом магнітоплану та його підвісом одночасно.

Для цього можна використати шляхові колушки як для динамічного, так і статичного підвісу шляхом керованої подачі в них певної енергії. Така можливість відкривається в разі застосування принципово іншої побудови маглев-траси (шляхопроводу) – не з довгих секцій (довжиною аж до 1 км, як це роблять зараз) із

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

трифазними силовими обмотками, а з дискретних коротких котушок (довжиною до 2 м), які одночасно є і тяговими котушками лінійного двигуна, і навантаженням розміщених уздовж шляхопроводу енергоустановок, що живляться від сонячних батарей [2]. Ця будова є втіленням інтеграції магнітолевітаційної магістралі та розподіленої сонячної електростанції (рис. 2).

У наявному проєкті надпровідного електродинамічного підвісу (Японія) тягові секції лінійного двигуна монтують у бічних стінках шляхопроводу (рис. 3, а), при цьому застосовують удосконалений спосіб формування трифазних тягових котушок із кабелів (рис. 3, б).



Рис. 2. Інтеграція магнітолевітаційної магістралі та розподіленої сонячної електростанції

Fig. 2. Integration of the magnetolevitation highway and the distributed solar power plant

Результати

Під час побудови маглев-траси за запропонованим нами способом кожна шляхова котушка є складовим елементом (навантаженням) сонячної шляхової енергоустановки (СШЕУ), до складу якої входять фотоелектричний модуль (сонячна батарея), накопичувач та інвертор (рис. 4). Така будова робить можливим незалежне, автономне живлення кожної шляхової котушки та автономне керування нею.

Уздовж шляхової структури для транспортного засобу на електродинамічному підвісі з лінійним приводом розміщують секції статорної обмотки лінійного синхронного тягового електродвигуна. Кожна така секція складається зі шляхових котушок, кожен шляхову котушку живить електроенергією автономне джерело, причому рух транспортного засобу регулює

система керування, що забезпечує своєчасне вмикання й вимикання кожної наступної шляхової котушки (а якщо рух назад, то попередньої). Автономне джерело енергії (рис. 4) складається з фотоелектричної установки Φ для перетворення сонячної енергії в енергію електричного струму, інвертора для перетворення енергії електричного струму I та накопичувача енергії H .

a – a



б – б

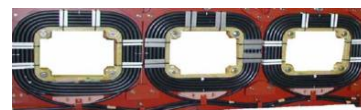


Рис. 3. Надпровідний електродинамічний підвіс:
а – бічні стінки шляхопроводу;
б – котушка кабельного типу

Fig. 3. Superconducting electrodynamic suspension:
a – side walls of the overpass; *b* – cable-type coil

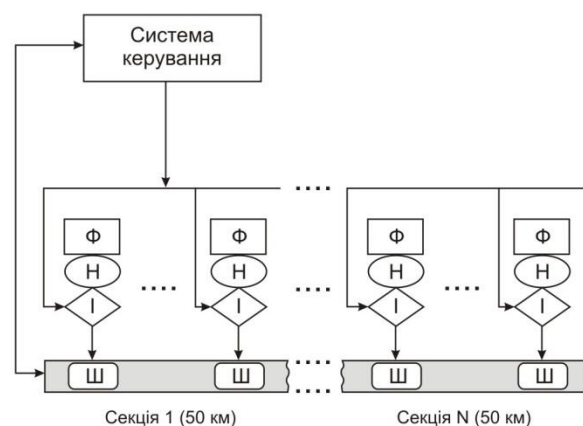


Рис. 4. Структурна схема електропостачання лінійного двигуна маглев-транспорт

Fig. 4. Structure diagram of linear motor power supply of maglev vehicles

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Система керування здійснює інформаційний взаємозв'язок між шляховими котушками III шляхової структури та навігаційною підсистемою (на рис. 4 не показано), яка контролює місце перебування екіпажа в будь-який момент часу. У результаті досягається своєчасне вмикання й вимикання шляхових котушок. Інвертор I забезпечує шляхову котушку III електричною енергією заданої форми й частоти. Пласка панель фотоелектричної установки розташована горизонтально або під оптимальним кутом для заданих координат розташування. Як накопичувач енергії використано акумуляторну батарею. Надлишок електроенергії надходить до зовнішньої енергосистеми, що функціонує за принципом інтелектуальної мережі «Smart Grid» [2].

Потужності сонячного випромінювання, що досягає землі в умовах України, достатньо для енергозабезпечення кожного метра шляхової структури від фотоелектричної установки з площею панелі 3 м^2 . Кожна фотоелектрична установка забезпечує електричною енергією одну шляхову котушку, розмір якої Δ вздовж шляхової структури може бути від 0,5 до 2 м. Це означає, що для однієї шляхової котушки розміром Δ м досить однієї фотоелектричної установки з площею панелі $S=3\Delta \text{ м}^2$, або набагато більше залежно від ККД перетворення сонячного випромінювання [2]. Тоді маглев-транспорт буде забезпечено електроенергією в такому обсязі: для однієї тонни вантажу пропускна здатність шляху дорівнює 1,5–2,6 хв за умови, що вказані фотоелектричні установки мають ККД $\approx 10\%$. Розрахунки проведено для високошвидкісного поїзда масою 400 т (10 вагонів), здатного розвивати швидкість 500 км/год. При цьому кожна шляхова котушка характеризується питомою енергією споживання до $0,08 \times 1,5 \Delta \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{т} \cdot \text{м}$ [3]. Якщо обрати накопичувачем свинцево-кислотну акумуляторну батарею напругою 12 В, ємністю 200 А·год, то її вистачить для роботи автономного джерела енергії протягом цілого року, а накопиченої за один сонячний день енергії вистачить на 12 хмарних днів, якщо такі раптом настануть [4]. Розрахунки виконано для площини панелей фотоелектричних установок, розташованих горизонтально, без узяття до уваги широти місцевості й особливостей сонячного

випромінювання, яке досягає перетворювачів енергії. Енергетичну ефективність розподіленої фотомережі можна підвищити за рахунок раціонального розташування панелей фотоелектричних установок уздовж шляхової структури.

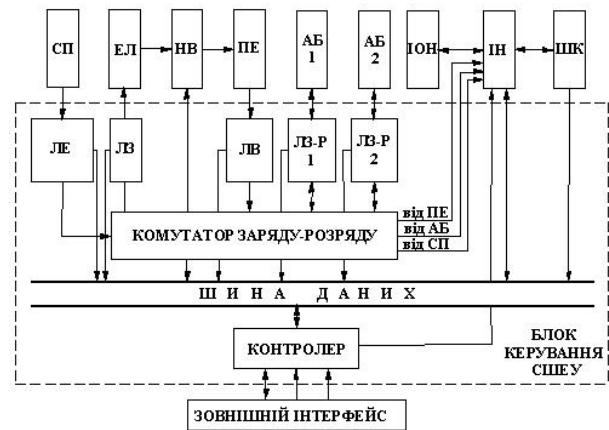


Рис. 5. Структурна схема сонячної шляхової енергоустановки (СШЕУ):

СП – сонячна панель; ЕЛ – електролізер; НВ – накопичувач водню; ПЕ – паливний елемент; АБ – акумуляторна батарея; ІОН – іоністор; ІН – інвертор; ШК – шляхова котушка; ЛЕ – лічильник електроенергії що надходить; ЛЗ – лічильник заряду; ЛВ – лічильник витрати; ЛЗ-Р – лічильник заряду-розряду

Fig. 5. Structural diagram of the solar track power plant:

СП – solar panel; ЕЛ – electrolyzer; НВ – hydrogen accumulator; ПЕ – fuel element; АБ – rechargeable battery; ІОН – ionistor; ІН – inverter; ШК – track coil; ЛЕ – incoming electricity meter; ЛЗ – charge counter; ЛВ – flow meter; ЛЗ-Р – charge-discharge counter

В узагальненому вигляді, з урахуванням енергонакопичувачів різних типів, призначених для різних часових інтервалів, структура сонячної шляхової енергоустановки наведена на рис. 5.

Подання на шляхові короткозамкнуті котушки на стоянці і на початку руху напруги постійного струму забезпечує режим статичної левітації екіпажа над шляховою структурою. Цей режим підвісу реалізується за принципом відштовхування полюсів одного знака шляхових та бортових електромагнітних котушок. Такий підвіс виникає за умови рівності ваги потяга та підйомної сили і має добру перевагу з точки зору стабільності.

Далі йде поступовий перехід від статичного режиму роботи шляхових котушок до динамічного – режиму біжного електромагнітного по-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ля, що забезпечує потягу поступовий характер руху. Цього можна досягти збільшенням у шляхових котушках змінної компоненти магнітного поля. Слід зазначити, що в маглев-технології перехід від колісного (механічного) підвісу до магнітного відбувається автоматично під час руху завдяки змінним струмам, що надходять до шляхових котушок та створюють змінні магнітні поля, за взаємодії яких із магнітними полями бортових електромагнітів формуються левітаційні сили, які в разі досягнення певних швидкостей (близько 80–100 км/год) достатні для левітаційного підйому поїзда. Під час створення змінного магнітного поля в шляхових котушках остаточний баланс повинен бути таким, щоб підйомна сила залишалась незмінною, а отже, і зазор між поверхнею шляхопроводу та нижньою частиною транспортного засобу, а це можливо в разі збільшення струму в котушках, що забезпечують левітацію.

Таким чином, створення за рахунок частини шляхових котушок біжного магнітного поля забезпечить початкове просування потяга, і водночас призведе до появи динамічної компоненти в результуючій підйомній силі, що дозволить додатково ще частину шляхових котушок перевести в режим просування за постійного автоматичного регулювання сили струму в левітаційних котушках. Швидкість при цьому збільшується, відповідно, зростає й динамічна складова сили левітації. Це відбуватиметься до тих пір, поки не буде досягнуто швидкості, яка повністю забезпечить динамічну левітацію потяга, після чого всі шляхові котушки працюватимуть як котушки лінійного двигуна, реалізуючи при цьому його динамічний підвіс завдяки взаємодії магнітних полів бортових надпровідних електромагнітів та магнітних полів, що надходять до короткозамкнутих котушок під час руху потяга. Поступовий перехід від статичного режиму підвісу до динамічного через перерозподіл енергетичних потоків, спрямованих на відповідні котушки, проілюстровано на рис. 6.

Використання сонячної шляхової енергетичної установки дозволяє створити систему індивідуального, незалежного, автономного керування кожною котушкою шляхової структури, уводячи її то в режим статичного функціонування з безперервним відстеженням і регулюванням сили струму в ній, то в режим змін-

ного біжного магнітного поля. Таке керування, крім забезпечення статичного підвісу на стоянках поїзда, дає можливість регулювати як збільшення, так і зменшення швидкості (розгін/гальмування) аж до зупинки. Індивідуальне керування кожною дискретною котушкою істотно відрізняється від керування лінійним синхронним тяговим електродвигуном і є новацією порівняно з традиційними методами.

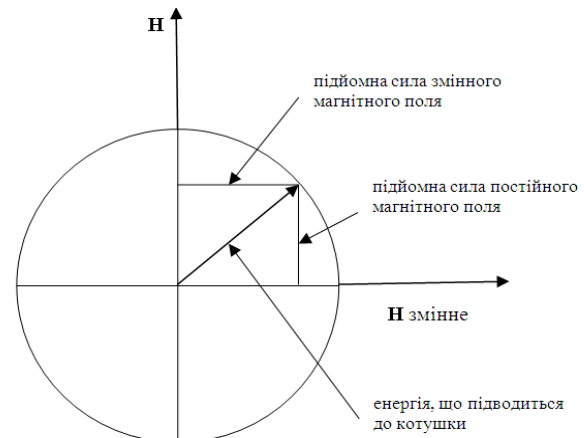


Рис. 6. Ілюстрація поступового переходу від статичного до динамічного режиму підвісу

Fig. 6. Illustration of gradual transition from static to dynamic suspension mode

Уявімо шляховий перегін у вигляді набору котушок, якими можна керувати індивідуально. Нехай довжина перегону дорівнює 50 км (рис. 7).

Кількість шляхових котушок на такому перегоні K_n дорівнює приблизно 20–30 тис. шт. Проте активно задіяними в русі будуть лише ті котушки, над якими в цей момент перебуває поїзд (насправді їх трохи більше з урахуванням невеликого запасу попереду та позаду поїзда для забезпечення безпеки руху). Якщо взяти довжину поїзда 40 м, то з урахуванням відстаней до і після поїзда це відповідає приблизно 40 активним котушкам.

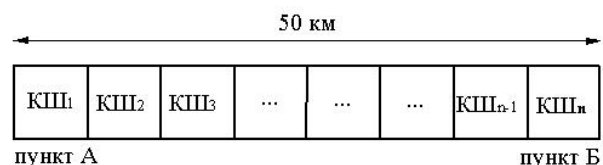


Рис. 7. Перегін у вигляді набору шляхових котушок

Fig. 7. Block in the form of a set of track coils

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На початку руху вся енергія шляхових котушок спрямована на створення статичної підйомної сили, тобто всі 40 котушок працюють як постійні електромагніти. Енергія, що надходить до котушок, повинна забезпечити на розгінній ділянці попередній магнітолевітаційний підвіс із зазором між екіпажем та шляховою структурою близько 5–10 мм. Далі, наприклад, кожна 10-а із 40 котушок переходить у режим змінного біжущого магнітного поля, і потяг починає рухатися. В інших 36 котушках зберігаються умови для статичного підвішування рухомого складу шляхом безперервного регулювання рівня струму. 4 котушки в режимі лінійного двигуна зсувають поїзд і тим самим забезпечують умови для виникнення в усіх котушках динамічної складової магнітолевітаційного підвісу, що враховано під час регулювання струму в котушках статичного підвісу. При цьому зменшується сумарне магнітне поле постійних магнітів (залишається 36 котушок, що працюють у режимі постійних магнітів). Переведення в режим проштовхування (propulsion) кожної восьмої (і так далі) котушки призводить до зростання швидкості, а отже, і зростання динамічної складової підвісу. У разі досягнення швидкості близько 80–100 км/год, коли динамічна складова магнітолевітаційної сили дорівнює вазі поїзда, усі котушки переходять у режим лінійного двигуна за одночасного забезпечення динамічного лінійного підвісу з його характерним зазором близько 100–150 мм.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано концепцію побудови комплексної системи керування рухом і підвісом магнітоплана. Основою значного поліпшення магнітолевітаційної технології є взаємоузгоджена комбінація двох способів магнітної левітації – електромагнітної та електродинамічної. Це можливо завдяки використанню принципово нової побудови маглев-траси. Замість довгих секцій із трифазними силовими обмотками слід використати дискретні короткі котушки, які одночасно є і тяговими котушками лінійного двигуна, і навантаженням розміщених уздовж шляхопроводу енергоустановок, що живляться від сонячних батарей.

Практична цінність роботи в тому, що в разі використання такої комплексної системи керу-

вання рухом та підвісом магнітоплана досягається значне поліпшення, збільшення ефективності та надійності високошвидкісного наземного транспорту на основі електродинамічної левітації із застосуванням надпровідних магнітів.

Висновки

Таким чином, у роботі обґрунтовано концепцію нової тягово-левітаційної системи (ТЛС) гібридного типу на основі сумісного синхронізованого використання електродинамічного й електромагнітного способів левітації. Суть цієї системи полягає в тому, що магнітолевітаційну підйомну силу як у режимі статички, так і в режимі динаміки створюють одні й ті ж дискретні шляхові котушки, які входять до складу статора лінійного синхронного електродвигуна, але працюють у різних режимах завдяки відповідному керуванню з використанням широтно-імпульсної модуляції. При цьому керування здійснюється шляхом швидкодіяного перемикавання між двома різними конфігураціями котушок. Таке різнопланове використання котушок можливе лише в результаті незалежного, індивідуального, автономного керування з єдиного центру кожною шляховою котушкою, що входить як навантаження до складу сонячної шляхової енергетичної установки, відповідно до поточних параметрів магнітолевітаційного підвісу та заданих режимів руху транспортного засобу (таких, як рух на підйом, розгін, гальмування).

Концепція керування полягає в тому, щоб кожна шляхова котушка могла брати участь як у створенні статичного підвісу за рахунок взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітного поля шляхових котушок під час подачі на них постійного струму певної величини, так і динамічного підвісу в процесі руху поїзда в результаті взаємодії магнітного поля бортового надпровідного магніту та магнітних полів, створюваних у шляхових котушках струмами, що знаходяться у них під час перетину магнітних полів бортового надпровідного магніту. При цьому розгін поїзда здійснюється переведенням частини колійних котушок у тяговий режим роботи у складі лінійного синхронного двигуна. В алгоритмі керування передбачено як типові, так і позаштатні (аварійні) режими функціонування високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту під час руху по перегоні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гришко В. Г., Фашевський А. В. *Високошвидкісний наземний транспорт* : курс лекцій для студентів вищих навчальних закладів залізничного транспорту. Київ : ДЕТУТ, 2014. 43 с.
2. Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Толдаев В. Г., Шкиль Ю. В. *Системы управления и энергообеспечения магнитолевитирующего транспорта*. Київ : Наукова думка, 2014. 276 с.
3. Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Шкиль Ю. В. Фотоэлектрическая система энергообеспечения линейного двигателя магнитолевитирующего высокоскоростного наземного транспорта. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2005. № 44. С. 121–136.
4. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Шкиль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>
5. Davydov A. Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology*. 2019. Vol. 5 (4). P. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst2019545-15>
6. De Oliveira, R. A. H., Stephan R. M., Ferreira A. C., Murta-Pina J. Design and Innovative Test of a Linear Induction Motor for Urban MagLev Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. Vol. 56. Iss. 6. P. 6949–6956. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023066>
7. Fritz E., Kluhspsies J., Kircher R., Witt M., Blow L. Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems : Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel Rail. *Transportation Systems and Technology*. Vol. 3. P. 134–155. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155>
8. Himanshu H. J. Super Maglev Trains. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*. 2020. Vol. 10. Iss. 10. P. 614–620. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.10.2020.p10678>
9. Kircher R., Palka R., Fritz E., Eiler K., Witt M., Blow L., Klühspies J. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems : Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board, Research Series*. 2018. Vol. 2. P. 1–19.
10. Wenk M., Klühspies J., Blow L., Kircher R., Fritz E., Witt M., Hekler M. *Maglev : Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. Germany : The International Maglev Board, 2018. 44 p.

A. M. MUKHA^{1*}, S. V. PLAKSIN^{2*}, L. M. POHORILA^{3*}, D. V. USTYMENKO^{4*},
Y. V. SHKIL^{5*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{3*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail plm@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-3718-0733

^{4*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{5*}Department of Control Systems in Vehicles, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail yvs@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-8684-5906

Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension

Purpose. The purpose of this work is the formation of conceptual approaches to the construction of an effective integrated system of simultaneous synchronized control of the movement and suspension of a maglev vehicle – a magnetoplane. **Methodology.** The paper uses a technique for simultaneous control of the movement and suspension of a maglev vehicle with the mutually coordinated application of both levitation methods, electromagnetic and electrodynamic, through individual control of the energy supply of each track coil. **Findings.** The conceptual control principles of a traction-levitation system in a hybrid mode of its operation are substantiated. The interaction of a track structure with a vehicle on an electrodynamic suspension with a linear drive is disclosed and the features of the implementation of the power unit are highlighted. **Originality.** It is shown that a significant improvement in maglev technology can be achieved due to the mutually coordinated combination of electromagnetic and electrodynamic methods of magnetic levitation and the use of a fundamentally different architecture for constructing a MAGLEV track. It is constructed not from long sections with three-phase power windings, but from discrete ones, they are also linear engine traction coils, and a component (load) of a solar track power plant located along the overpass. The power plant includes a photovoltaic module (solar battery) that converts solar energy into electricity, a storage device and an inverter. This construction makes possible independent supply of each travel coil and its autonomous control with the ability to switch to traction or levitation mode. The control concept is that each track coil can participate both in the creation of a static suspension due to the interaction of the magnetic field of the onboard superconducting magnet and the magnetic field of the track coils when a certain amount of direct current is applied to them, as well as the dynamic suspension provided during the train movement as a result of the interaction of the magnetic field of the onboard superconducting magnet and the magnetic fields created in the track coils by currents induced in them when the magnetic fields of the onboard superconducting magnet intersect. **Practical value.** The results are of practical value, as the use of such complex control system of the suspension and the magnetic plane movement will significantly improve the quality of MAGLEV technology, increase the efficiency and reliability of high-speed land transport based on electrodynamic levitation using superconducting magnets.

Keywords: magnetic levitation vehicle; electromagnetic levitation; electrodynamic levitation; traction-levitation system; complex movement and suspension control system

REFERENCES

1. Ghryshko, V. Gh., & Fashchevskyi, A. V. (2014). *Vysokoshvydkisnyi nazemnyi transport: kurs lektzii dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv zaliznychnoho transportu*. Kyiv: DETUT. (in Ukrainian)
2. Dzenzerskiy, V. A., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., Toldaev, V. G., & Shkil, Yu. V. (2014). *Sistemy upravleniya i energoobespecheniya magnitolevitiruyushchego transporta*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
3. Dzenzerskiy, V. A., Plaksin, S. V., & Shkil, Yu. V. (2005). *Vestnik NTU «KhPI»*, 44, 121-136. (in Russian)
4. Dzenzerskiy, V. A., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Yu. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress*, 1(73), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Russian)
5. Davydov, A. (2019). Monitoring of Changes in the Condition and Tendencies of Development of Maglev Transportation Systems. *Transportation Systems and Technology*, 5(4), 5-15. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst2019545-15> (in English)
6. De Oliveira, R. A. H., Stephan, R. M., Ferreira, A. C., & Murta-Pina, J. (2020) Design and Innovative Test of a Linear Induction Motor for Urban MagLev Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(6), 6949-6956. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3023066> (in English)
7. Fritz, E., Kluhsbies, J., Kircher, R., Witt, M., & Blow, L. (2019). Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *Transportation Systems and Technology*, 3, 134-155. DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst201843s1134-155> (in English)
8. Himanshu, H. J. (2020). Super Maglev Trains. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 10(10), 614-620. DOI: <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.10.2020.p10678> (in English)
9. Kircher, R., Palka, R., Fritz, E., Eiler, K., Witt, M., Blow, L., & Klühspies, J. (2018). Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board. Research Series*, 2, 1-19. (in English)

10. Wenk, M., Klühspies, J., Blow, L., Kircher, R., Fritz, E., Witt, M., & Hekler, M. (2018). *Maglev: Science Experiment or the Future of Transport? Practical Investigation of Future Perspectives and Limitations of Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail*. Germany: The International Maglev Board. (in English)

Надійшла до редколегії: 22.11.2021

Прийнята до друку: 21.03.2022

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 004.02:625.1

L. I. ZHUCHYI^{1*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technologies», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 96 59 236, e-mail larisa_zhuchiy@ukr.net, ORCID 0000-0002-9209-7262

Ontological Support for Harmonization and Integration of Ukrzaliznytsia Information Systems Data

Purpose. The development strategy of Ukrzaliznytsia includes the following areas: integration and standardization of information systems, increasing the truthfulness of data and automating business processes. The integration of railway information systems is possible by ontological means without changing their structure. In this work, the main aim is the analysis of existing transportation ontological developments and determination of approaches to the application of related domains developments to the objectives of Ukrzaliznytsia's development. **Methodology.** Ontological developments are systematized according to the type and format of their resources, the level of data integration, and the goals of ontology-based software. Methods of system analysis are used. **Findings.** The analysis showed that European Union railway transport ontologies are used to integrate infrastructure description data, train timetables, and others. At the same time, insufficient attention is paid to the regulatory support of the transportation process. There are software tools for annotating texts, extracting knowledge from tables and developing ontologies, but they are not used to support the Ukrainian railway transportation process. It has been determined that the actual problem is normative documentation annotation to establish a link between the ontology and the regulation texts. **Originality.** The basis for achieving the development goals of Ukrzaliznytsia by ontological means was laid, using the analysis and systematization of existing ontological developments of transport and related domains. The possibilities of using ontological means in railway transport are scientifically substantiated for: formalization of regulatory support; data transformations; data integration; checking the consistency of information systems data and regulations. **Practical value.** The work made it possible to identify the most significant ontological projects in transport. The foundations for the implementation of the conceptualization of the tabular representation of knowledge and the development of an ontology for the integration of models of railway subsystems have been laid.

Keywords: ontology; system analysis; railway; knowledge base; conceptualization

Introduction

Recently, the information systems of Ukrzaliznytsia (UZ) have undergone significant changes, such as the automation of many workplaces and their integration into the United Automated Management System of Freight Traffic of Ukrzaliznytsia (AMS FT UZ-U). However, due to the manual chain of data exchange and retrieval, errors may be made, which are detected by specialists of the relevant railway subsystems. Integration of information systems data and checking of their consistency with regulatory documents by ontolog-

ical means helps to improve the safety of train traffic.

It is shown that the ontological modelling of the railway infrastructure and related domains is widely used in European countries and can be used for the development of UZ information systems.

Purpose

The development strategy of UZ includes the following areas: integration and standardization of information systems, increasing the truthfulness of data and automating business processes. One of the ways for solving the tasks set is the integration of

railway information systems by ontological means without changing their structure.

In this work, the following tasks are solved:

- analysis of existing ontological developments in transport;
- determination of approaches to the application of developments in related domains to the objectives of the UZ development.

Methodology

Systematization of ontological developments was developed according to:

- purpose of their non-ontological resources for the development of the ontology schema (normative documents, standards and training materials);
- format of initial data (db, csv);
- level of data integration;
- the goals of ontology-based software.

Such methods of system analysis are used, as the input-process-output (IPO) model. The method of IPO systems for writing a literature review on Wikipedia is used in [4545]. In it, articles are grouped according to the criterion of describing the Wikipedia input and output data. The review [46] is devoted to transport ontologies.

Information systems of Ukrzaliznytsia.

According to [1], the information support of UZ includes the following systems:

- AMS FT UZ-U – the United Automated Management System of Freight Traffic of Ukrzaliznytsia;
- AMS PT UZ – Automated Management System for Passenger Transportation;
- AMSP – Automated Property Management System;
- AAS FOBOS – Automated accounting system of the structural subdivision of the railway.
- AWP A – The automated workplace of the Acceptor;
- AWP TD – The automated workplace of a train dispatcher;
- AS MESPLAN – an automated document management system for orders for the transportation of goods and the formation of plans;
- AS Client – an automated system for the formation of electronic transportation documents
- AMS ERPC – automated control system for the operation and repair of passenger cars.

According to [69], databases are siloed and fragmented.

Theoretical Foundations of Ontology Development.

There are various definitions and classifications of ontologies. According to Gruber, an ontology is an explicit specification of a conceptualization [37].

According to [16], «an ontology defines the common words and concepts (meanings) used to describe and represent an area of knowledge, and so standardizes the meanings. An ontology includes the following:

- classes (general things) in the many domains of interest;
- instances (particular things);
- relationships among those things;
- properties (and property values) of those things;
- functions of and processes involving those things;
- constraints on and rules involving those things».

Ontologies are classified as top-level ontologies, domain ontologies, task ontologies and application ontologies in [38], generic ontologies and specific ontologies in [43], upper ontology (generic common knowledge), middle ontology (domain-spanning knowledge), lower ontology (individual domains), the lowest ontology (subdomains) in [16]. Top-level ontologies and domain ontologies are related by a specialization relation [38].

Other classifications have heavyweight and lightweight ontologies.

Lightweight ontology is an ontology having inexpressive semantics, and a vocabulary, such as Good relations. Lightweight ontologies can be thesauri, such as AGROVOC (based on SKOS) and NCI Thesaurus.

«Heavyweight ontology is a lightweight ontology ... enriched with axioms» [33]. For example, in Cell ontology [53] and Collections Ontology [12] rules are presented in OWL as logical definitions and SWRL, respectively.

There are several complementary domain-independent ontology development methods: 101 [57], methontology [30], neon [73], extreme [64], generative mappings [71, 72], modular ontology development [41].

The methods differ in their granularity. Methontology [30] has general steps: conceptualization, formalization, implementation, and maintenance. 101 [57] has a more detailed (slightly modified) general process for ontology schema development, corresponding to the definition of an ontology [16]:

- enumerate important terms in the ontology;
- define the classes and the class hierarchy;
- define the properties of classes – slots;
- define the restrictions;
- define the rules;
- create instances.

Ontology conceptualization can be done using non-ontological resources [73] or patterns [64] to unify development by non-experts. Modular ontology development facilitates the maintenance and reuse of ontologies [41]. An example of a module is Error ontology [62] which is used in publishing workflow ontology [34] and collections ontology [14]. Where collections ontology [14] is a module of the Rail Core Ontology (RaCoOn) [76]. At the same time, modularity is one of the principles for developing the RaCoOn ontology [76], where, in addition to collections, the authors develop such modules as «Asset Management», «Rail Core» and others.

A feature of the development of an ontology class hierarchy is the need to exclude polyhierarchies due to their complex maintenance [66]. Instead of strong subclass relationships, logical definitions are developed, as in Cell ontology [53].

Upon completion of the development of the ontology, its testing is performed by SPARQL queries [64]. The transport ontology knowledge base can be queried to search for all railway stations [76], the number of trips starting in the zone at a certain time [47], and speed limits for a road segment [79].

Findings

Ontological developments are classified as those that make it possible to perform data integration, formalization of natural language texts, knowledge extraction from a tabular data representation, and consistency checking data and regulatory documents.

Formalization of regulatory and legal documentation by ontological means.

UZ development strategy [2] has the standardi-

zation of information systems, an integral part of which is the railway transportation regulatory and legal support. In UZ, for example, such standard tools already are used as the XML schema for the CIM/SMGS consignment note and the design of wagons in SolidWorks, which supports the Standard for Exchange of Product Model Data (STEP). It is planned to introduce such European standards as Infrastructure Register (RINF) [27], and Network Statement.

It should be noted that for the time being, railway regulations are not presented in a standard language based on logic. Regulation formalization is the process of transforming regulations texts into classes, relationships, restrictions, and if-then rules (Table 1). The input data are texts, and the output data is an ontology schema (or instances, as in [54, 11]). According to [73], the process of transforming a non-ontological resource is as follows:

- search for a suitable pattern for re-engineering non-ontological resources;
- use the pattern to guide the transformation;
- perform an ad-hoc transformation;
- manual refinement.

Where ontologydesignpatterns.org resource patterns are used for converting thesauri and classification schemes. At the ad-hoc transformation step, the universal process [57] can be applied.

Non-ontological instructional resources for conceptualization are normative documents [69], educational materials [28, 32], and standards [60, 76].

Standards are represented as railML XML schemas, UML Core Product Model [31], RailToPoModel and texts [27].

Table 1

Formalization of instructional materials in existing ontological developments

Input	Output
OSHA, 1926.706 Requirements for masonry construction	The Construction Safety Ontology [78]
IEEE Standard Classification for Software Anomalies	ontology of software defects, errors and failures [25]
ISO/IEC 11404:2007 – General Purpose Datatypes	Generic ontology of datatypes [60]

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Continuation of Table 1

Input	Output
European EN 12354-3:2000 standard Sound insulation of external noise	The IFC (Industry Foundation Classes) ontology, The construction element ontology [61]
ISO-10303 STandard for Exchange of Product Model Data	Onto STEP [49]
Network Statement [27]	Network Statement Checker Ontology [77]
ESC guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure	Heart Failure Ontology [44]
«Materials science and engineering: an introduction»	Functionally Graded Materials Ontology [32]
Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics	OntoMathPro [28]
Rules for the technical operation of Ukrainian railways	The base ontological model of AMS FT UZ-U [69]
The Core Product Model, The Open Assembly Model	Ontology for Assembly Representation [31]
railML [5]	Rail Core Ontology [76]
RailTopoModel	Rail Topology Ontology [7]

Depending on the type of constructs presented in the standard, they can be the basis for classes, relationships, etc., for example, classification schemes are the basis for the ontology class hierarchy, and text instructions may contain constructs that are the basis for the «if, then» rules. There are also high-level abstraction ontologies for representing any normative documents, like the Legal Knowledge Interchange Format ontology [42]. Of these, in transport, the formalization of standards is carried out in [7, 76, 77].

A network statement is a standard text document used to describe rail infrastructure in Europe. Instructions for its development contain a listing of the chapters of the Network Statement and their purpose. Network Statement Checker ontology

[77] allows one to build train routes on infrastructure with different characteristics located in different countries. The chapters of the standard are the basis of ontology classes (Fig. 1).

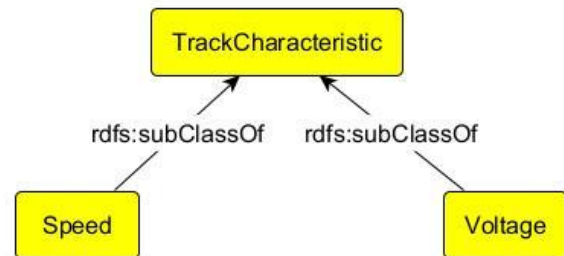


Fig. 1. Network Statement Checker ontology classes based on a text standard

RailTopoModel is a standard UML model for representing rail infrastructure based on a connectivity graph and the Rail Topology Ontology basis [7]. The UML has constructs for representing cardinality constraints that are the basis of OWL ontology class descriptions (Fig. 2). For example, the RailTopoModel contains a PositionedRelation class to represent the direction of travel on a railway track and has a restriction of 2 nodes (cardinality) associated with it.

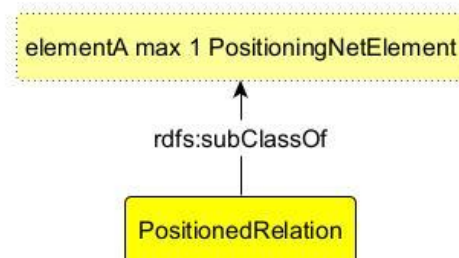


Fig. 2. Rail Topology Ontology restriction based on the UML format standard

Procedural knowledge (for example, the need to check the speed restriction of a warning issued to the driver) is presented in text instructions and formalized as logical definitions, relationship compositions and SWRL rules, for example, as in [78]. The construction Safety Ontology includes a rule (Fig. 3) to check the consistency of construction projects and regulations.

In transport the standards of the railway infrastructure are represented by ontological means in [7, 76, 77]. Using AMS FT UZ-U relational databases, the formalization of the transportation pro-

cess was performed. With its help, it is difficult to represent the rules of regulatory support, for example, «Train management rules». In related domains, standards representing procedural knowledge are formalized by ontological means [61, 78]. A possible further work is the formalization of railway regulations by ontological means, as in [69].

SWRL

```
Masonry_Wall(?mw) ^ hasHeight(?mw, ?h) ^
Task_Masonry_Wall(?act) ^ produce(?act, ?mw) ^
consistOf(?act, ?sub) ^Masonry_Operation(?sub) ^
consistOf(?sub, ?pb) ^ Placing_Brick(?pb) ^
swrlb:greaterThan(?h, 2438.4) →
needResources(?pb, Masonry_Wall_Bracing)
```

Fig. 3. The rule of The Construction Safety Ontology, based on a text standard

Knowledge extraction from the tabular presentation of transportation process data.

UZ development strategy [2] has business processes automation. In UZ, there are already systems such as «AS Client», where an electronic form is filled out for issuing a transportation document. There are still many technological processes that involve manual data extraction from heterogeneous documents, for example, the process of commissioning connection tracks. Profile calculation is performed in Excel, drawing – in AutoCAD, railway track characteristics can be stored in databases. Traction calculations for the development of train timetables are also performed in Excel.

The knowledge extraction process consists of two sub-processes: data wrangling and ontology population.

Data wrangling is the process of transforming data formats, such as from xls to RDF (Table 2). The transformation can be performed by various software tools, such as OpenRefine. The input data is the data and schema of the ontology, and the output data is the instances of the ontology.

The process is as follows:

- development of an ontology scheme;
- import of ontology and data files into the data wrangler (Cellfie, Ontop [9], OpenRefine, Karma [48]);
- annotating the contents of tables with ontology classes and relations;
- RDF data export.

Ontology population is the process of filling ontology with data from text [35] or tables [10]. During database transformation into instances, ontology is populated automatically using ports. If there are two files: an ontology schema and RDF data, ontology is populated using the owl:import construct in the schema file or both files into a new ontology file.

Table 2

Data wrangling in existing ontological developments

Data	Data wrangler
Tables https://covid19.who.int	Cellfie
Association of Train Operating Companies (ATOC)	OpenRefine
GTFS tables	Karma [48]
Smithsonian American Art Museum (SAAM) Database	
OpenStreetMap, LIDAR data, Yellow Pages and White Pages	
Tata Steel plant database	Ontop [9]
ArcGIS GFX datasets	
STEP Models	Onto STEP [49]

Depending on the format, Excel spreadsheet data is converted using the Protégé Cellfie plugin as in [26], databases – Protégé Ontop [9] as in [5, 47], STEP – Protégé OntoSTEP [49].

The drawing table data is extracted by Tabula into a CSV file. To convert such data into ontology instances, universal (compatible with various formats) software tools such as OpenRefine and Karma [4848] are used, as in [47, 74, 75].

Of these, on the transport, the data of the MCA (Common Interface File) format ATOC working timetables are converted into ontology instances to fill the ontology RaCoOn [76]. This format is typical for Network Rail's (infrastructure manager in Great Britain) Integrated Train Planning System and is difficult to work with, so in [76] it is converted to a relational database before being imported into OpenRefine. Fig. 4 shows an example of instances generated from the General Transit Feed Specification «stop times» table of the Irish Railways website transportforireland. These resources

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

are alike to ATOC in that the table also contains routes with stops and arrival/departure times.

In transport domain, ontological means is used to transform the train timetable data of the MCA format into ontology individuals [76]. Using «AS Client» data input of UZ transportation documents is automated. In related domains, ontological means are used to extract and transform data in db, csv, xls, and pdf formats. A possible future work is to increase the number of tasks for which data extraction is automated. The use of RDF standards will allow data consistency checking with normative documents and integrating data with others that have the same ontology scheme.

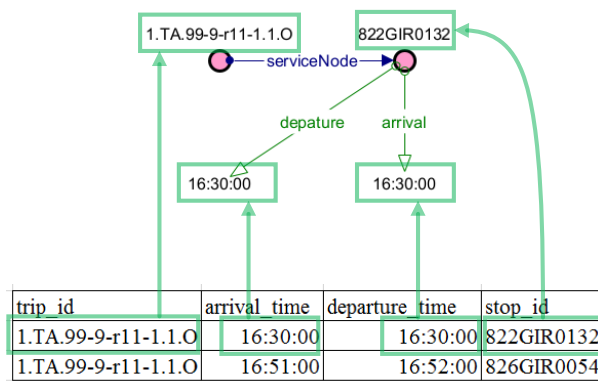


Fig. 4. Extraction of knowledge from the train schedule based on the RaCoOn ontology

Integration of disparate information systems by ontological means.

UZ development strategy [2] has information system integration. In UZ there is already the AMS FT UZ-U system, where integration is carried out by the exchange of electronic and telephone messages, based on a relational database. Information support remains fragmented and does not meet the requirements of its extensibility.

Data integration by ontological means is the process of filling an ontology with data from various sources to check their consistency (Table 3). The input data are various data sources (not necessarily heterogeneous), and the output is a logical conclusion about the consistency of the ontology. The process is as follows:

- development of an ontology scheme;
- conversion of data from several sources using a single scheme;
- importing data into the ontology using the owl mechanism: import if schema and data are

separate files, adding instances manually if development is done in Protégé, or programmatically if using java libraries owlapi, Jena, python libraries owlready.

– Data can be integrated within one or several enterprises. To integrate several enterprise data, the ontology must include a sufficient set of concepts. Ontologies like Steel cold rolling ontology [5] contain only concepts about metal, while ontologies like The Transport Disruption Ontology [15] – concepts for both transport and incidents, allow one to integrate two different data sets.

Of these, data integration in transport is carried out in [15, 47, 51, 76, 79], and corresponds to such UZ goals as meeting the needs of people with disabilities, and promoting domestic tourism. Transformation of open data published by UZ under the «Regulation on data sets to be made public in the form of open data» into linked open data as [23] for transport is substantiated in [63].

Table 3

Data integration in existing ontological developments

Data	Domain ontology
ATOC Working, timetable, Wheel Impact load Measurement	Rail Core Ontology [76]
wheel impact load measurement (WILM) systems and hot axle box detector (HABD)	Railway infrastructure ontology [51]
GTFS specification of vehicle routes, (2) reports on subway incidents, and (3) data on the real-time locations of transit vehicles	iCity [47]
Reports [on incidents] from transport authority, TransXChange bus services, the NaPTAN and NPTG access points to public transport	The transport disruption ontology [15]
Accessibility, incidents and infrastructure	Mobility and Accessibility Ontology (MAnto) [8]
Database tables the Roll, Roll Grinding, and Roll Storage tables	Steel cold rolling ontology [5]

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Continuation of Table 3

Data	Domain ontology
Museum Data	Europeana [23]
The Statute Staple, The Down Survey, The Books of Survey and Distribution, Dictionary of Irish Biography and the Oxford Dictionary of National Biography	Ontologies based on The Dictionary of Irish Biography, The Oxford Dictionary of National Biography [56]
GPS sensor data and speed limits of different roads	Map Ontology, Control Ontology, Car Ontology [79]
The Stanford Tissue Microarray Database, The Gene Expression Omnibus	N.C.I. Thesaurus [68]

iCity ontologies [47] of three levels of abstraction have been developed, as well as several prototype applications, including ones for studying traffic flows, as well as displaying roads and points of interest on a map. In the first case, GTFS specification of vehicle routes, (2) reports on subway incidents, and (3) data on the real-time locations of transit vehicles are mapped onto the ontology. The second application integrates Neighborhood, Land Use, Land Cover, Point of Interest, and Road Segment GFX datasets.

Fig. 5 shows a simplified data integration example similar to «Integration with ArcGIS» using iCity ontologies [47]. The figure is based on the iCity project [47] Public Transit Ontology and Location Ontology and the datasets vicroadsopendata «Bluetooth sites» and «Cycle routes». Data integration allows one to make SPARQL queries «how to get to a Bluetooth-equipped place on a bicycle».

ATOC Working Timetable and Wheel Impact Load Detector are integrated using the RaCoOn ontology [76] to determine the location of faulty trains on the map after data integration with OpenStreetMap. RaCoOn integrates British Railways data.

The integration of WILM and HABD is performed to determine the most urgent train repairs [51].

In [79], the integration of vehicle speed and speed limits map data is carried out by ontological means to detect speeding.

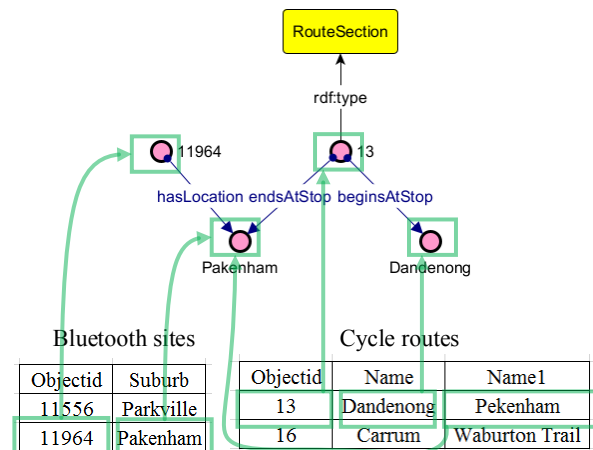


Fig. 5. Route and point of interest data integration based on iCity ontologies

Integration of information systems can be performed at the data level as in [5, 51] or the ontology level.

Ontology integration is the process of linking ontologies (Table 4). Ontologies are input and output. The process is as follows:

- development of an ontology scheme;
- bridging ontology (axioms) development to link it to some other ontology;
- import of the developed ontology, bridging ontology and some other ontology into a new ontology.

Integration is performed with the top-level ontology as in [40, 32], bridging ontology – [53], other relevant ontologies – [76], DBpedia – [28].

Table 4

Integration of ontologies in existing ontological developments

Other relevant ontologies	Domain ontology
Basic Formal Ontology [3]	Functionally Graded Materials Ontology [32]
DOLCE [24]	An ontology for software [58]
Information Artifact Ontology [12]	Ontology of Datatypes [60] Software ontology [52]
The Unified Foundational Ontology [39]	Software Process Ontology [40] Ontology of Software Defects, Errors and Failures [25]
UBERON [55]	Cell Ontology [53]

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Continuation of Table 4

Other relevant ontologies	Domain ontology
Good Relations	Linked-Open Tenders Electronic Daily LOTED2 [22]
Wikipedia	OntoMathPro [28]
Collection ontology [14]	Rail Core Ontology [76]
InteGRail ontology [65]	Network Statement Checker Ontology [77]
Basic Geo WGS84 ontology	The transport disruption ontology [15]
Toronto Virtual Enterprise [29]	iCity [47]
Error ontology [62]	Publishing Workflow Ontology [34]
	Collections Ontology [14]

Of these, on transport in [15, 47, 76, 77]. The route of the train is represented using Collections ontology [14], location of transport events and bus routes is represented using Basic Geo WGS84 ontology.

LOTE2 [22] and Good relations ontologies are integrated with a relations composition (Fig. 6) that allows one to represent service providers and customers in the public procurement domain.

In transport maps and train schedules [76], vehicle speed [79], equipment for disabled people [8], and other data are integrated using ontological means. UZ AMS FT UZ-U station, wagon, train and other models were integrated using relational databases. In related domains, domain enterprise ontologies representing clients [22] are integrated using ontological means. A possible further work is the development of ontological support for the integration of UZ data, as in [69].

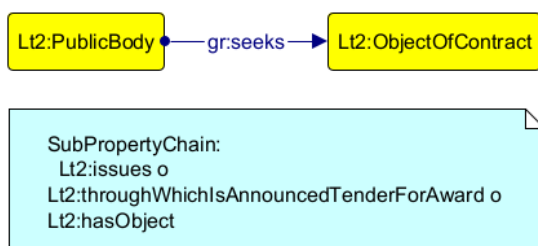


Fig. 6. Integration of LOTED2 and Good Relations ontologies

Checking the consistency of table data with regulatory documentation or a model by ontological means.

UZ development strategy [2] has the provision of structural units with reliable information. At UZ, each stage of data transfer is accompanied by a check by specialists. For example, when warnings are sent, they are checked against the speed limit warning book under the «guidelines for issuing warnings». When issuing a speed restriction, it is checked by the energy dispatcher for the sufficiency of measures to ensure safety under the «safety rules for the operation of the contact network and power supply devices for automatic blocking of railways».

Checks on the structure of data sources are to some extent automated in databases, but not in such spreadsheet and drawing programs used in UZ, such as AutoCAD.

Ontology consistency checking is the process of applying rules and constraints to data (Table 5). The input data is the ontology schema and data, and the output is an ontology that includes semantic control of the resource. The process is as follows:

- ontology vocabulary development;
- rules development – the second part of the ontology scheme;
- filling the ontology with instances;
- ontology consistency checking by a reasoner for OWL – Hermit, Pellet, for SWRL – Drools, for The Shapes Constraint Language (SHACL) – TopBraid SHACL API, etc.

Depending on the functional requirements (data transformation or data consistency check with regulations) of the software, resource or domain ontologies are used. For example, to formalize the standard, the Generic ontology of datatypes [60] was developed, and CSVW is used to describe the data resources.

To check the consistency of data and models, for example, ontologies were developed for analyzing the reliability of engines [50], for risk analysis of construction projects [21], for the publication process [34], for calculating performance indicators in transport (integration of the KPIONTO ontology [19] and the Transmodel model) [6], metal rolling [5], descriptions of statistical analysis in the biological domain [80].

Table 5
Data consistency checking in existing ontological developments

Way of the resource representation	Domain ontology
MappingMaster [59]	COvid-19 Ontology [26]
RDB to RDF Mapping Language (R2RML)	iCity [47]
JSON script	Rail Core Ontology [76]
R2RML	Geospatial ontology [75]
R2RML, Ontop	Steel cold rolling ontology [5]
R2RML, Ontop	iCity [47]
R2RML	SAAM ontology [74]
RDF Data Cube	Organization Ontology [36]
CSV on the Web (CSVW)	Function Ontology [13, 17]

The CSVW cardinality restriction is developed as a text «A table *must have one or more* columns and the order of the columns within the list is significant and must be preserved by applications» because it is an RDF schema, a lightweight ontology.

For lightweight ontologies like RDF Data Cube and GeoSPARQL, constraint packages [18, 36, 67] are being developed using SHACL and Shape expressions language (ShEx).

Consider an example of checking data consistency with the OBCS ontology model [80] using OWL. The cardinality constraint for the description of the class «one dimensional cartesian spatial coordinate datum» the presence of two values for the coordinate x in a rectangular coordinate system in the ontology is excluded (situation of Fig. 7).

In transport ontological means are used to check the consistency of the formulas for calculating performance indicators [6]. Specialists of the relevant UZ departments check the consistency of data and regulatory documents. In adjacent domains, ontological means check the consistency of data with regulations [78]. Possible further work on transport is to check the AMS FT UZ-U data for compliance with the normative documentation by ontological means, as in [69]. In the direction of

automated ontology population on railway transport – checking of the data resource structure using ontologies like [70].

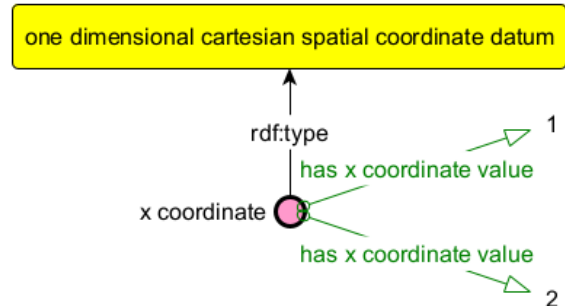


Fig. 7. Inconsistent OBCS ontology with two x-coordinate values

Discussion

The paper identifies aspects of existing ontological developments that are given insufficient attention: checking the data structure when it is transformed into ontology instances and checking the consistency of data with the transportation process regulations.

We have conceptualized the tabular representation of data sources, which makes it possible to check and integrate the table data developed in different software environments [70]. Unlike other studies, conceptualization allows modelling the full range of table-based data structures.

Ontologies of AMS FT UZ-U station, train, wagon and freight models have been developed, which makes it possible to integrate the AMS FT UZ-U models [69]. Unlike others, it allows one to check the consistency of the data and the railway regulations.

Originality and practical value

Originality. For the first time, the foundation was laid for achieving the development goals of Ukrzaliznytsia [2] by ontological means, using the analysis and systematization of existing transportation and related domain ontological developments.

The possibilities of using ontological means in railway transport are elicited for:

- formalization of regulatory support, which is confirmed by the works [7, 32, 47, 51, 78];
- data wrangling, which is confirmed by works [49, 74, 76];
- data integration, which is confirmed by works [23, 56, 76, 79];

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

– checking of consistency of information systems data and regulations, which is confirmed by works [19, 78, 80].

Practical value. The work made it possible to identify the most significant ontological works on transport. The foundations for the implementation of the conceptualization of the tabular representation of knowledge and the development of an ontology for the integration of railway subsystems models have been laid.

Conclusions

The analysis showed that ontologies in the railway transport of the European Union are used to integrate infrastructure description data, train

timetables, and others. At the same time, insufficient attention is paid to the transportation process regulatory support.

There are software tools for annotating texts, extracting knowledge from tables and developing ontologies, but they are not used to support the transportation process in the Ukrainian railway transport.

It has been determined that the actual problem is to annotate the normative documentation to establish a connection between the ontology and the regulation texts.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Овчарук І., Боклаг Є. Інформаційні системи на залізничному транспорті : розвиток та перспективи. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*. 2020. Т. 3, № 2. С. 170–182. DOI: <https://doi.org/10.31866/2617-796x.3.2.2020.220594>
2. *Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019–2023 роки*. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-4-Typography.pdf>
3. Arp R., Smith B., Spear A. D. *Building ontologies with basic formal ontology*. MIT Press, 2015. 248 p.
4. Asooja K., Bordea G., Vulcu G., O'Brien L., Espinoza A., Abi-Lahoud E., Butler T. Semantic annotation of finance regulatory text using multilabel classification. *LeDA-SWAn*. 2015. № 8. URL: <http://cs.unibo.it/ledaswan2015/papers/asooja-et-al-ledaswan2015.pdf>
5. Beden S., Cao Q., Beckmann A. SCRO : a domain ontology for describing steel cold rolling processes towards industry 4.0. *Information*. 2021. Vol. 12. Iss. 8. P. 304–322. DOI: <https://doi.org/10.3390/info12080304>
6. Benvenuti F., Diamantini C., Potena D., Storti E. An ontology-based framework to support performance monitoring in public transport systems. *Transportation research part C : emerging technologies*. 2017. Vol. 81. P. 188–208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.001>
7. 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
8. Caceres P., Sierra-Alonso A., Cuesta C. E., Vela B. Improving urban mobility by defining a smart data integration platform. *IEEE access*. 2020. Vol. 8. P. 204094–204113. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033584>
9. Calvanese D., Cogrel B., Komla-Ebri S., Lanti D., Rezk M., Xiao G. How to stay on top of your data : databases, ontologies and more. *The semantic web : ESWC 2015 satellite events*. Cham, 2015. P. 20–25. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25639-9_4
10. Calvanese D., Gal A., Haba N., Lanti D., Montali M., Mosca A., Shraga R. AdaMaP : automatic alignment of relational data sources using mapping patterns. *Advanced information systems engineering*. Cham, 2021. P. 193–209. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79382-1_12
11. Ceci M., Gangemi A. An OWL ontology library representing judicial interpretations. *Semantic web*. 2016. Vol. 7, № 3. P. 229–253. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-140146>
12. Ceusters W., Smith B. Aboutness : towards foundations for the information artifact ontology. *ICBO 2015*. 2015. P. 47–51.
13. Chaves-Fraga D., Pozo-Gilo L., Toledo J., Ruckhaus E., Corcho O. Morph-CSV : virtual knowledge graph access for tabular data. *Semantic Web*. Vol. 12, № 6. P. 869–902. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-210432>
14. Ciccarese P., Peroni S. The Collections Ontology : Creating and handling collections in OWL 2 DL frameworks. *Semantic web*. 2014. Vol. 5, № 6. P. 515–529. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-130121>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

15. Corsar D., Markovic M., Edwards P., Nelson J. D. The transport disruption ontology. *The semantic web – ISWC 2015*. Cham, 2015. P. 329–336. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25010-6_22
16. Daconta M. C., Obrst L., Smith K. T. *Semantic web : A guide to the future of XML, web services, and knowledge man*. Wiley, 2003. 312 p.
17. De Meester B., Seymoens T., Dimou A., Verborgh R. Implementation-independent function reuse. *Future generation computer systems*. 2020. Vol. 110. P. 946–959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.006>
18. Debruyne C., McGlinn K. Reusable SHACL constraint components for validating geospatial linked data. *Proceedings of the 4th international workshop of geospatial linked data*. 2021. P. 1–7.
19. Diamantini C., Potena D., Storti E. SemPI : a semantic framework for the collaborative construction and maintenance of a shared dictionary of performance indicators. *Future generation computer systems*. 2016. Vol. 54. P. 352–365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.04.011>
20. Diamantopoulos T., Roth M., Symeonidis A., Klein E. Software requirements as an application domain for natural language processing. *Language resources and evaluation*. 2017. Vol. 51. P. 495–524. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10579-017-9381-z>
21. Ding L. Y., Zhong B. T., Wu S., Luo H. B. Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology. *Safety science*. 2016. Vol. 87. P. 202–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.04.008>
22. Distinto I., d'Aquin M., Motta E. LOTED2 : An ontology of European public procurement notices. *Semantic web*. 2016. Vol. 7, № 3. P. 267–293. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-140151>
23. Doerr M., Gradmann S., Hennicke S., Isaac A., Meghini C., Van de Sompel H. The europeana data model. *World Library and Information Congress : 76th Ifla general Conference and Assembly*. 2010. URL: <https://www.ifla.org/past-wlic/2010/149-doerr-en.pdf>
24. DOLCE : descriptive ontology for linguistic and cognitive engineering. URL: <http://www.loa.istc.cnr.it/dolce/overview.html>
25. Duarte B. B., Falbo R. A., Guizzardi G., Guizzardi R. S., Souza V. E. Towards an ontology of software defects, errors and failures. *Conceptual modeling*. Springer, Cham, 2018. P. 349–362. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00847-5_25
26. Dutta B., DeBellis M. CODO : an ontology for collection and analysis of covid-19 data. *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management – KEOD* (Budapest, 2–4 Nov. 2020). Budapest, 2020. P. 76–85. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010112500760085>
27. EIM RINF. URL: <https://eimrail.org/document/rinf/>
28. Elizarov A. M., Lipachev E. K., Nevzorova O. A., Solov'ev V. D. Methods and means for semantic structuring of electronic mathematical documents. *Doklady mathematics*. 2014. Vol. 90. P. 521–524. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1064562414050275>
29. Enterprise Integration Laboratory – EIL. URL: <http://www.eil.utoronto.ca/theory/enterprise-modelling/tove/>
30. Fernández-López M., Gomez-Pérez A., Juristo N. Methontology : from ontological art towards ontological engineering. *AAAI Technical Report SS-97-06*. Compilation copyright, 1997. P. 24–26.
31. Fiorentini X., Gambino I., Liang V. C., Rachuri S., Mani M., Nistir C. B., Turner J. M. *An ontology for assembly representation*. Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2007. 78 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/nist.ir.7436>
32. Furini F., Rai R., Smith B., Colombo G., Krovi V. Development of a manufacturing ontology for functionally graded materials. *ASME 2016 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference* (Charlotte, 21–24 August 2016). Charlotte, North Carolina, USA, 2016. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1115/detc2016-59964>
33. Fürst F., Trichet F. Heavy ontology engineering. *On the move to meaningful internet systems : OTM Confed-erate International Conferences* (Heidelberg, 1 Oct. 2006). Berlin, Heidelberg. P. 38–39.
34. Gangemi A., Peroni S., Shotton D., Vitali F. The publishing workflow ontology (PWO). *Semantic web*. 2017. Vol. 8, № 5. P. 703–718. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-160230>
35. Ganino G., Lembo D., Mecella M., Scafoglieri F. Ontology population for open-source intelligence : A GATE-based solution. *Software : practice and experience*. 2018. Vol. 48, № 12. P. 2302–2330. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.2640>
36. Gayo J. E. L., Prud'hommeaux E., Solbrig H. R., Boneva I. Validating and describing linked data portals using shapes. *arXiv:1701.08924*. 2017. P. 1–13.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

37. Gruber T. R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*. 1993. Vol. 5. Iss. 2. P. 199–220. DOI: <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
38. Guarino N. Semantic matching : formal ontological distinctions for information organization, extraction, and integration. *Information Extraction A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology*. 1997. P. 139–170. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-63438-x_8
39. Guizzardi G. *Ontological foundations for structural conceptual models* : doctoral dissertation. Bolzano, 2005. 441 p. URL: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6042428/thesis_Guizzardi.pdf
40. Guizzardi G., de Almeida Falbo R., Guizzardi R. S. Grounding software domain ontologies in the unified foundational ontology. *Conference : Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Software Engineering (CIBSE 2008)* (Recife, 11 Feb. 2008). Recife, Pernambuco, Brasil, 2008. P. 127–140.
41. Hitzler P., Krisnadhi A. Modular ontology modeling: a tutorial. *Applications and practices in ontology design, extraction, and reasoning*. 2020. P. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.3233/ssw200032>
42. Hoekstra R., Breuker J., Di Bello M., Boer A. The LKIF core ontology of basic legal concepts. *Loait*. 2007. № 321. P. 43–63. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-321/LOAIT07-Proceedings.pdf#page=43>
43. Jakus G., Milutinovic V., Omerovic S., Tomazic S. Concepts, ontologies, and knowledge representation. New York, NY, 2013. P. 5–27. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7822-5_2
44. Jovic A., Gamberger D., Krstacic G. Heart failure ontology. *Bio Algorithms Med Syst*. 2011. Vol. 2, № 7. P. 101–110.
45. Jullien N. What we know about wikipedia : a review of the literature analyzing the project(s). *SSRN electronic journal*. 2012. P. 1–87. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2053597>
46. Katsumi M., Fox M. Ontologies for transportation research: a survey. *Transportation research part C : emerging technologies*. 2018. Vol. 89. P. 53–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.023>
47. Katsumi M., Fox M. *City transportation planning suite of ontologies*. Toronto : University of Toronto, 2020. 154 p. URL: https://enterpriseintegrationlab.github.io/icity/iCityOntologyReport_1.2.pdf
48. Knoblock C. A., Szekely P. Exploiting semantics for big data integration. *AI magazine*. 2015. Vol. 36, № 1. P. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.1609/aimag.v36i1.2565>
49. Krima S., Barbau R., Fiorentini X., Sudarsan R., Sriram, R. D. *OntoSTEP : OWL-DL ontology for step*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2009. 34 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/nist.ir.7561>
50. Lališ A., Bolčerková S., Štumbauer O. Ontology-based reliability analysis of aircraft engine lubrication system. *Transportation research procedia*. 2020. Vol. 51. P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.006>
51. Lewis R. *A semantic approach to railway data integration and decision support : Electronic Thesis or Dissertation* : doctoral dissertation. University of Birmingham, 2015. 300 p.
52. Malone J., Brown A., Lister A. L., Ison, J., Hull, D., Parkinson, H., Stevens, R. The Software Ontology (SWO) : a resource for reproducibility in biomedical data analysis, curation and digital preservation. *Journal of bio-medical semantics*. 2014. Vol. 5, № 25. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1186/2041-1480-5-25>
53. Meehan T. F., Masci A. M., Abdulla A., Cowell L. G., Blake J. A., Mungall C. J., Diehl A. D. Logical development of the cell ontology. *BMC bioinformatics*. 2011. Vol. 12, № 6. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-6>
54. Mourontsev D. I., Shilin I. A., Pliukhin D. A., Baimuratov I. R., Rezeda R. K. Building knowledge graphs of regulatory documentation based on semantic modeling and automatic term extraction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2021. Vol. 21, № 2. P. 256–266. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-256-266>
55. Mungall C. J., Torniai C., Gkoutos G. V., Lewis S. E., Haendel M. A. Uberon, an integrative multi-species anatomy ontology. *Genome biology*. 2012. Vol. 13, № R5. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1186/gb-2012-13-1-r5>
56. Munnelly G. *Entity Linking for Text Based Digital Cultural Heritage Collections* : doctoral dissertation. Dublin, 2020. 194 p.
57. Noy N. F., McGuinness D. L. *Ontology development 101 : a guide to creating your first ontology*. Stanford, 2001. 25 p. URL: https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf
58. Oberle D., Grimm S., Staab S. An ontology for software. *Handbook on ontologies : International Handbooks on Information Systems (INFOSYS)*. Berlin, Heidelberg, 2009. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 383–402.
59. O'Connor M. J., Halaschek-Wiener C., Musen M. A. Mapping master: A flexible approach for mapping spreadsheets to OWL. *Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg, 2010. P. 194–208. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17749-1_13

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

60. Panov P., Soldatova L. N., Džeroski S. Generic ontology of datatypes. *Information sciences*. 2016. Vol. 329. P. 900–920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.08.006>
61. Pauwels P., Van Deursen D., Verstraeten R., De Roo J., De Meyer R., Van de Walle R., Van Campenhout J. A semantic rule checking environment for building performance checking. *Automation in construction*. 2011. Vol. 20. Iss. 5. P. 506–518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.017>
62. Peroni S. *The Error Ontology Making constraints on ontology resources*. 2010. URL: <https://sparontologies.github.io/error/current/error.html>
63. Plu J., Scharffe F. Publishing and linking transport data on the web. *WOD '12 : Proceedings of the First International Workshop* (Nantes, 25 May 2012). New York, USA, 2012. P. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.1145/2422604.2422614>
64. Presutti V., Daga E., Gangemi A., Blomqvist E. eXtreme design with content ontology design patterns. *WOP'09: Proceedings of the 2009 International Conference* (Washington, 25 Oct. 2009). Washington, USA, 2009. P. 83–97.
65. *Railway domain ontology*. URL: <http://www.integrail.eu/documents/fs02.pdf>
66. Rector A., Aranguren M. E. *Submissions : Normalization*. URL: <http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Submissions:Normalization>
67. Roman D., Alexiev V., Paniagua J., Elvesæter B., von Zernichow B. M., Soylu A., Taggart C. The euBusinessGraph ontology : a lightweight ontology for harmonizing basic company information. *Semantic web*. 2021. Vol. 13, № 1. P. 41–68. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-210424>
68. Shah N. H., Jonquet C., Chiang A. P., Butte A. J., Chen R., Musen M. A. Ontology-driven indexing of public datasets for translational bioinformatics. *BMC bioinformatics*. 2009. Vol. 10, № s1. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-s2-s1>
69. Shynkarenko V., Zhuchyi L. Ontological Harmonization of Railway Transport Information Systems. *COLINS-2021 : 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems* (Aachen, 22–23 April 2021). Aachen, Germany, 2021. Vol. 2870. P. 541–554.
70. Shynkarenko V., Zhuchyi L., Ivanov O. Conceptualization of the tabular representation of knowledge. *2021 IEEE 16th international conference on computer sciences and information technologies (CSIT)* (Lviv, 22–25 Sep. 2021). Lviv, Ukraine, 2021. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648761>
71. Skalozub V., Ilman V., Shynkarenko V. Development of ontological support of constructive-synthesizing modeling of information systems. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 6, № 4 (90). P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119497>
72. Skalozub V., Ilman V., Shynkarenko V. Ontological support formation for constructive-synthesizing modeling of information systems development processes. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 5, № 4 (95). P. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143968>
73. Suárez-Figueroa M. C., Gómez-Pérez A., Fernández-López M. The neon methodology for ontology engineering. *Ontology engineering in a networked world*. Berlin, Heidelberg, 2011. P. 9–34. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-24794-1_2
74. Szekely P., Knoblock C. A., Gupta S., Taheriyani M., Wu B. Connecting the smithsonian american art museum to the linked data cloud. *The semantic web : semantics and big data*. Berlin, Heidelberg, 2013. P. 593–607. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-38288-8_40
75. Szekely P., Knoblock C. A., Yang F., Zhu X., Fink E. E., Allen R., Goodlander G. Exploiting semantics of web services for geospatial data fusion. *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Spatial Semantics and Ontologies – SSO '11* (Chicago, 1 Nov. 2011). New York, USA, 2011. P. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.1145/2068976.2068981>
76. Tutchter J. *Development of semantic data models to support data interoperability in the rail industry* : Thesis or Dissertation. University of Birmingham, 2016. 355 p. URL: <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6774/>
77. Verstichel S., Ongenaes F., Loeve L., Vermeulen F., Dings P., Dhoedt B., De Turck F. Efficient data integration in the railway domain through an ontology-based methodology. *Transportation research part C : emerging technologies*. 2011. Vol. 19. Iss. 4. P. 617–643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.10.003>
78. Zhang S., Boukamp F., Teizer J. Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). *Automation in construction*. 2015. Vol. 52. P. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.005>
79. Zhao L., Ichise R., Mita S., Sasaki Y. An ontology-based intelligent speed adaptation system for autonomous cars. *Semantic technology*. Cham, 2015. P. 397–413. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15615-6_30

80. Zheng J., Harris M. R., Masci A. M., Lin Y., Hero A., Smith B., He Y. The Ontology of Biological and Clinical Statistics (OBCS) for standardized and reproducible statistical analysis. *Journal of biomedical semantics*. 2016. Vol. 7, № 53. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13326-016-0100-2>

Л. І. ЖУЧИЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 96 59 236, ел. пошта larisa_zhuchiy@ukr.net, ORCID 0000-0002-9209-7262

Онтологічна підтримка узгодження та інтеграції даних інформаційних систем АТ «Укрзалізниця»

Мета. Стратегія розвитку АТ «Укрзалізниця» передбачає такі напрями: інтеграція та стандартизація інформаційних систем, підвищення достовірності даних та автоматизація бізнес-процесів. Інтеграція інформаційних систем залізниці можлива онтологічними засобами без зміни їхньої структури. У цій роботі поставлено за основну мету проаналізувати наявні онтологічні розробки на транспорті та визначити підходи до застосування розробок суміжних галузей для задач розвитку АТ «Укрзалізниця». **Методика.** Виконано систематизацію онтологічних розробок відповідно до типу та формату їх ресурсів, рівня інтеграції даних, цілей програмного забезпечення, заснованого на онтології. Використано методи системного аналізу. **Результати.** Аналіз показав, що онтології на залізничному транспорті Євросоюзу використовують для інтеграції даних опису інфраструктури, розкладу поїздів тощо. Водночас недостатньо уваги приділяють нормативному забезпеченню перевізного процесу. Існують програмні засоби для анотування текстів, отримання знань із таблиць та розробки онтологій, але їх не застосовують для підтримки перевізного процесу на залізничному транспорті України. Визначено, що актуальним завданням є анотування нормативної документації для встановлення зв'язку між онтологією та текстами інструкцій. **Наукова новизна.** Закладено основу для досягнення цілей розвитку АТ «Укрзалізниця» онтологічними засобами, із застосуванням аналізу та систематизації наявних онтологічних розробок транспортної та суміжних галузей. Науково обґрунтовано можливості використання на залізничному транспорті онтологічних засобів для: формалізації нормативного забезпечення; перетворення даних; інтеграції даних; перевірки узгодженості даних інформаційних систем та інструкцій. **Практична значимість.** Робота дозволила виявити найважливіші онтологічні проекти на транспорті. Закладено основи для концептуалізації табличного представлення знань та розробки онтології для інтеграції моделей підсистем залізниці.

Ключові слова: онтологія; системний аналіз; залізниця; база знань; концептуалізація

REFERENCES

1. Ovcharuk, I., & Boklah, Y. (2020). Information Systems in Rail Transport: Development and Prospects. *Digital platform: information technologies in the sociocultural sphere*, 3(2), 170-182. DOI: <https://doi.org/10.31866/2617-796x.3.2.2020.220594> (in Ukrainian)
2. *Strategy of JSC Ukrzaliznytsia for 2019-2023*. Retrieved from <https://www.uz.gov.ua/files/file/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%96%D1%8F-4-Typography.pdf> (in Ukraine)
3. Arp, R., Smith, B., & Spear, A. D. (2015). *Building ontologies with basic formal ontology*. Mit Press. (in English)
4. Asooja, K., Bordea, G., Vulcu, G., O'Brien, L., Espinoza, A., Abi-Lahoud, E., & Butler, T. (2015). Semantic annotation of finance regulatory text using multilabel classification. *LeDA-SWAN*, 8. Retrieved from <http://cs.unibo.it/ledaswan2015/papers/asooja-et-al-ledaswan2015.pdf> (in English)
5. Beden, S., Cao, Q., & Beckmann, A. (2021). SCRO: A Domain Ontology for Describing Steel Cold Rolling Processes towards Industry 4.0. *Information*, 12(8), 304-322. DOI: <https://doi.org/10.3390/info12080304> (in English)
6. Benvenuti, F., Diamantini, C., Potena, D., & Storti, E. (2017). An ontology-based framework to support performance monitoring in public transport systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 81, 188-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.001> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

7. Bischof, S., & Schenner, G. (2021, September). Rail Topology Ontology: A Rail Infrastructure Base Ontology. In *The semantic web – ISWC 2021* (pp. 597-612). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88361-4_35 (in English)
8. Caceres, P., Sierra-Alonso, A., Cuesta, C. E., & Vela, B. (2020). Improving urban mobility by defining a smart data integration platform. In *IEEE Access* (Vol. 8, pp. 204094-204113). DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033584> (in English)
9. Calvanese, D., Cogrel, B., Komla-Ebri, S., Lanti, D., Rezk, M., & Xiao, G. (2015). How to stay on top of your data: Databases, ontologies and more. In *The semantic web: ESWC 2015 satellite events* (pp. 20-25). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25639-9_4 (in English)
10. Calvanese, D., Gal, A., Haba, N., Lanti, D., Montali, M., Mosca, A., & Šhraga, R. (2021, June). ADaMaP: Automatic Alignment of Relational Data Sources Using Mapping Patterns. In *Advanced information systems engineering* (pp. 193-209). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79382-1_12 (in English)
11. Ceci, M., & Gangemi, A. (2016). An OWL ontology library representing judicial interpretations. *Semantic Web*, 7(3), 229-253. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-140146> (in English)
12. Ceusters, W., & Smith, B. (2015). Aboutness: Towards foundations for the information artifact ontology. *ICBO 2015* (pp. 47-51). Lisbon, Portugal. (in English)
13. Chaves-Fraga, D., Pozo-Gilo, L., Toledo, J., Ruckhaus, E., & Corcho, O. (2020). Morph-CSV: Virtual Knowledge Graph Access for Tabular Data. *Semantic Web*, 12(6), 869-902. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-210432> (in English)
14. Ciccicarese, P., & Peroni, S. (2014). The Collections Ontology: creating and handling collections in OWL 2 DL frameworks. *Semantic Web*, 5(6), 515-529. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-130121> (in English)
15. Corsar, D., Markovic, M., Edwards, P., & Nelson, J. D. (2015). The transport disruption ontology. In *The semantic web – ISWC 2015* (pp. 329-336). Springer, Cham. (in English)
16. Daconta, M. C., Obrst, L. J., & Smith, K. T. (2003). *The Semantic Web: a guide to the future of XML, Web services, and knowledge management*. Wiley. (in English)
17. De Meester, B., Seymoens, T., Dimou, A., & Verborgh, R. (2020). Implementation-independent function reuse. *Future Generation Computer Systems*, 110, 946-959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.006> (in English)
18. Debruyne, C., & McGlinn, K. (2021). Reusable SHACL Constraint Components for Validating Geospatial Linked Data. In *Proceedings of the 4th International Workshop of Geospatial Linked Data* (pp. 1-7). (in English)
19. Diamantini, C., Potena, D., & Storti, E. (2016). SemPI: A semantic framework for the collaborative construction and maintenance of a shared dictionary of performance indicators. *Future Generation Computer Systems*, 54, 352-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.04.011> (in English)
20. Diamantopoulos, T., Roth, M., Symeonidis, A., & Klein, E. (2017). Software requirements as an application domain for natural language processing. *Language Resources and Evaluation*, 51, 495-524. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10579-017-9381-z> (in English)
21. Ding, L. Y., Zhong, B. T., Wu, S., & Luo, H. B. (2016). Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology. *Safety science*, 87, 202-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.04.008> (in English)
22. Distinto, I., d'Aquin, M., & Motta, E. (2016). LOTED2: An ontology of European public procurement notices. *Semantic Web*, 7(3), 267-293. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-140151> (in English)
23. Doerr, M., Gradmann, S., Hennicke, S., Isaac, A., Meghini, C., & Van de Sompel, H. (2010). The europeana data model. *World Library and Information Congress: 76th IFLA general conference and assembly*. Retrieved from <https://www.ifla.org/past-wlic/2010/149-doerr-en.pdf> (in English)
24. DOLCE: Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering. Retrieved from <http://www.loa.istc.cnr.it/dolce/overview.html> (in English)
25. Duarte, B. B., Falbo, R. A., Guizzardi, G., Guizzardi, R. S., & Souza, V. E. (2018). Towards an ontology of software defects, errors and failures. In *Conceptual Modeling* (pp. 349-362). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00847-5_25 (in English)
26. Dutta, B., & DeBellis, M. (2020). CODO: an ontology for collection and analysis of COVID-19 data. In *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management-KEOD* (pp. 76-85). Budapest, Hungary. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010112500760085> (in English)

27. *EIM RINF*. Retrieved from <https://eimrail.org/document/rinf/> (in English)
28. Elizarov, A. M., Lipachev, E. K., Nevzorova, O. A., & Solov'ev, V. D. (2014). Methods and means for semantic structuring of electronic mathematical documents. *Doklady Mathematics*, 90, 521-524. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1064562414050275> (in English)
29. *Enterprise Integration Laboratory-EIL*. Retrieved from <http://www.eil.utoronto.ca/theory/enterprise-modelling/tove/> (in English)
30. Fernández-López, M., Gomez-Pérez, A., & Juristo, N. (1997). Methontology: from ontological art towards *ontological engineering*. *AAAI Technical Report SS-97-06* (pp. 24-26). Compilation copyright. (in English)
31. Fiorentini, X., Gambino, I., Liang, V. C., Rachuri, S., Mani, M., Nistir, C. B., & Turner, J. M. (2007). *An ontology for assembly representation*. Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology. DOI: <https://doi.org/10.6028/nist.ir.7436> (in English)
32. Furini, F., Rai, R., Smith, B., Colombo, G., & Krovi, V. (2016). Development of a manufacturing ontology for functionally graded materials. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 1-11). Charlotte, North Carolina, USA. DOI: <https://doi.org/10.1115/detc2016-59964> (in English)
33. Fürst, F., & Trichet, F. (2006). Heavy ontology engineering. In *On the move to meaningful internet systems : OTM Confederation International Conferences* (pp. 38-39). Berlin, Heidelberg. (in English)
34. Gangemi, A., Peroni, S., Shotton, D., & Vitali, F. (2017). The publishing workflow ontology (PWO). *Semantic Web*, 8(5), 703-718. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-160230> (in English)
35. Ganino, G., Lembo, D., Mecella, M., & Scafoglieri, F. (2018). Ontology population for open-source intelligence: A GATE-based solution. *Software: Practice and Experience*, 48(12), 2302-2330. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.2640> (in English)
36. Gayo, J. E. L., Prud'hommeaux, E., Solbrig, H. R., & Boneva, I. (2017). Validating and describing linked data portals using shapes. *arXiv:1701.08924*, 1-13. (in English)
37. Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*, 5(2), 199-220. DOI: <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008> (in English)
38. Guarino, N. (1997). Semantic matching: Formal ontological distinctions for information organization, extraction, and integration. *Information Extraction A Multidisciplinary Approach to an Emerging Information Technology* (pp. 139-170). DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-63438-x_8 (in English)
39. Guizzardi, G. (2005). *Ontological foundations for structural conceptual models* (PhD dissertation). Retrieved from https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6042428/thesis_Guizzardi.pdf (in English)
40. Guizzardi, G., de Almeida Falbo, R., & Guizzardi, RS (2008). Grounding software domain ontologies in the unified foundational ontology. In *Conference: Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Software Engineering (CibSE 2008)* (pp. 127-140). Recife, Pernambuco, Brasil. (in English)
41. Hitzler, P., & Krisnadhi, A. (2018). Modular ontology modeling: a tutorial. *Applications and practices in ontology design, extraction, and reasoning* (pp. 3-20). DOI: <https://doi.org/10.3233/ssw200032> (in English)
42. Hoekstra, R., Breuker, J., Di Bello, M., & Boer, A. (2007). The LKIF Core Ontology of Basic Legal Concepts. *Loait*, 321, 43-63. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-321/LOAIT07-Proceedings.pdf#page=43> (in English)
43. Jakus, G., Milutinovic, V., Omerovic, S., & Tomazic, S. (2013). Concepts. *Concepts, ontologies, and knowledge representations* (pp. 5-27). DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7822-5_4 (in English)
44. Jovic, A., Gamberger, D., & Krstacic, G. (2011). Heart failure ontology. *Bio Algorithms Med Syst*, 7(2), 101-110. (in English)
45. Julien, N. (2012). What We Know About Wikipedia: A Review of the Literature Analyzing the Project(s). *SSRN electronic journal*, 1-87. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2053597> (in English)
46. Katsumi, M., & Fox, M. (2018). Ontologies for transportation research: a survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89, 53-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.023> (in English)
47. Katsumi, M., & Fox, M. (2020). *City Transportation Planning Suite of Ontologies*. Toronto: University of Toronto. (in English)
48. 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)
49. Krima, S., Barbau, R., Fiorentini, X., Sudarsan, R., & Sriram, R. D. (2009). *Ontostep: OWL-DL ontology for step*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology. DOI: <https://doi.org/10.6028/nist.ir.7561> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

50. Lališ, A., Bolčková, S., & Štumbauer, O. (2020). Ontology-based reliability analysis of aircraft engine lubrication system. *Transportation Research Procedia*, 51, 37–45.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.006> (in English)
51. Lewis, R. (2015). *A semantic approach to railway data integration and decision support* (PhD dissertation). University of Birmingham. (in English)
52. Malone, J., Brown, A., Lister, A. L., Ison, J., Hull, D., Parkinson, H., & Stevens, R. (2014). The Software Ontology (SWO): a resource for reproducibility in biomedical data analysis, curation and digital preservation. *Journal of biomedical semantics*, 5(25), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1186/2041-1480-5-25> (in English)
53. Meehan, T. F., Masci, A. M., Abdulla, A., Cowell, L. G., Blake, J. A., Mungall, C. J., & Diehl, A. D. (2011). Logical development of the cell ontology. *BMC bioinformatics*, 12(6), 1–12.
DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-6> (in English)
54. Mouromtsev, D. I., Shilin, I. A., Pliukhin, D. A., Baimuratov, I. R., & Rezeda, R. K. (2021). Building knowledge graphs of regulatory documentation based on semantic modeling and automatic term extraction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 132(2), 256–266.
DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-256-266> (in English)
55. Mungall, C. J., Torniai, C., Gkoutos, G. V., Lewis, S. E., & Haendel, M. A. (2012). Uberon, an integrative multi-species anatomy ontology. *Genome biology*, 13(R5), 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1186/gb-2012-13-1-r5> (in English)
56. Munnelly, G. (2020). *Entity Linking for Text Based Digital Cultural Heritage Collections* (PhD dissertation). Dublin. (in English)
57. Noy, N. F., & McGuinness, D. L. (2001). *Ontology development 101: A guide to creating your first ontology*. Stanford. Retrieved from https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf (in English)
58. Oberle, D., Grimm, S., & Staab, S. (2009). An ontology for software. In *Handbook on ontologies: International Handbooks on Information Systems (INFOSYS)* (pp. 383–402). Springer, Berlin, Heidelberg. (in English)
59. O'connor, M. J., Halaschek-Wiener, C., & Musen, M. A. (2010). Mapping master: a flexible approach for mapping spreadsheets to OWL. In *Lecture notes in computer science* (pp. 194–208). Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17749-1_13 (in English)
60. Panov, P., Soldatova, L. N., & Džeroski, S. (2016). Generic ontology of datatypes. *Information Sciences*, 329, 900–920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.08.006> (in English)
61. Pauwels, P., Van Deursen, D., Verstraeten, R., De Roo, J., De Meyer, R., Van de Walle, R., & Van Campenhout, J. (2011). A semantic rule checking environment for building performance checking. *Automation in construction*, 20(5), 506–518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.017> (in English)
62. Peroni, S. (2010). *The Error Ontology Making constraints on ontology resources*. Retrieved from <https://sparontologies.github.io/error/current/error.html> (in English)
63. Plu, J., & Scharffe, F. (2012). Publishing and linking transport data on the web. In *WOD '12 : Proceedings of the First International Workshop* (pp. 62–69). New York, USA. DOI: <https://doi.org/10.1145/2422604.2422614> (in English)
64. Presutti, V., Daga, E., Gangemi, A., & Blomqvist, E. (2009, October). eXtreme design with content ontology design patterns. In *WOP'09: Proceedings of the 2009 International Conference* (pp. 83–97). Washington, USA. (in English)
65. *Railway Domain Ontology*. Retrieved from <http://www.integrail.eu/documents/fs02.pdf> (in English)
66. Rector, A., & Aranguren, M. E. (2003). *Submissions: Normalization* Retrieved from <http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Submissions:Normalization> (in English)
67. Roman, D., Alexiev, V., Paniagua, J., Elvesæter, B., von Zernichow, B. M., Soylu, A., & Taggart, C. (2022). The euBusinessGraph ontology: A lightweight ontology for harmonizing basic company information. *Semantic Web*, 13(1), 41–68. DOI: <https://doi.org/10.3233/sw-210424> (in English)
68. Shah, N. H., Jonquet, C., Chiang, A. P., Butte, A. J., Chen, R., & Musen, M. A. (2009). Ontology-driven indexing of public datasets for translational bioinformatics. *BMC bioinformatics* 10(s1), 1–10.
DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-s2-s1> (in English)
69. Shynkarenko, V., & Zhuchyi, L. (2021). Ontological Harmonization of Railway Transport Information Systems. In *COLINS-2021: 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems* (Vol. 2870, pp. 541–554). Aachen, Germany. (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

70. 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 (CSIT)* (pp. 248-251). Lviv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648761> (in English)
71. Skalozub, V., Ilman, V., & Shynkarenko, V. (2017). Development of ontological support of constructive-synthesizing modeling of information systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4(90)), 58-69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119497> (in English)
72. Skalozub, V., Ilman, V., & Shynkarenko, V. (2018). Ontological support formation for constructive-synthesizing modeling of information systems development processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4(95)), 55-63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143968> (in English)
73. Suárez-Figueroa, M. C., Gomez-Pérez, A., & Fernández-López, M. (2012). The neon methodology for ontology engineering. *Ontology engineering in a networked world* (pp. 9-34). Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-24794-1_2 (in English)
74. Szekely, P., Knoblock, C. A., Gupta, S., Taherian, M., & Wu, B. (2011). Exploiting semantics of web services for geospatial data fusion. *The semantic web: semantics and big data* (pp. 593-607). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-38288-8_40 (in English)
75. Szekely, P., Knoblock, C. A., Yang, F., Zhu, X., Fink, E. E., Allen, R., & Goodlander, G. (2013). Exploiting semantics of web services for geospatial data fusion. In *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Spatial Semantics and Ontologies-SSO '11* (pp. 32-39). New York, USA. DOI: <https://doi.org/10.1145/2068976.2068981> (in English)
76. Tutchter, J. (2016). *Development of semantic data models to support data interoperability in the rail industry* (PhD dissertation). University of Birmingham. Retrieved from <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6774/> (in English)
77. Verstichel, S., Ongena, F., Loeve, L., Vermeulen, F., Dings, P., Dhoedt, B., & De Turck, F. (2011). Efficient data integration in the railway domain through an ontology-based methodology. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 617-643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.10.003> (in English)
78. Zhang, S., Boukamp, F., & Teizer, J. (2015). Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA). *Automation in Construction*, 52, 29-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.005> (in English)
79. Zhao, L., Ichise, R., Mita, S., & Sasaki, Y. (2014). An ontology-based intelligent speed adaptation system for autonomous cars. *Semantic technology* (pp. 397-413). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15615-6_30 (in English)
80. Zheng, J., Harris, M. R., Masci, A. M., Lin, Y., Hero, A., Smith, B., & He, Y. (2016). The Ontology of Biological and Clinical Statistics (OBCS) for standardized and reproducible statistical analysis. *Journal of Biomedical Semantics*, 7(53), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13326-016-0100-2> (in English)

Received: November 22, 2021

Accepted: March 21, 2022

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 004.9:621.313.2

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, С. В. АРПУЛЬ^{2*}, В. Є. ВАСИЛЬЄВ^{3*}, О. О. ГОЛОЛОВА^{4*},
С. М. ГОЛІК^{5*}

^{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 afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{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 arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{3*}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

^{4*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

^{5*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 904 51 46, ел. пошта diit-ers@ukr.net, ORCID 0000-0002-7697-3832

Автоматизовані системи керування взаємним навантаженням тягових електромашин

Мета. Проведення випробувань електричних машин повинно бути максимально об'єктивним і нести достовірну інформацію про якість виготовлення або ремонту електричної машини. Під час випробувань змінюються параметри сумарної потужності джерел випробного стенда, енергетична ефективність кожного процесу випробування, розбіжності теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження. Для виконання повного обсягу випробування електричної машини необхідно обладнати випробні стенди системами автоматичного керування процесом взаємного навантаження. У зв'язку з цим у нашій роботі передбачено провести аналіз різних варіантів виконання систем автоматичного керування. **Методика.** Проведено теоретичні дослідження електромагнітних процесів із використанням математичної моделі системи «джерело напруги – тяговий двигун», яка дозволяє визначити енергетичні показники електричних машин у всьому діапазоні зміни навантажень і напруги під час випробувань. Для аналізу використано методи теоретичного дослідження й аналітичного розрахунку електричних кіл, теоретичних основ електротехніки, математичного моделювання електричних та енергетичних процесів. **Результати.** Виконано аналіз раціональних варіантів побудови функціональних схем систем автоматичного керування з різною кількістю джерел живлення, контурів автоматичного керування, механічними та електричними перетворювачами потужності. Імітаційне математичне моделювання електромагнітних процесів у випробному стенді електричних машин дозволило визначити електричні навантаження елементів силового кола двигунів. Розроблено раціональні функціональні схеми систем автоматичного керування для випробування різноманітних колекторних електричних машин постійного та пульсуючого струму. **Наукова новизна.** Запропоновано раціональні варіанти побудови випробних стендів з електричними й механічними перетворювачами моменту, що враховують змінні процеси навантаження електричних машин під час випробування. Виконано аналіз енергетичної ефективності різних варіантів побудови стендів для випробування електричних машин у всьому діапазоні зміни випробних навантажень і напруги джерел живлення в разі використання автоматичної системи керування процесом взаємного навантаження. **Практична значимість.** Проведені дослідження дозволять розробити рекомендації щодо проектування автоматизованих систем керування випробними стендами для поліпшення їх техніко-економічних характеристик, зменшення витрат електричної енергії під час випробувань.

Ключові слова: система автоматичного регулювання; напруга; баланс напруг; навантаження; взаємне навантаження; струм навантаження; функціональна схема; обмотка збудження; тягова електромашина; випробування електромашин

Вступ

Надійність тягового рухомого складу й ефективність його використання є визначальними умовами ритмічної та стійкої роботи залізничного транспорту.

У зв'язку зі збільшенням обсягів перевезень і підвищенням інтенсивності експлуатації зростають вимоги до експлуатаційної надійності тягового рухомого складу. Найважливішою умовою ефективної експлуатації електрорухомого складу є забезпечення надійної роботи одного з основних його вузлів – тягового двигуна. У сучасних економічних умовах підвищення надійності роботи локомотивів, які перебувають в експлуатації, здійснюють за рахунок підвищення якості випробування найбільш відповідальних вузлів і деталей, упровадження сучасних технологій діагностування.

Основні експлуатаційні характеристики колекторних машин постійного струму, у тому числі й тягових двигунів рухомого складу, значною мірою визначаються їх комутаційною стійкістю. Вирішення цієї задачі неможливе без глибоких теоретичних та експериментальних досліджень в галузі комутації, що дозволяють з'ясувати причини виникнення іскріння під щітками колекторних машин у різних режимах їх роботи і сформулювати заходи з їх усунення. Відомо значна кількість технічних пропозицій, які розробляють не тільки в Україні, але й за кордоном [11–13].

Підвищити якість функціонування тягових електродвигунів в експлуатації можна шляхом удосконалення систем технічного обслуговування під час проведення діагностичних заходів на випробних стендах із метою більш об'єктивного й достовірного контролю технічного стану відповідальних деталей і вузлів.

Відомо, що на комутаційну стійкість впливають відхилення конструкційних і технологічних параметрів електромагнітної та механічної природи, від яких залежить якість випробування тягових електродвигунів. Для таких досліджень необхідно сформулювати й проаналізувати різні варіанти випробних стендів, які повинні містити системи автоматичного керування режимами взаємного навантаження.

Аналіз окремих систем автоматичного керування для їх використання у складі випробних

стендів дозволить оцінити технічний стан тягових електродвигунів на основі поєднання аналогової та цифрової електронної техніки, а також створення спеціальної методики й розрахункових програм обробки діагностичної інформації для досягнення максимальної достовірності випробувань. За такого підходу діагностування тягових двигунів на випробних стендах взаємного навантаження та контроль їх працездатності будуть задовольняти вимоги доступності виміру, достовірності результатів виміру, інформативності й розрізняльної здатності.

Мета

Основною метою нашої роботи є вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму шляхом обґрунтування нових принципів визначення раціональних схем і режимів їх навантаження, що забезпечують зниження сумарної потужності джерел живлення випробної станції, підвищення енергетичної ефективності, як цього вимагають державні закони та постанови [4–9].

Методика

Показники надійності електричної машини як сукупності її властивостей, що обумовлюють здатність задовольняти визначені потреби відповідно до призначення, оцінюють кількісно. Найбільш розповсюдженими показниками надійності є: імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, параметр потоку відмов, напруження на відмову, ресурс, термін служби, імовірність відновлення.

У стандартах на електричні машини сформульовано технічні вимоги до показників їх якості. Більшість із цих вимог потребує перевірки шляхом випробування електричних машин [10]. До них належать: вимоги до надійності, нагрівання, енергетичних показників, а також вимоги до електричної міцності ізоляції обмоток, механічної міцності обертових частин машини, експлуатаційних показників (таких, як максимальний, початковий пусковий і мінімальний моменти, початковий пусковий струм, швидкість наростання напруги та ін.), вимоги до роботи щіткового вузла колекторних машин, здатності витримувати перевантаження, до шумів і вібрацій, індустриальних радіоперешкод.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За всіма переліченими, а також за рядом інших вимог до якості електричних машин у стандартах встановлено кількісні показники, а в деяких випадках допуски на них. Під час випробувань перевіряють відповідність вимірних чи розрахованих показників якості вимогам стандартів.

Для досягнення поставленої мети необхідно мати автоматичну систему керування процесом випробування електричних машин.

У роботі було використано такі методи дослідження: математичне моделювання електромагнітних процесів у силових колах тягових двигунів і випробного обладнання (автоматичних системах керування) шляхом чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь, що описують процеси в електричних колах, магнітних колах, а також аналогових і дискретних елементах систем керування; аналіз розподілу струмів і напруг за елементами схеми та визначення енергетичних показників електроенергії.

Результати

Методика визначення раціональних альтернатив, застосована в [2], не враховує особливостей конструкцій і типових параметрів тягових електромашин, які можуть впливати на принципальну можливість використання того чи іншого варіанта системи взаємного навантаження під час проведення випробувань конкретного типу тягових електромашин.

Проаналізуємо кожне із раціональних варіантів, щоб з'ясувати можливості його технічної реалізації для окремих кластерів типового ряду тягових електромашин.

Варіант 1. Схема цього варіанта наведена на рис. 1.

Схема містить джерело напруги ДН, випробовувані тягові електромашини М і G та регулятор ослаблення поля РОП. Характеристики керівних параметрів, що відповідають режиму взаємного навантаження електромашин за цим варіантом, мають вигляд:

$$\begin{cases} U_D > 0; \\ \Phi_D > \Phi_G; \\ \Delta\Phi = \Phi_D - \Phi_G. \end{cases} \quad (1)$$

де U_D – напруга джерела живлення, В; Φ_D – магнітний потік двигуна, Вб; Φ_G – магнітний потік генератора, Вб.

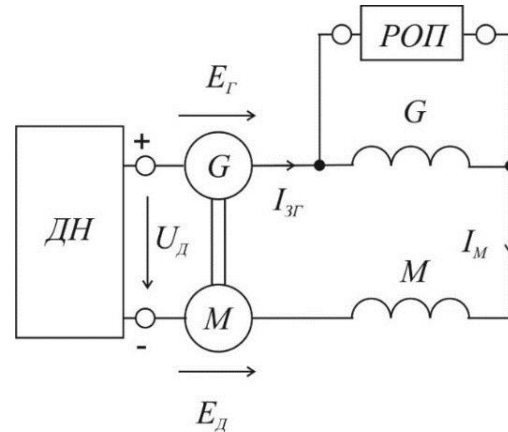


Рис. 1. Раціональний варіант 1

Fig. 1. Rational variant 1

Система рівнянь балансу напруги та механічних моментів для цих варіантів має вигляд:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_D - C \Delta \Phi \omega_o; \\ \sum \Delta M = C \Delta \Phi i. \end{cases} \quad (2)$$

де C – конструктивний коефіцієнт тягового двигуна; $\Delta\Phi$ – різниця магнітних потоків двигуна і генератора, Вб; ω_o – частота обертання, об/хв; i – струм, А.

Діаграми, що характеризують баланс напруги в колі якорів у разі зміни струму навантаження випробовуваних електромашин, якісно відповідають універсальним діаграмам, наведеним на рис. 2.

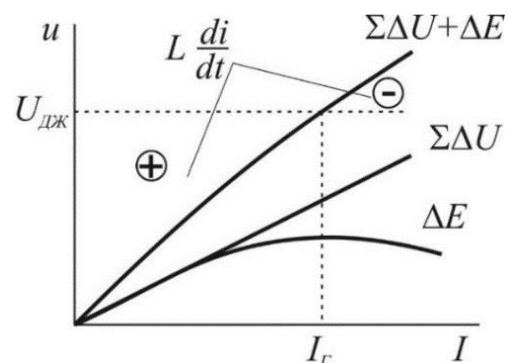


Рис. 2. Діаграми балансу напруг

Fig. 2. Voltage balance diagrams

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Перевагами цієї схеми є:

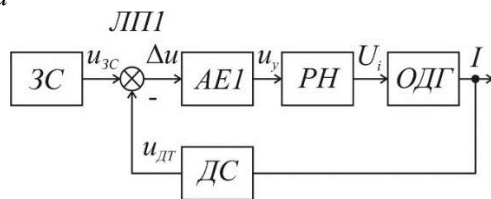
- наявність лише одного джерела потужності;
- відсутність джерел високої напруги;
- однакове теплове навантаження обмоток якорів.

До недоліків цієї схеми належать:

- розбіжність теплових навантажень обмоток збудження;
- необхідність у системі автоматичного регулювання.

Система автоматичного керування режимом взаємного навантаження має бути двоконтурною [1]. Перший контур повинен забезпечувати стабілізацію струму навантаження, а другий – стабілізацію частоти обертання. Структурна схема системи автоматичного керування [3] представлена на рис. 3.

a – a



б – б

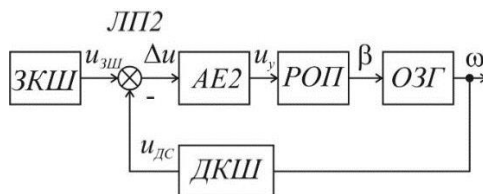


Рис. 3. Функціональна схема системи автоматичного регулювання для варіанта 1

Fig. 3. Functional diagram of the automatic control system for variant 1

Перший контур автоматичного регулювання (рис. 3, *a*) містить: задатчик струму ЗС, датчик струму ДС, ланку порівняння струмів ЛП1, астатичний елемент АЕ1, регулятор напруги РН, обмотки двигуна і генератора ОДГ.

Другий контур автоматичного регулювання (рис. 3, *б*) містить: задатчик кутової швидкості ЗКШ, датчик кутової швидкості ДКШ, ланку порівняння ЛП2, астатичний елемент АЕ2, регулятор ослаблення поля РОП, обмотку збудження генератора ОЗГ.

Цей варіант є раціональним для всіх типів тягових електричних двигунів та допоміжних машин.

Варіант 2. Головною особливістю цього варіанта є наявність механічного конвертора. Регулювання режиму взаємного навантаження в цій схемі здійснюється за рахунок зміни напруги джерела та передавального відношення механічного конвертора. Для цього останній має бути виконаний варіатором, що регулюється. Схему системи взаємного навантаження наведено на рис. 4. Схема містить джерело напруги ДН, випробовувані тягові електромашини М і G, механічний варіатор В і регулятор ослаблення поля РОП.

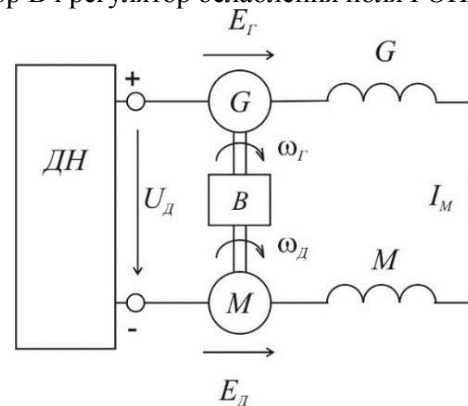


Рис. 4. Раціональний варіант 2

Fig. 4. Rational variant 2

Характеристики керівних параметрів, що відповідають режиму взаємного навантаження електромашин за варіантом АІ, мають вигляд:

$$\begin{cases} U_d > 0; \\ K_\omega < 1; \\ K_M > 1. \end{cases} \quad (3)$$

де K_ω – коефіцієнт передавального відношення варіатора; K_M – коефіцієнт механічного конвертора.

Система рівнянь балансу напруги та механічних моментів для цього варіанта має вигляд:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_d - C\Phi\omega_d(1 - K_\omega) \\ \sum \Delta M = C\Phi i(K_M - 1) \end{cases}, \quad (4)$$

де ω_d – частота обертання валу двигуна, що випробовується, об/хв.

Діаграми, що характеризують баланс напруги в колі якорів у разі зміни струму навантаження випробовуваних електромашин, якісно

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

відповідають універсальним діаграмам, наведених на рис. 2.

Перевагами цієї схеми є:

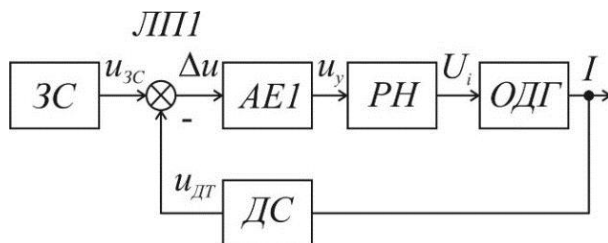
- одне джерело електричної потужності;
- відсутність джерела високої напруги;
- однакове теплове навантаження обмоток якорів та обмоток збудження пари випробовуваних електромашин.

До недоліків схеми належать:

- відносна складність регулювання передавального відношення варіатора;
- необхідність у системі автоматичного керування.

Функціональна схема системи автоматичного регулювання варіанта 2 наведена на рис. 5.

a – a



б – б

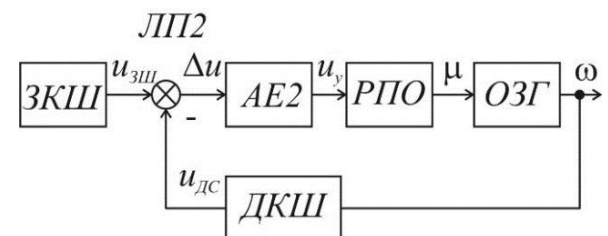


Рис. 5. Функціональна схема системи автоматичного регулювання для варіанта 2

Fig. 5. Functional diagram of the automatic control system for variant 2

Виконання варіаторів із великою потужністю, що відповідає реальній потужності тягових двигунів рухомого складу магістрального та промислового транспорту, надто складне, у зв'язку з чим ця схема є раціональною лише для допоміжних електромашин.

Перший контур системи (рис. 5, *a*) аналогічний контуру стабілізації струму за варіантом 1. Другий контур (рис. 5, *б*) відрізняється від варіанта 1 наявністю регулятора передавального відношення РПВ (замість регулятора ослаблення

поля РОП), який з'єднаний із валами двигуна та генератора ВДГ.

Варіант 3. Головною особливістю цієї схеми, як і схеми за варіантом 2, є наявність перетворювача механічного моменту, що визначає його основні недоліки, пов'язані з труднощами застосування для тягових електромашин великої та середньої потужності. Вирішити цю проблему можна за рахунок створення гібридної схеми, що містить елементи варіанта 1. Така схема наведена на рис. 6

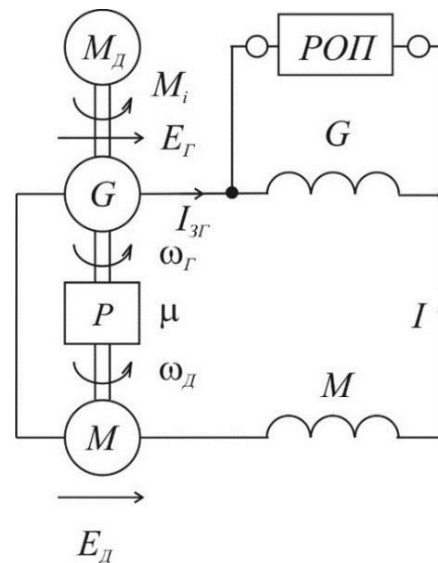


Рис. 6. Раціональний варіант 3

Fig. 6. Rational variant 3

Схема містить додатковий привідний двигун МД, випробовувані електромашини М і Г, постійний редуктор Р, регулятор ослаблення поля РОП.

Система рівнянь балансу напруги та механічних моментів для цього варіанта має вигляд:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C \Phi_D \omega_D (K_\omega - 1); \\ \sum \Delta M = M_D - C \Phi_G i (1 - K_M). \end{cases} \quad (5)$$

де Φ_D – магнітний потік двигуна, Вб; M_D – момент на валу двигуна, Н·м.

Діаграми, що характеризують баланс напруги в колі якорів у разі зміни струму навантаження випробовуваних електромашин, якісно відповідають універсальним діаграмам, наведеним на рис. 7.

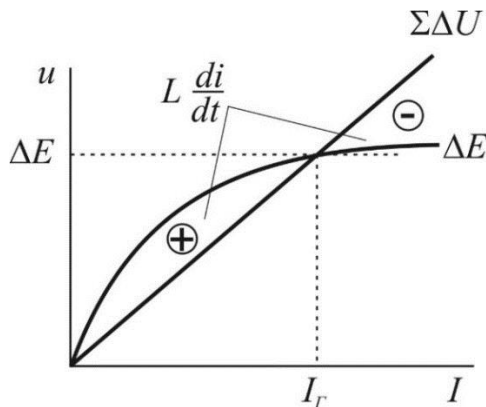


Рис. 7. Діаграми балансу напруг

Fig. 7. Voltage balance diagrams

До переваг цієї схеми належить:

- одне джерело механічної потужності;
- відсутність джерел високої напруги;
- однакове теплове навантаження обмоток якоря;
- мала розбіжність теплових навантажень обмоток збудження.

Недоліками схеми є такі:

- наявність регулятора та перетворювача;
- необхідність у системі автоматичного регулювання;
- необхідність у коробці передач.

Функціональну схему системи автоматичного регулювання струму наведено на рис. 8.

Передавальне число (постійне) механічного редуктора P підбирають таким, щоб за максимально можливої розбіжності магнітних характеристик випробовуваних електромашин небалансна е.р.с. ΔE в разі вимкненого РОП забезпечувала максимальний струм навантаження I . Ця схема є найбільш раціональною для тягових двигунів електропоїздів та тепловозів.

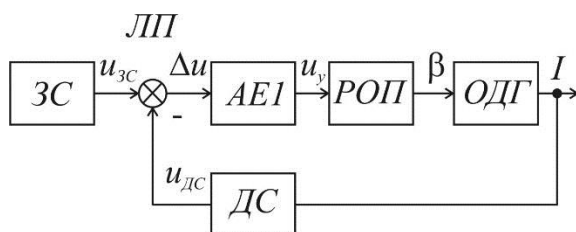


Рис. 8. Функціональна схема контуру регулювання струму для варіанта 3

Fig. 8. Functional diagram of the current control circuit for variant 3

Наукова новизна та практична значимість

У роботі формалізовано загальні енергетичні та електромеханічні принципи взаємного навантаження електричних машин постійного струму, які подані у вигляді умови компенсації втрат потужності у взаємно навантажених електромашинах, множини умов протікання струму навантаження та множини умов обертання роторів, що дозволило визначити повний ряд можливих схемних рішень системи взаємного навантаження електричних машин постійного та пульсуючого струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту. Отримали подальший розвиток і вдосконалення систематизація та класифікація систем взаємного навантаження тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму, в основу яких покладено як енергетичні, так і електромеханічні принципи взаємного навантаження, що дозволило збільшити кількість ознак розбиття множини альтернатив під час вирішення задачі вибору раціональних схем навантаження випробовуваних електромашин. Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили:

- визначити раціональні схеми систем взаємного навантаження, використання яких забезпечує зниження собівартості нових та матеріальні витрати на модернізацію наявних станцій для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту в 1,5 – 2 рази;

- визначити раціональні режими взаємного навантаження тягових електричних машин, що дозволяють зменшити витрати електроенергії на проведення їх випробувань на нагрів на 20–30 % та скоротити час проведення випробувань на нагрів у 3 – 4 рази;

- розробити функціональні рішення систем автоматичного керування стендами для випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму, виконаних за раціональними електромеханічними схемами.

Висновки

З погляду мінімум наведеної сумарної потужності джерел, максимум енергетичної ефективності, мінімум розбіжності теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження, а також із точки зору можливості виконання

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

програми прийнятно-здавальних випробувань тягових електромашин найбільш раціональними є варіанти системи взаємного навантаження 1, 2 і 3.

Варіант 1 є раціональним для випробування всіх типів тягових електродвигунів та допоміжних електромашин.

Варіант 2 є раціональним для випробування допоміжних електромашин.

Варіант 3 є найбільш раціональним для випробувань тягових електродвигунів моторвагонного рухомого складу та тепловозів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Білухін Д. С., Шемет А. Я., Васильєв В. Є., Гололобова О. О., Маркуль Р. В. Використання глибокого послаблення збудження для тягових двигунів магістральних електровозів. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6 (96). С. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258106>
2. 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>
3. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ) [Действителен от 2017-03-01]. Киев : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 50 с.
4. Закон України Про енергетичну ефективність. Документ 1818-IX [Чинний від 2021-10-21]. Законодавство України / ВР України. URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-IX#Text>
5. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2006 р. № 651-2006-р. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/651-2006-p#Text>
6. Проект Концепції Державної цільової економічної програми з енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії на 2022-2026 роки. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pidvishchennya-energoeffektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-konceptsiya-novoyi-cilovoyi-programi-na-2022-2026-roki>
7. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 р. № 1803-2021-р. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-p#Text>
8. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-2017-р. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top>
9. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.18 р. № 430-р, із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 321-р від 07. 04. 2021. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
10. Савоськин А. Н., Баранов Л. А., Феоктистов В. П. / под ред. А. Н. Савоськина. *Автоматизация электроподвижного состава*. Москва : Транспорт, 1990. 311 с.
11. 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>
12. 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>
13. Zarri L., Mengoni M., Tani A., Serra G., Casadei D., Ojo J. O. Control Schemes for Field Weakening of Induction Machines. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (Wemdc)* (Turin, 26-27 March 2015). Turin, 2015. P. 146-155. DOI: <https://doi.org/10.1109/wemdc.2015.7194523>

A. M. AFANASOV^{1*}, S. V. ARPUL^{2*}, V. Y. VASYLIEV^{3*}, O. O. HOLOLOBOVA^{4*},
S. M. HOLIK^{5*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail afanasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{3*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{4*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

^{5*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (067) 904 51 46, e-mail diit-ers@ukr.net, ORCID 0000-0002-7697-3832

Automated Control Systems for Mutual Loads of Traction Electric Machines

Purpose. Testing of electric machines should be as objective as possible and contain reliable information about the quality of manufacture or repair of electric machines. During the tests, the parameters of the total power of the test bench sources, energy efficiency of each test process, the difference in thermal loads of the armature windings and excitation windings change. To perform the full test of the electric machine, it is necessary to equip test benches with systems for automatic control of the process of mutual loading. The analysis of different variants of automatic control systems is performed in the work. **Methodology.** Theoretical studies of electromagnetic processes using a mathematical model of the system «voltage source – traction motor» were performed. This system allows determining the energy performance of electric machines in the entire range of changes in loads and voltages during the tests. The methods of theoretical research and analytical calculation of electrical circuits, theoretical foundations of electrical engineering, mathematical modelling of electrical and energy processes were used in the analysis. **Findings.** The analysis of rational variants of functional schemes' construction of automatic control systems with various quantity of power supplies, automatic control loops, mechanical and electric power converters is performed. Rational functional schemes of automatic control systems for testing various collector electric machines of direct and pulsating current are developed. **Originality.** Rational variants of construction of test benches with electric and mechanical moment converters taking into account variable processes of loading of electric cars during the test are offered. The analysis of energy efficiency of various variants of construction of test benches for testing electric machines in entire range of change of test loadings and voltage of power supplies in the case of using the automatic control system of mutual loading process is performed. **Practical value.** The conducted research will allow creating recommendations for the design of automated control systems for test benches in order to improve the technical and economic characteristics, reduce the consumption of electricity consumed for testing.

Keywords: automatic control system; voltage; voltage balance; load; mutual load; load current; functional diagram; excitation winding; traction electric machine; testing of electric machines

REFERENCES

1. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., Bilukhin, D. S., Shemet, A. Ia., Vasyliiev, V. Ie., Hololobova, O. O., & Markul, R. V. (2021). Deep Attenuation Use for Traction Motors of Mainline Electric Locomotives. *Science and Transport Progress*, 6(96), 84-92. (in Ukrainian)
2. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., & Drubetskyi, 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)
3. *Mashyny elektricheskije vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya (GOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ), 50 DSTU GOST 2582:2017.* (2017). (in Ukrainian)
4. *Zakon Ukrainy Pro enerhetychnu efektyvnist.* Dokument 1818-IX. (2021). Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-IX#Text> (in Ukrainian)
5. *Kontseptsiiia Derzhavnoi prohramy reformuvannia zaliznychnoho transportu.* (2006). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27 hrudnia 2006 r. No 651-2006-r. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/651-2006-p#Text> (in Ukrainian)
6. *Proekt Kontseptsii Derzhavnoi tsilovoi ekonomichnoi prohramy z enerhoefektyvnosti ta rozvytku vidnovliuvanykh dzherel enerhii na 2022-2026 roky.* (2022). Retrieved from

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- <https://www.kmu.gov.ua/news/pidvishchennya-energoefektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-koncepciya-novoyi-cilovoyi-programi-na-2022-2026-roki> (in Ukrainian)
7. *Pro Natsionalnyi plan dii z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku.* (2021). Rozporiadzhennia Kabinet Ministriv Ukrainy vid 29 hrudnia 2021 r. No 1803-2021-r. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-p#Text> (in Ukrainian)
 8. *Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist".* (2017). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18 serpnia 2017 r. No 605-2017-r. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top> (in Ukrainian)
 9. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku.* (2021). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30.05.18 r. No 430-r, iz zminamy, vnesenymy zghidno z Rozporiadzhenniam KM No 321-r vid 07. 04. 2021. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
 10. Savoskin, A. N., Baranov, L. A., & Feoktistov, V. P. (1990). *Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava.* (Savoskina, A. N. (Ed.)). Moscow: Transport. (in Russian)
 11. 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)
 12. 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)
 13. Zarri, L., Mengoni, M., Tani, A., Serra, G., Casadei, D., & Ojo, J. O. (2015). Control Schemes for Field Weakening of Induction Machines. In *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (Wemdcd)* (pp. 146-155). Turin, Italy. DOI: <https://doi.org/10.1109/wemdcd.2015.7194523> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.11.2021

Прийнята до друку: 21.03.2022

УДК 629.4.027:656.071.8

С. В. МЯМЛІН^{1*}, Л. А. МУРАДЯН^{2*}, О. А. ШИКУНОВ^{3*}, І. В. ПІЩЕНКО^{4*}

^{1*}Філія «Центр діагностики залізничної інфраструктури», АТ «Укрзалізниця», вул. Святошинська, 13, Київ, Україна, 03115, тел. +38 (044) 309 74 06, ел. пошта sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 233 19 35, ел. пошта leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{3*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 233 19 35, ел. пошта tri_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

^{4*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 233 19 35, ел. пошта irinapit95@gmail.com, ORCID 0000-0002-5674-0337

Вплив технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів на ризики їх відмов

Мета. Основною метою нашого дослідження є виявлення взаємозв'язку ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів та успішності процесу виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту. Для цього необхідно з'ясувати послідовність розрахунку величин успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, виконати розрахунки на прикладі вагоноремонтних підприємств регіональної філії «Придніпровська залізниця» і виявити залежності ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів і процесу успішного виконання поставленого завдання. **Методика.** У роботі побудовано взаємозалежності ймовірностей виконання та невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів. При цьому представлено послідовність розрахунку статичних ймовірнісних оцінок успішного виконання та невиконання поставленого завдання, статичних оцінок середнього часу відхилення та основного часу успішного виконання, а також інтенсивності успішного виконання завдання. **Результати.** Отримані статистичні дані успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів по регіональній філії «Придніпровська залізниця» та результати їх емпіричного розподілу впродовж періоду, що дорівнює 90 діб, показали, що величина вибіркового середнього складає 24,1078 вагонів, вибіркова дисперсія дорівнює 3,28 вагонів, значення середньоквадратичного відхилення складає 1,81 вагонів, а коефіцієнт варіації дорівнює 0,075 вагонів. Також встановлено вплив діагностики на ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів під час експлуатації після виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту. **Наукова новизна.** На основі статистичної обробки експериментальних даних уперше проведено емпіричний розподіл статистичних величин успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, що дозволяє розрахувати показники надійності буксових вузлів. Уперше отримано залежність проведення діагностики буксових вузлів від ймовірності виконання поставленого завдання з технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, що дозволить зменшити величину ризиків відмов в разі успішного виконання завдання. **Практична значимість.** Застосування діагностики буксових вузлів вантажних вагонів під час технічного обслуговування й ремонту дозволить знизити в 2...4,5 рази величину ризику відмов.

Ключові слова: безпека руху поїздів; ризики; буксовий вузол; діагностика; вантажні вагони; залізничний транспорт

Вступ

Залізничний транспорт на внутрішньому ринку надає значну частину послуг, пов'язаних з організацією та забезпеченням процесу перевезення вантажів і пасажирів. Одним із головних завдань залізничного транспорту, а також важливою складовою його ефективної роботи й розвитку є забезпечення безпеки руху, на яку, як відомо, безпосередньо впливає надійність елементів рухомого складу та технічних засобів інфраструктури.

Після здобуття незалежності Україна як одна з небагатьох країн колишнього Радянського Союзу отримала у спадок добре розвинену залізничну інфраструктуру та її відносно нормальне матеріально-технічне оснащення. Проте перехід до ринкової економіки і специфічні внутрішні особливості розвитку країни вимагали швидкого пристосування та зміни організаційної структури управління, а отже, реформування українських залізниць. Через відсутність кардиналь-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

них змін протягом 15 років (1991–2006 рр.) залізничний транспорт продовжував працювати за старими організаційно-технологічними принципами, які не відповідали сучасним світовим тенденціям організації ефективної роботи залізничного транспорту, що ускладнювало його технологічний розвиток. Тому і й сьогодні головним залишається забезпечення необхідного рівня безпеки руху.

Успішне вирішення завдання із забезпечення необхідного рівня безпеки руху на залізничному транспорті полягає в підтримці належного технічного стану та показників надійності, у першу чергу вагонного парку, оскільки українські залізниці здебільшого виконують перевезення масових вантажів. Безпека руху при цьому може бути оцінена ризиками можливих відмов вантажних вагонів після виконання технічного обслуговування та ремонту. Забезпечити низькі значення ризиків у процесі експлуатації залізничного транспорту після технічного обслуговування та ремонту можна належним діагностуванням вантажних вагонів, оскільки вони складають найбільшу частину з усього рухомого складу під час вантажних перевезень.

Інформація про відмови елементів вантажних вагонів, що виникають у процесі експлуатації, являє собою деякий набір статистичних даних, за якими можна провести аналіз цих відмов. Отже, зі статистичної інформації про відмови елементів вантажних вагонів відомо, що найбільша їх частка припадає на буксові вузли.

У свою чергу, з аналізу відмов буксових вузлів вантажних вагонів можна встановити, що майже всі вони пов'язані з неякісно-проведеним ремонтом і технічним обслуговуванням, на що істотно впливає недотримання технології, зокрема і людський фактор. Для зниження ризиків, які допускають під час ремонту й технічного обслуговування вантажних вагонів, необхідно застосувати методи та засоби технічного діагностування буксових вузлів із подальшим розрахунком ризиків для оцінки безпеки руху на залізничному транспорті.

Дослідження, наведені в цій роботі, стосуються галузі залізничного транспорту, а саме технології ремонту й безпеки руху.

Питанням безпеки руху на залізничному транспорті та можливим шляхам її підвищення, присвячені праці таких науковців, як Е. М. Сокол, І. Е. Мартинов, О. Й. Соколов, А. В. Батіг,

О. Ф. Лужицький, О. М. Возняк, Я. В. Болжеларський, Б. Є. Боднар, А. А. Босов, Т. В. Бутько, М. І. Капіца, В. В. Мямлін, Е. Д. Тартаковський, М. Б. Кельрих, В. М. Бубнов, В. П. Ткаченко, А. О. Ловська, О. В. Фомін, Д. М. Барановський та багатьох ін. Серед закордонних учених питаннями визначення та прогнозування стану безпеки руху на залізницях займалися М. Patil, R. D. Shinde, Yu Lu, A. Miller, Chris Johnson, Tingdi Zhao, P. Smoczyński, A. Kadziński, R. Licciardello, A. Baldassarra, P. Vitali, A. Tieri, M. Cruciani, A. N. Vasile, M. M. Rekabi, R. M. Houdijk, M. Sasidharan, M. Burrow, G. Ghataora та ін.

Визначенню та класифікації ризиків на залізничному транспорті з їх оцінкою і прогнозуванням присвячені праці таких вітчизняних науковців, як: Л. О. Бакаєв, І. О. Ткаченко, О. В. Розсоха, А. В. Рачинська, О. І. Почечун, О. І. Панченко, О. Б. Кривенко, О. О. Карась, Ю. Коноваленко, К. В. Журавель, І. Совтус, М. Корнійчук, В. В. Березуцький, М. Д. Кацман, М. І. Адаменко, та закордонних науковців: A. Stažnik, D. Babić, I. Bajor, A. Otto, P. Kellermann, A. H.Thieken, M. Máñez Costa, M. Carmona, P. Bubeck, A. Berrado, B. Leitner, E. M. Figueres, P. Hughes, C. Gulijk, J. Grenčík, R. Poprocký, J. Galliková, P. Volna, H. Hadj-Mabrouk, A. Jamshidi, S. Faghieh-Roohi, Z. Li, A. Núñez, S. Hajizadeh, R. Babuška, R. Dollevoet, B. D. Schutter, J. M. Andrić, J. Wang, Q. Li, R. Zhong, J. Zhang, Q. Sun, M. Ann, W. Lin, Oz Ma, T. Eskandari.

У роботах [3, 4, 6] наведено методики аналізу дерева відмов для оцінки безпеки руху. Такі методики використовують для підвищення ефективності технічного обслуговування рухомого складу залізниць і зниження ризиків. Деякі роботи [12, 16, 21] представляють поліпшені методики аналізу дерева відмов для прийняття рішень.

У [10, 13, 15, 19] наведено моделі визначення ризику для оцінки безпеки руху. Отримані в роботах [13, 19] результати базуються на сценаріях аварій з урахуванням людського фактора. У [10, 15] до оцінки ризиків було залучено експертів і використано метод експертних оцінок. Автори [1, 8] розглядають безпеку руху, пов'язану з процесами технічного обслуговування елементів транспортної системи.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У [2, 20] наведено систему ідентифікації ризиків на залізничному транспорті. У [7, 11] для оцінки безпеки використано ймовірність відмов рейок як інфраструктурної складової безпеки руху. У [17] застосовано метод експлуатаційної надійності для оцінки безпеки руху. У [18] розглянуто системи електропостачання залізниць як критичні для безпеки руху транспорту. Аналіз ризиків

у роботі [5] надав можливість використовувати стохастичні методи оцінки безпеки руху. У [9] представлено методи оцінки ризиків і можливості підвищення безпеки руху під час проектування, експлуатації та технічного обслуговування транспортних засобів залізниць. Особливу увагу приділено конструкціям вантажних вагонів і їх впливу на безпеку руху. У роботах [14, 20] безпеку руху описано за допомогою матриць ризиків.

Оскільки АТ «Українська залізниця» має на меті реформування та імплементацію вимог законодавства ЄС, діагностика буксових вузлів вантажних вагонів у процесі технічного обслуговування й ремонту для зниження ризиків на залізничному транспорті є актуальним прикладним науково-технічним завданням.

Мета

Основною метою дослідження є виявлення взаємозв'язку ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів та успішності процесу виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту. Для цього необхідно з'ясувати послідовність розрахунку величин успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, провести розрахунки на прикладі вагоноремонтних підприємств регіональної філії «Придніпровська залізниця» і виявити залежності ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів і процесу успішного виконання поставленого завдання.

Методика

Позначимо виконання завдання працівником із технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів як x , а всіх інших елементів – як y . Відомо, що працівник може виконати завдання правильно або неправильно. Таким чином, виконані неправильно завдання –

це помилки, що виникають у певній технологічній ситуації.

Запишемо формулу ймовірності успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів:

$$P_s = P_x(1 - P_h)P_y, \quad (1)$$

де P_x – ймовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів; P_h – ймовірність допущеної помилки в результаті впливу людського фактора; P_y – ймовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів.

Формулу ймовірності невиконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів, яка буде відповідати ризикам відмов, запишемо в такому вигляді:

$$R = P_F = 1 - P_x(1 - P_h)P_y. \quad (2)$$

Із наведених формул (1) і (2) можна зробити висновок про єдиний спосіб успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, що полягає в успішному виконанні завдань x, y і зниженні впливу людського фактора.

Ймовірність успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, позначену через P_y , доповнимо залежністю від часу – $P(t)$. Останній показник має такі властивості:

- $P(t) = 1$ – успішне виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів;
- $P(t)$ – незростаюча функція часу;
- $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$ – невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів.

Оскільки ймовірність успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів $P(t)$ і ймовірність його невиконання є взаємно протилежними подіями, оцінку ймовірності невиконання

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів можна визначити за залежністю:

$$F(t) = 1 - P(t). \quad (3)$$

При цьому для функції $F(t)$ мають місце співвідношення:

$$0 \leq F(t) \leq 1; \quad F(0) = 0; \quad F(\infty) = 1. \quad (4)$$

Імовірність невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів $F(t)$ – це ймовірність того, що в межах заданого проміжку часу завдання не буде виконано.

Наочно продемонструвати взаємозалежності ймовірностей виконання та невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів можна за допомогою графіка на рис. 1.

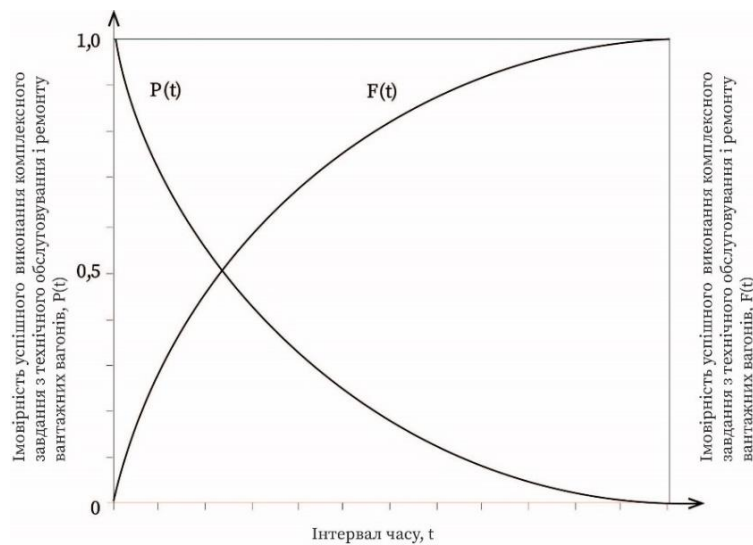


Рис. 1. Взаємозалежності ймовірностей виконання та невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів

Fig. 1. Interdependence of the probabilities of performing and non-performing of a complex task of maintenance and repair of freight cars

Імовірність невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів $F(t)$ характеризує ймовірність того, що випадковий інтервал часу виконання T менший за заданий інтервал часу t ($t \geq T$). Під T необхідно розуміти безперервну випадкову величину, для якої існує щільність розподілу часу успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів:

$$f(t) = q(t) = \frac{d}{dt} Q(t), \quad (5)$$

де $Q(t)$ – функція розподілу часу невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, яка збігається з функцією $F(t)$:

$$Q(t) = F(t) = \int_0^t q(t) dt. \quad (6)$$

Статистичну ймовірнісну оцінку успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів $\bar{P}(t)$ визначають за допомогою формули [2, 18]:

$$\bar{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (7)$$

де N_0 – кількість успішно виконаних комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів; $n(t)$ – кількість невиконаних комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів за інтервал часу t .

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Статистичну ймовірнісну оцінку невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів $\bar{F}(t)$ визначають на основі формули [14, 21]:

$$\bar{F}(t) = 1 - \bar{P}(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (8)$$

Графічна залежність розподілу функції $f(t)$ наведена на рис. 2.

Статистично визначити щільність імовірності $\bar{f}(t)$ можна за допомогою формули [3, 18]:

$$\bar{f}(\Delta t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (9)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість невиконаних комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів в інтервалі часу Δt .

Тоді можна записати такі вирази:

– для ймовірності невиконання комплексних завдань із технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів:

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau; \quad (10)$$

– для ймовірності виконання комплексних завдань із технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів:

$$P(t) = \int_t^\infty f(\tau) d\tau. \quad (11)$$

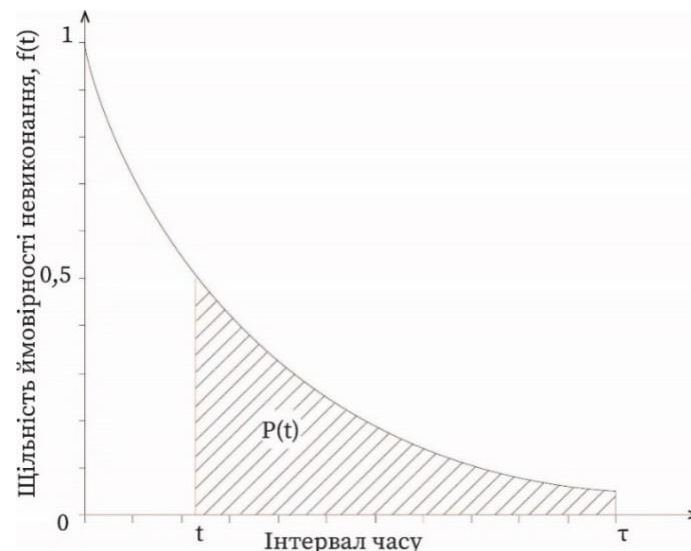


Рис. 2. Графічна залежність розподілу функції $f(t)$ під час першого невиконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів

Fig. 2. Graphical dependence of the function distribution $f(t)$ during the first non-performing the complex task of maintenance and repair of freight cars

Середній час відхилення виконання комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів T_{cp} – математичне очікування виконання комплексних завдань з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів:

$$T_{cp} = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = -t \cdot P(t) \Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty P(t) dt, \quad (12)$$

де t – час виконання комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів.

Статистичну оцінку середнього часу відхилення виконання комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів можна визначити за допомогою формули:

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (13)$$

де t_i – час виконання комплексних завдань за i -м технічним обслуговуванням і ремонтом вантажних вагонів.

Основний час успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів – це відношення інтервалу часу успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів до математичного сподівання кількості невиконаних комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів у певний інтервал часу:

$$T_0 = \frac{t}{M[n(t)]}, \quad (14)$$

де $M[n(t)]$ – математичне сподівання кількості невиконаних комплексних завдань із технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів у певний інтервал часу t .

Статистичну оцінку основного часу успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів можна визначити за формулою:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_{cpi}, \quad (15)$$

де t_{cpi} – час успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів; n – кількість технічних обслуговувань і ремонтів вантажних вагонів.

Інтенсивність успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів – це умовна щільність ймовірності його успішного виконання, яку визначають для певного моменту часу за умови, що до цього моменту все виконано вчасно:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\frac{d}{dt} F(t)}{P(t)} =$$

$$= \frac{\frac{d}{dt}(1 - P(t))}{P(t)} = -\frac{\frac{dP(t)}{dt}}{P(t)} \quad (16)$$

Інтенсивність успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів показує, скільки вагонів не було охоплено в інтервалі часу відносно середнього числа вантажних вагонів, що підлягають технічному обслуговуванню та ремонту.

Результати

Проведені статистичні дослідження на базі регіональної філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця» дозволяють побудувати статистичний розподіл для величин успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів по регіональній філії «Придніпровська залізниця» протягом періоду, що дорівнює 90 діб.

Отримані статистичні дані успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів по регіональній філії «Придніпровська залізниця» та результати їх емпіричного розподілу наведені в табл. 1.

Для проведення розрахунку вибіркового середнього $M^*[N]$ використано таку формулу:

$$M^*[N] = \sum_{i=1}^k \bar{N}_i \times p_i^*, \quad (17)$$

де $\bar{N}_i$ – випадкова величина в i -му інтервалі; p_i^* – значення емпіричної ймовірності (частоти) випадкової величини відносно $\bar{N}_i$, що можна встановити за формулою:

$$p_i^* = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^k h_i}, \quad (18)$$

У якій h_i – кількість спостережень випадкової величини $\bar{N}_i$ в розряді; $\sum_{i=1}^k h_i$ – сумарне число спостережень; i – порядковий номер розряду ($i = 1, 2, \dots, k$).

Таблиця 1

Результати емпіричного розподілу статистичних даних успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів по регіональній філії «Придніпровська залізниця»

Table 1

The results of the empirical distribution of statistical data on the successful performing of a complex task of maintenance and repair of freight cars in the Prydniprovskya Railway regional branch

№ п/п	Розряди, $N_i - N_{i+1}$	Середні значення, $\bar{N}_i$	Кількість спостережень, h_i	Емпірична ймовірність, p_i^*	$\bar{N}_i \times p_i^*$	$\bar{N}_i^2 \times p_i^*$
1	20–21	20,5	5	0,04902	1,004902	20,60049
2	21–22	21,5	10	0,098039	2,107843	45,31863
3	22–23	22,5	11	0,107843	2,426471	54,59559
4	23–24	23,5	23	0,22549	5,29902	124,527
5	24–25	24,5	22	0,215686	5,284314	129,4657
6	25–26	25,5	12	0,117647	3,00000	76,5
7	26–27	26,5	14	0,137255	3,637255	96,38725
8	27–28	27,5	5	0,04902	1,348039	37,07108
Усього	–	–	102	1,00000	24,1078	584,466

Для вказаних емпіричних рядів величина успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів по регіональній філії «Придніпровська залізниця»:

1) $M^*[N]$ дорівнює 24,1078 вагонів (табл. 1)

Вибіркову дисперсію $D^*[N]$ визначено за формулою:

$$D^*[N] = \sum_{i=1}^k \bar{N}_i^2 \times p_i^* - (M^*[N])^2. \quad (19)$$

2) $D^*[N]$ складе 3,28 вагонів.

Значення середньоквадратичного відхилення σ_N^* розраховано за формулою:

$$\sigma_N^* = \sqrt{D^*[N]}. \quad (20)$$

3) σ_N^* дорівнює 1,81 вагонів.

Оцінку коефіцієнта варіації $\vartheta(N)$ виконано за формулою:

$$\vartheta(N) = \frac{\sigma_N^*}{M^*[N]}. \quad (21)$$

$\vartheta(N)$ складає 0,075 вагонів.

Для опису ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів на основі вище наведеного будемо вважати, що розподілення успішного виконання комплексного завдання є нормальним. Щоб зменшити кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, які виникають через проведення неякісного ремонту й технічного обслуговування, можна застосовувати методи й засоби діагностики. Для діагностики буксових вузлів вантажних вагонів пропонуємо використовувати їх вібраційні характеристики. А для усунення впливу людського фактора пропонуємо повністю усунути вплив оператора на висновки діагностичного процесу. Тоді ризик відмов буксових вузлів вантажних вагонів (2) з урахуванням застосування діагностики ($P_h = 0$) будемо розраховувати за формулою:

$$R = 1 - P_x P_y. \quad (22)$$

На основі формул (2) і (22) побудуємо залежності ризиків від імовірності виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту буксових вузлів вантажних вагонів (рис. 3).

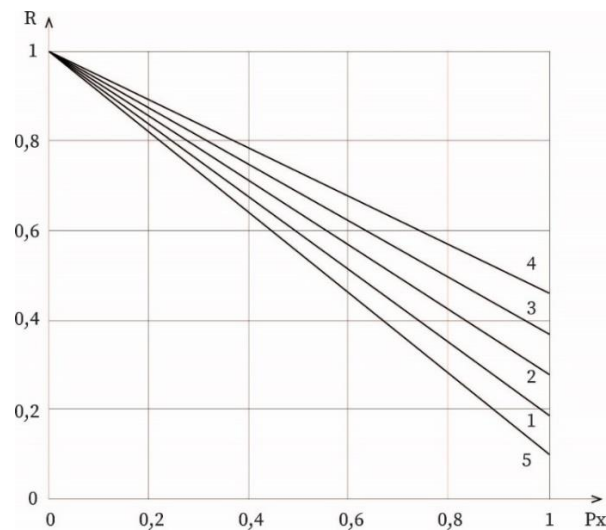


Рис. 3. Залежності ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів від імовірності виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту:

1 – $P_h = 0,1$; 2 – $P_h = 0,2$; 3 – $P_h = 0,3$; 4 – $P_h = 0,4$; 5 – $P_h = 0$

Fig. 3. Dependencies of the risks of failure of the axle boxes of freight cars on the probability of performing the set maintenance and repair task:

1 – $P_h = 0,1$; 2 – $P_h = 0,2$; 3 – $P_h = 0,3$; 4 – $P_h = 0,4$; 5 – $P_h = 0$

З огляду на наведені залежності ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів можемо стверджувати, що застосування діагностики під час технічного обслуговування й ремонту дозволить знизити величину ризиків у 2...4,5 рази за умови успішного виконання поставленого завдання.

Наукова новизна та практична значимість

У результаті статистичної обробки експериментальних даних регіональної філії «Придніпровська залізниця» вперше отримано емпіричний розподіл статистичних даних успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів, що, у свою чергу, дозволить розрахувати ризики відмов буксових вузлів під час експлуатації після проведення технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів.

Уперше отримано залежності на ризиків відмов буксових вузлів від імовірності виконання поставленого завдання з технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, що дозволить зменшити величину ризиків відмов за умови успішного виконання поставленого завдання.

Застосування діагностики буксових вузлів вантажних вагонів під час технічного обслуговування й ремонту сприятиме зниженню величини ризику відмов у 2...4,5 рази у випадку успішного виконання поставленого завдання, що підтверджено на прикладі регіональної філії «Придніпровська залізниця».

Висновки

У роботі представлено послідовність розрахунку величин успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів.

Отримані статистичні дані успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів по регіональній філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця» та результати їх емпіричного розподілу впродовж періоду, що дорівнює 90 діб, показали, що величина вибіркового середнього $M^*[N]$ складає 24,1078 вагонів, вибіркова дисперсія $D^*[N]$ дорівнює 3,28 вагонів, значення середньоквадратичного відхилення σ_N^* складає 1,81 вагонів, а коефіцієнт варіації $\vartheta(N)$ має значення 0,075 вагонів.

Також встановлено вплив діагностики на ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

під час експлуатації після виконання поставленого завдання з технічного обслуговування й ремонту. У разі застосування діагностики буксових вузлів вантажних вагонів під час технічного

обслуговування й ремонту можна знизити величину ризиків відмов у 2...4,5 рази за умови успішного виконання поставленого завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Бабенко А. О., Шовкун В. О. До питання забезпечення безпеки руху у пасажирському господарстві. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2020. № 190. С. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.214169>
2. Baranovskyi D., Muradian L., Bulakh M. The Method of Assessing Traffic Safety in Railway Transport. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 666. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042075>
3. Dindar S., Kaewunruen S., An M., Gigante-Barrera A. Derailment-based Fault Tree Analysis on Risk Management of Railway Turnout Systems. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/4/042020>
4. Budde C. E., Ruijters E., Stoelinga M. The dynamic fault tree rare event simulator. *Quantitative Evaluation of Systems. QEST 2020*. 2020. Vol. 12289. P. 233–238. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59854-9_17
5. Gerlici J., Nozhenko O., Cherniak G., Gorbunov M., Domin R., Lack T. The development of diagnostics methodological principles of the railway rolling stock on the basis of the analysis of dynamic vibration processes of the rail. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 157. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815703007>
6. Ghabhab M., Junges S., Katoen J. P., Kuntz M., Volk M. Safety analysis for vehicle guidance systems with dynamic fault trees. *Reliability engineering & system safety*. 2019. Vol. 186. P. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.02.005>
7. Cheng L., Wang J., Peng Y. Research on risk assessment of high-speed railway operation based on network ANP. *Smart and Resilient Transport*. 2021. Vol. 3. Iss. 1. P. 37–51. DOI: <https://doi.org/10.1108/SRT-10-2020-0024>
8. Gill A., Smoczyński P. Optimization of Safety System Structures in Railway Transport. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 19. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910700>
9. Grenčík J., Poprocký R., Galliková J., Volna P. Use of risk assessment methods in maintenance for more reliable rolling stock operation. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 157. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815704002>
10. Grigorovskiy P., Terentyev O., Mikautadze R. Development of the technique of expert assessment in the diagnosis of the technical condition of buildings. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 2. Iss. 2 (40). P. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.128548>
11. Jamshidi A., Faghih-Roohi S., Hajizadeh S., Núñez A., Babuška R., Dollevoet R., Li, Z., Schutter B. D. A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment. *Risk Analysis*. 2017. Vol. 37. Iss. 8. P. 1495–1507. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12836>
12. Junges S., Katoen J. P., Stoelinga M., Volk M. One net fits all: a unifying semantics of dynamic fault trees using GSPNs. *Petri Nets*. 2018. P. 272–293. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91268-4_14
13. Leitner B. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361>
14. Manafov E. The Use of a Fuzzy Expert System to Increase the Reliability of Diagnostics of Axle Boxes of Rolling Stocks. *Scientific Journal of Silesian University of Technology—Series Transport*. 2020. Vol. 107. P. 95–106. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.107.7>
15. Matusevich O., Matusevych O., Bobyl V., Chornovil O. Railway transport risk management and insurance. *Financial and credit activity—Problems of theory and practice*. 2018. Vol. 2. Iss. 25. P. 128–138. DOI: <https://doi.org/10.18371/fcaptp.v2i25.136479>
16. Muradyan L. A., Pitsenko I. V., Shaposhnik V. Yu. Predictive model of risks in railway transport during diagnostics of axle boxes of freight cars. *Science and Transport Progress*. 2021. No 1 (91). P. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/230223>

17. Okorokov A., Fomin V., Lovska A., Vernigora R., Zhuravel I. Research into a possibility to prolong the time of operation of universal open top wagon bodies that have exhausted their standard resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3. Iss. 7 (93). P. 20–26.
DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131309>
18. Oz M., Kaymakci O., Koyun A. A safety related perspective for the power supply systems in railway industry. *Eksploatacja i Niezawodność–Maintenance and Reliability*. 2017. Vol. 19. Iss. 1. P. 114–120.
DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2017.1.16>
19. Shaposhnik, V. Yu. Human Factor Influence on Performing Technical Maintenance and Repair of Freight Cars. *Science and Transport Progress*. 2018. No 6 (78). P. 165–175.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154031>
20. Stažnik A., Babić D., Bajor I. Identification and analysis of risks in transport chains. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. Iss. 1. P. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes15-12179>
21. Volk M., Junges S., Katoen J. P. Fast dynamic fault tree analysis by model checking techniques. *IEEE Transaction Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14. Iss. 1. P. 370–379. DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2710316>

S. V. MYAMLIN^{1*}, L. A. MURADIAN^{2*}, O. A. SHYKUNOV^{3*}, I. V. PITSENKO^{4*}

^{1*}Branch «Diagnostics Center of Railway Infrastructure», Ukrainian Railway JSC, Sviatoshinska St., 13, Kyiv, Ukraine, 03115, tel. +38 (044) 309 74 06, e-mail sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

^{2*}Dep. «Cars and Car Facilities», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 233 19 35, e-mail Leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0003-1781-4580

^{3*}Dep. «Cars and Car Facilities», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 233 19 35, e-mail Leontymuradian@gmail.com, ORCID 0000-0002-8256-2634

^{4*}Dep. «Cars and Car Facilities», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 233 19 35, e-mail irinapit95@gmail.com, ORCID 0000-0002-5674-0337

Influence of Maintenance and Repair of Axle Boxes on the Risks of Their Failure

Purpose. The main purpose of the study is to identify the interconnection between the risks of failure of axle boxes of freight cars and the success of performing a complex task of maintenance and repair. To do this, one should identify the sequence of calculating the values of successful completion of the complex task of maintenance and repair of freight cars, make practical calculations using the example of car repair companies of Prydniprovskaya Railway regional branch and identify the dependencies of failure risks of the freight cars and the process of successful completion of the task. **Methodology.** The paper constructs the interconnections of the probabilities of performing and not performing a complex task of maintenance and repair of freight cars. In addition, the calculation sequence of static probability estimates of successful performing and not performing of the set task, static estimates of the average deviation time and the main time of successful performing, as well as its intensity is presented. **Findings.** The obtained statistical data of the effective implementation of the complex task of maintenance and repair of freight cars at Prydniprovskaya Railway regional branch and the results of their empirical distribution throughout a period of 90 days, showed that the sample average is 24.1078 cars, the sample variance is 3.28 cars, the value of the standard deviation is 1.81 cars, and the coefficient of variation is 0.075 cars. The influence of diagnostics on the failure risks of axle boxes of freight cars during operation after fulfilling the task of maintenance and repair is also established. **Originality.** Based on statistical processing of experimental data, for the first time an empirical distribution of statistical data of successful completion of a complex task of maintenance and repair of freight cars was performed, which allows calculating the reliability indicators of axle boxes after maintenance and repair of freight cars. For the first time, the dependence of axle boxes diagnostics on the risk of failure of performing the task of maintenance and repair of freight cars is received, which will allow reducing the risk of failure if the task is successfully completed. **Practical value.** The use of diagnostics of axle boxes of freight cars during maintenance and repair can reduce the risk of failure by 2... 4.5 times.

Keywords: train traffic safety; risks; axle box; diagnostics; freight cars; railway transport

REFERENCES

1. Martynov, I. E., Trufanova, A. V., Babenko, A. O., & Shovkun, V. O. (2020). Analysis of directions for improving the reliability of passenger rolling stock. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 190, 55-66. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.190.2020.214169> (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Baranovskyi, D., Muradian, L., & Bulakh, M. (2021). The Method of Assessing Traffic Safety in Railway Transport. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 666, pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042075> (in English)
3. Dindar, S., Kaewunruen, S., An, M., Gigante-Barrera, A. (2017). Derailment-based Fault Tree Analysis on Risk Management of Railway Turnout Systems. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, pp. 1-9). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/4/042020> (in English)
4. Budde, C. E., Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2020). The dynamic fault tree rare event simulator. In *Evaluation of Systems. QEST 2020* (Vol. 12289, pp. 233-238). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59854-9_17 (in English)
5. Gerlici, J., Nozhenko, O., Cherniak, G., Gorbunov, M., Domin, R., & Lack, T. (2018). The development of diagnostics methodological principles of the railway rolling stock on the basis of the analysis of dynamic vibration processes of the rail. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 157, pp. 1-8). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815703007> (in English)
6. Ghadhab, M., Junges, S., Katoen, J. P., Kuntz, M., & Volk, M. (2019). Safety analysis for vehicle guidance systems with dynamic fault trees. *Reliability engineering & system safety*, 186, 37-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.02.005> (in English)
7. Cheng, L., Wang, J., & Peng, Y. (2021). Research on risk assessment of high-speed railway operation based on network ANP. *Smart and Resilient Transport*, 3(1), 37-51. DOI: <https://doi.org/10.1108/SRT-10-2020-0024> (in English)
8. Gill, A., & Smoczyński, P. (2021). Optimization of Safety System Structures in Railway Transport. *Sustainability*, 13(19), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910700> (in English)
9. Grenčík, J., Poprocký, R., Galliková, J., & Volna, P. (2018). Use of risk assessment methods in maintenance for more reliable rolling stock operation. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 157, pp. 1-9). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815704002> (in English)
10. Grigorovskiy, P., Terentyev, O., & Mikautadze, R. (2017). Development of the technique of expert assessment in the diagnosis of the technical condition of buildings. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(40)), 10-15. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.128548> (in English)
11. Jamshidi, A., Faghih-Roohi, S., Hajizadeh, S., Núñez, A., Babuška, R., Dollevoet, R., Li, Z., & Schutter, B. D. (2017). A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment. *Risk Analysis*, 37(8), 1495-1507. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12836> (in English)
12. Junges, S., Katoen, J. P., Stoelinga, M., & Volk, M. (2018). One net fits all: a unifying semantics of dynamic fault trees using GSPNs. In *Petri Nets* (pp. 272-293). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91268-4_14 (in English)
13. Leitner, B. (2017). A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. *Procedia Engineering*, 187, 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361> (in English)
14. Manafov, E. (2020). The Use of a Fuzzy Expert System to Increase the Reliability of Diagnostics of Axle Boxes of Rolling Stocks. *Scientific Journal of Silesian University of Technology-Series Transport*, 107, 95-106. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.107.7> (in English)
15. Matusevich, O., Matusevych, O., Bobyl, V., & Chornovil, O. (2018). Railway transport risk management and insurance. *Financial and credit activity-Problems of theory and practice*, 2(25), 128-138. DOI: <https://doi.org/10.18371/fcaptp.v2i25.136479> (in English)
16. Muradyan, L. A., Pitsenko, I. V., & Shaposhnik, V. Yu. (2021). Predictive model of risks in railway transport during diagnostics of axle boxes of freight cars. *Science and Transport Progress*, 1(91), 94-103. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/230223> (in English)
17. Okorokov, A., Fomin, V., Lovska, A., & Vernigora, R., (2018). Zhuravel I. Research into a possibility to prolong the time of operation of universal open top wagon bodies that have exhausted their standard resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(93)), 20-26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131309> (in English)
18. Oz, M., Kaymakci, O., & Koyun, A. (2017). A safety related perspective for the power supply systems in railway industry. *Eksplatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability*, 19(1), 114-120. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2017.1.16> (in English)
19. Shaposhnik, V. Yu. (2018). Human Factor Influence on Performing Technical Maintenance and Repair of Freight Cars. *Science and Transport Progress*, 6(78), 165-175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154031> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

20. Stažnik, A., Babić, D., & Bajor, I. (2017). Identification and analysis of risks in transport chains. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(1), 61-70. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes15-12179> (in English)
21. Volk, M., Junges, S., & Katoen, J. P. (2018). Fast dynamic fault tree analysis by model checking techniques. In *IEEE Transaction Industrial Informatics* (Vol. 14, Iss. 1, pp. 370-379). DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2710316> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.11.2021

Прийнята до друку: 18.03.2022

УДК 629.463.66:519.87

О. В. ФОМІН¹, А. О. ЛОВСЬКА^{2*}, А. М. ФОМІНА³, С. С. СОВА⁴

¹Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (044) 591 51 26, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Каф. «Інженерія вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

³Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59-а, Сєверодонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (06452) 403 42, ел. пошта anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

⁴Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, пр. Центральний, 59-а, Сєверодонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (06452) 403 42, ел. пошта gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0003-3380-7604

Дослідження навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу

Мета. У роботі передбачено дослідити навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Це дозволить зменшити тару вагона-хопера та сприятиме збільшенню його вантажопідйомності. **Методика.** Дослідження проведено на прикладі вагона-хопера для перевезення зерна моделі 19–6869 виробництва ДМЗ «Карпати». Важливо, що використання композитного матеріалу сприяє зменшенню маси даху майже на 40 % порівняно з металевою конструкцією. Тому проведено математичне моделювання динамічного навантаження вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Розв’язок диференціальних рівнянь здійснено за методом Рунге–Кутти в програмному комплексі MathCad. Початкові умови взято рівними нулю. Для проведення розрахунків узяті параметри ресорного підвішування візків моделі 18–100. Отримані результати розрахунків використано під час визначення основних показників міцності даху. Просторову модель даху вагона-хопера створено в середовищі програмного комплексу SolidWorks. Розрахунок здійснено за методом скінченних елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). Для побудови скінченно-елементної моделі даху вагона-хопера використано ізопараметричні тетраедри. Оптимальну кількість елементів моделі визначено за графоаналітичним методом. **Результати.** Отримано основні показники динаміки несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композиту. Прискорення кузова в центрі мас склало 5,0 м/с². Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює 0,67. Установлено, що максимальні еквівалентні напруження в даху за всіх розглянутих схем навантаження не перевищують допустимих значень, тобто міцність даху забезпечується. **Наукова новизна.** Проведено математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композиту. Визначено уточнені величини прискорень як складові динамічного навантаження, що діють на нього в експлуатації, а також коефіцієнт вертикальної динаміки. Установлено показники міцності даху з композиту за основних експлуатаційних режимів навантаження. **Практична значимість.** Проведені дослідження сприятимуть проектуванню інноваційних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності його експлуатації.

Ключові слова: транспортна механіка; вагон-хопер; несуча конструкція; дах із композиту; динамічне навантаження; міцність

Вступ

Перспективи розвитку залізничної галузі зумовлюють необхідність упровадження в експлуатацію рухомого складу з поліпшеними техніко-економічними показниками. Одним із провідних напрямів створення сучасного рухомого складу є врахування принципів мультима-

теріальності на стадії проектування та виготовлення.

В останні роки в машинобудуванні все частіше застосовують композитні матеріали, які добре зарекомендували себе не тільки з точки зору міцнісних якостей. Це сприяє зменшенню тари транспортних засобів, поліпшує їх дина-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

мічні та антикорозійні якості, підвищує строк служби тощо.

Тому виникає необхідність проведення відповідних досліджень у цьому напрямі з метою обґрунтування створення інноваційних конкурентоспроможних конструкцій рухомого складу широкої колії.

У роботі [6] розглянуто перспективи використання композитних матеріалів у вантажному вагонобудуванні, наведено результати моделювання міцності кришки люка з композитного матеріалу.

Аналіз використання композитних матеріалів у конструкціях вагонів розглянуто в публікації [1]. Визначено основні напрями створення нових конструкцій вагонів із використанням композитних матеріалів. Проте в роботі відсутні приклади застосування цього матеріалу в несучих конструкціях вагонів.

У роботі [15] висвітлено особливості розробки нових полімерних композитних матеріалів для настилу підлоги залізничних вагонів. Наведено перспективи застосування цього матеріалу в пасажирському вагонобудуванні. Аналіз фізико-механічних та ізоляційних властивостей композитних матеріалів, армованих вуглецевим волокном, для підлоги вагонів проведено в роботі [11]. Обґрунтовано доцільність застосування цього матеріалу у вагонобудуванні. Однак у вказаних роботах не приділено уваги питанням визначення основних показників міцності несучих конструкцій вагонів із композитними складовими.

У роботі [13] наведено особливості застосування композитних панелей під час модернізації вантажних вагонів вузької колії. Зазначено переваги запропонованої модернізації та перспективи її подальшого розвитку. Водночас аналізу напруженого стану несучої конструкції вантажного вагона з композитними складовими в роботі не проведено.

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вантажного вагона з композитними стінами наведено в роботі [12]. Для проведення розрахунків узято нормативні значення навантажень, які діють на вагон в експлуатації. Тобто автори не визначали динамічне навантаження

вагона з урахуванням запропонованого вдосконалення.

У роботі [14] досліджено міцність несучої конструкції вагона з композитного матеріалу, армованого волокном, у разі маневрового співударяння. Наведено висновки щодо отриманого напруженого стану несучої конструкції вагона під час ударних навантажень. Однак динамічне навантаження несучої конструкції вагона з композитними складовими авторами не визначали.

Аналіз можливості модернізації вантажного вагона шляхом використання композитних панелей у його складових подано в публікації [10]. Досліджено використання композиту у дверях критого вагона, обґрунтовано доцільність упровадження модернізації. Разом із тим доцільність застосування композитних матеріалів в інших складових вантажних вагонів потребує подальшого дослідження.

Мета

Автори вбачають основну мету статті в дослідженні навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу. Це дозволить зменшити тару вагона-хопера та сприятиме збільшенню його вантажопідйомності. Для досягнення зазначеної мети передбачено такі завдання:

- провести математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу;
- провести розрахунок на міцність даху за основних режимів навантаження.

Методика

Дослідження проведено на прикладі вагона-хопера для перевезення зерна моделі 19–6869 виробництва ДМЗ «Карпати» (рис. 1).

Дах вагона складається з обшивки, виконаної з листового прокату товщиною 3 мм [2]. Матеріал даху – сталь марки 09Г2С. Дах приварений до внутрішніх діафрагм кузова, торцевих стін та через верхні обв'язування до бокових стін.



Рис. 1. Вагон-хопер моделі 19–6869

Fig. 1. Hopper car model 19–6869

У середній частині даху вздовж поздовжньої осі вагона розміщені п'ять завантажувальних люків. Дах обладнаний трапами, які призначені для безпечної роботи працівників.

Для зменшення навантаження несучої конструкції вагона-хопера пропонуємо використати дах із композитною обшивкою. Використання композитного матеріалу сприяє зменшенню маси даху майже на 40 % порівнянно з металевою конструкцією. До того ж пропонуємо використати композиту із титановою матрицею, який має щільність 4180 кг/м^3 та межу міцності вздовж волокон $1100 \dots 1300 \text{ МПа}$ залежно від

виду волокон та їх кількості, а в поперечному напрямку – 650 МПа .

Для визначення вертикального навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу проведено математичне моделювання з використанням математичної моделі, наведеної в [5]. У рамках дослідження модель доопрацьовано з урахуванням додаткового ступеня вільності – у поздовжній площині [9].

Розрахункова схема вагона-хопера наведена на рис. 2.

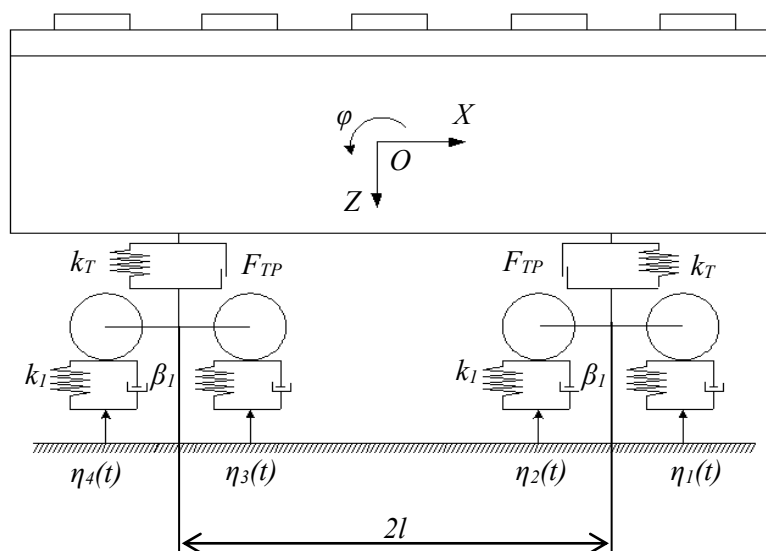


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-хопера

Fig. 2. Design diagram of a hopper car

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Під час проведення розрахунків узято до уваги, що вагон переміщується в порожньому стані по стиковій нерівності. При цьому колія має пружно-в'язкі властивості.

Рівняння руху вагона-хопера мають вигляд:

$$\left(M_1 + (M_3 + M_5) + \frac{nI}{r^2} \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + M_1 \cdot h \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 = P_l; \quad (1)$$

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = -F_{TP} \cdot \left(\operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (2)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_{TP} \cdot l \cdot \left(\operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) \right); \quad (3)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 = H_1; \quad (4)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = F_{TP} \cdot \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_1 \right) + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (5)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right); \quad (6)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 = H_2; \quad (7)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = F_{TP} \cdot \operatorname{sign} \left(\frac{d}{dt} \delta_2 \right) + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left(\frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right); \quad (8)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left(\frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right). \quad (9)$$

де M_1, M_2 – маса та момент інерції несучої конструкції вагона-хопера; M_3, M_4 – маса та момент інерції першого візка за ходом руху; M_5, M_6 – маса та момент інерції другого візка за ходом руху; C_{ij} – характеристики пружності елементів коливальної системи, які визначають значення коефіцієнтів жорсткості пружин k_b ; B_{ij} – функція розсіювання; a – половина бази візка; k – жорсткість колії; β – коефіцієнт демпфування; $\eta_i(x)$ – функція, яка описує нерівність колії; δ_i – деформація пружних елементів ресорного підвішування; F_{TP} – абсолютна сила тертя в ре-

сорному комплекті; H_1, H_2 – величини горизонтальних сил, прикладених до п'ятників першого та другого візків; h – висота центра мас несучої конструкції вагона-хопера.

Результати

Розв'язок диференціальних рівнянь проведено за методом Рунге–Кутта в програмному комплексі MathCad.

Початкові умови взято рівними нулю [7, 8]. Під час проведення розрахунків використано

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

параметри ресорного підвішування візка моделі 18–100.

Результати розрахунків наведено на рис. 3, 4.

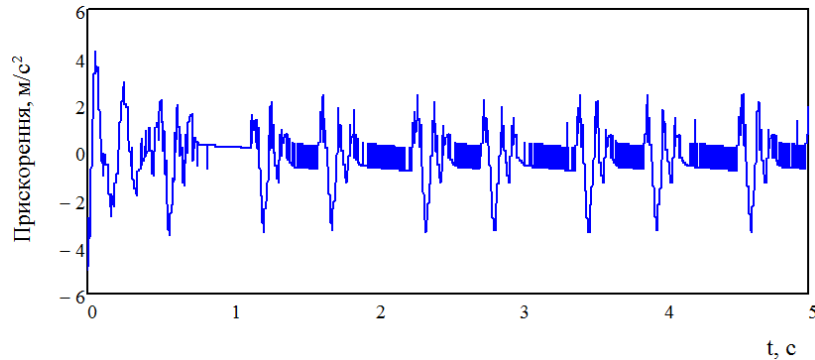


Рис. 3. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас

Fig. 3. Load-bearing structure acceleration of the hopper car in the mass center

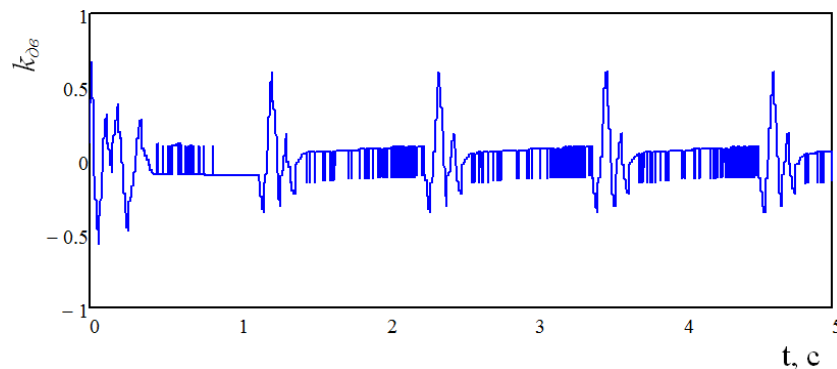


Рис. 4. Коефіцієнт вертикальної динаміки несучої конструкції вагона-хопера

Fig. 4. Vertical dynamics coefficient of the load-bearing structure of the hopper car

Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас склало $5,0 \text{ м/с}^2$, що на 6 % вище ніж у типовій конструкції. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює 0,67 та є вищим на 4,5 % ніж у конструкції вагона-хопера з металевим дахом. Отримані показники динаміки вищі за ті, що виникають у несучій конструкції вагона-прототипу, оскільки його тара зменшилася. Водночас це дозволяє збільшити ко-

рисний об'єм кузова вагона-хопера, що сприятиме і підвищенню ефективності його експлуатації.

Отримані результати враховано під час визначення основних показників міцності даху. Просторову модель даху вагона-хопера створено в програмному комплексі SolidWorks (рис. 5).

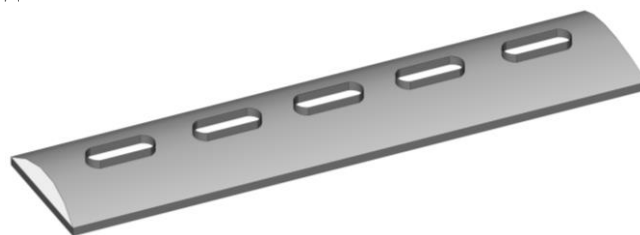


Рис. 5. Просторова модель даху вагона-хопера

Fig. 5. Spatial model of the hopper car roof

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Розрахунок проведено за методом скінченних елементів у програмному комплексі Solid-Works Simulation (CosmosWorks).

Під час створення скінченно-елементної моделі враховано ізопараметричні тетраедри. Оптимальну кількість елементів моделі визначено за графоаналітичним методом. Кількість вузлів моделі склала 85 545, елементів – 253 872. Максимальний розмір елемента становить 40 мм, а мінімальний – 12 мм. Відсоток елементів зі співвідношенням боків більше десяти – 60,6. Мінімальна кількість елементів у колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,6.

Моделю було закріплено за периметром даху в зоні взаємодії з верхнім обв'язуванням кузова вагона.

Розрахунок проведено для I та III режиму навантаження даху. Однак при цьому не проведено розрахунку на міцність у разі дії двох сил по 1 кН кожна, розподілених на майданчику 0,25 x 0,25 м та доданих на відстані 0,5 м одна від одної будь-якій частині даху, оскільки дах обладнано трапом для працівників.

На рис. 6. наведено напружений стан даху під час дії на нього вертикального динамічного навантаження. При цьому максимальні еквівалентні напруження виникають у зонах розміщення завантажувальних люків та складають близько 70 МПа (рис. 3), тобто не перевищують допустимі [3, 4].

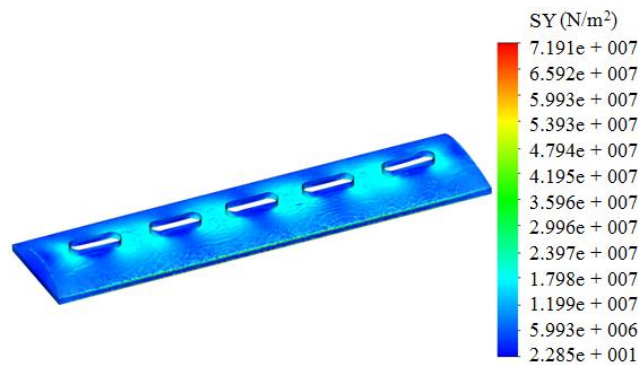


Рис. 6. Напружений стан даху

Fig. 6. Tense state of the roof

За інших розрахункових схем міцність даху експлуатації також забезпечується.

Наукова новизна та практична значимість

Проведено математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композиту. Визначено уточнені величини прискорень як складові динамічного навантаження, що діють на нього в експлуатації, а також коефіцієнт вертикальної динаміки.

Визначено основні показники міцності даху з композиту за основних експлуатаційних режимів навантаження.

Проведені дослідження сприятимуть проектуванню інноваційних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності його

Висновки

1. Проведено математичне моделювання динамічного навантаження несучої конструкції вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу.

Прискорення несучої конструкції вагона-хопера в центрі мас склало 5,0 м/с², що на 6 % вище ніж у типовій конструкції. Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює 0,67, що вище на 4,5 % ніж у конструкції вагона-хопера з металевим дахом.

Унаслідок зменшення тари отримані показники динаміки вищі за ті, що виникають у несучій конструкції вагона-прототипу. А це сприяє збільшенню корисного об'єму кузова вагона-хопера підвищенню ефективності його експлуатації.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Проведено розрахунок на міцність даху за основних режимів навантаження. Установлено, що максимальні еквівалентні напруження в да-

ху за всіх розглянутих схем навантаження не перевищують допустимих значень, тобто міцність даху забезпечується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бектуров К. Б., Зарипов Р. Ю., Медведев А., Каербек Д. Перспективы применения композиционных материалов в грузовом вагоностроении. *Наука и Техника Казахстана*. 2017. № 1–2. С. 25–33.
2. Вагон-хopper бункерного типа для перевозки зерна. Модель 19-6869. Руководство по эксплуатации. ОАО “ЗМК”. Москва, 2015. 75 с.
3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
4. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
5. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основы динамики вагонів : навч. посіб. Київ : КУЕТТ, 2003. 269 с.
6. Каракаев А. К., Зарипов Р. Ю. Композитные материалы в грузовом вагоностроении. *Наука и Техника Казахстана*. 2016. № 1–2. С. 39–47.
7. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulina G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 12. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
8. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 8. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
9. Fomin O., Lovska A. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6. Iss. 7 (108). P. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
10. Kosobudzki M., Jamrozik K., Bocian M., Kotowski P., Zajac P. The analysis of structure of the repaired freight wagon. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2029. Iss. 1. P. 020030-0–020030-6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5066492>
11. Liu Y., Guan M. Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019. Vol. 77. P. 995–1007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01467-y>
12. Patrascu A. I., Hadar A., Pastrama S. D. Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale plastic*. 2019. Vol. 57. Iss. 2. P. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.37358/mp.20.2.5360>
13. Placzek M., Wróbel A., Olesiejuk M. Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 112. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022>
14. Street G. E., Mistry P. J., Johnson M. S. Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5. Iss. 6. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060152>
15. Zaynitdinov O. I., Rahimov R. V., Waail M. L., Ruzmetov Y. O. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 378–381. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v9i2.30519>

O. V. FOMIN¹, A. O. LOVSKA^{2*}, A. M. FOMINA³, S. S. SOVA⁴

¹Dep. «Cars and Carriage Facilities», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 9, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +380 (44) 591 51 26, e-mail fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alionalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

³Dep. «Railway, Road Transport and Handling Machines», Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Tsentralnyi Ave., 59a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. (06452) 403 42, e-mail anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

⁴Dep. «Railway, Road Transport and Handling Machines», Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Tsentralnyi Ave., 59a, Severodonetsk, Ukraine, 93400, tel. (06452) 403 42, e-mail gorbunov0255@gmail.com, ORCID 0000-0003-3380-7604

Loading Research of Load-Bearing Structure of Hopper Car with Composite Roof

Purpose. The work is aimed to investigate the loading of load-bearing structure with composite material roof. This will allow reducing the dead weight of the hopper car and will contribute to the possibility of increasing its carrying capacity. **Methodology.** Investigations were performed using the example of hopper car for grain transporting, model 19-6869, manufactured by Karpaty Experimental Mechanical Plant. It is important to say that the use of composite material reduces the roof weight by up to 40% in comparison with the metal design. That is why mathematical modeling of dynamic loading of the hopper car with composite roof was carried out. Differential equations were solved by Runge-Kutta method in MathCad software package. Initial conditions were assumed to be zero. During the calculations, the spring suspension parameters of the 18-100 bogie models were taken into account. The obtained results of calculations were used when determining the main indicators of the roof strength. The spatial model of the hopper car roof was created in SolidWorks software complex. Calculation was performed by the finite element method, which is implemented in the SolidWorks Simulation (CosmosWorks) software complex. When constructing the finite element model of the hopper car, the isoparametric tetrahedra were used. The optimum number of the model elements was determined by the grapho-analytical method. **Findings.** The basic indices of load-bearing structure dynamics of hopper car with composite roof were obtained. Acceleration of the body in the mass center was $5,0 \text{ m/s}^2$. Coefficient of vertical dynamics is equal to 0.67. It was found that the maximum equivalent stresses in the roof for all the considered loading schemes do not exceed the admissible values, that is, the roof strength is ensured. **Originality.** The mathematical modeling of dynamic loading of the load-bearing structure of the hopper car with composite roof was carried out. The acceleration values as the components of dynamic loading acting on it during operation as well as vertical dynamics coefficient were determined. The strength indicators of the composite roof under the main operational loading modes have been found out. **Practical value.** The conducted research will contribute to the creation of guidelines for the design of innovative structures of the rolling stock, as well as increase the efficiency of its operation.

Keywords: transport mechanics; hopper car; load-bearing structure; composite roof; dynamic loading, strength

REFERENCES

1. Bekturov, K. B., Zaripov, R. Yu., Medvedev, A., & Kaerbekov, D. (2017). Perspektivy primeneniya kompozitsionnykh materialov v gruzovom vagonostroenii. *Science and Technology of Kazakhstan*, 1-2, 25-33. (in Russian)
2. Vagon-khopper bunkernogo tipa dlya perevozki zerna. Model 19-6869. Rukovodstvo po ekspluatatsii. (2015). OAO «ZMK». Moscow. (in Russian)
3. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, 54 GOST 33211-2014 (2016). (in Russian)
4. Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nasamohidnih), 250 DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian)
5. Domin, Yu. V., & Chernyak, G. Yu. (2003). *Osnovi dinamiki vagoniv*: navch. posib. Kyiv: KUETT. (in Ukrainian)
6. Karakaev, A. K., & Zaripov, R. Yu. (2016). Kompozitnye materialy v gruzovom vagonostroenii. *Science and Technology of Kazakhstan*, 1-2, 39-47. (in Russian)
7. Fomin, O., Gerlici, J., Gorbunov, M., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14(12), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420> (in English)
8. Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills. *Materials*, 14(8), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915> (in English)
9. Fomin, O., & Lovska, A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(108)), 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162> (in English)
10. Kosobudzki, M., Jamrozak, K., Bocian, M., Kotowski, P., & Zajac, P. (2018). The analysis of structure of the repaired freight wagon. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2029, Iss. 1, pp. 020030-0–020030-6). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5066492> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. Liu, Y., & Guan, M. (2019). Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77, 995-1007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01467-y> (in English)
12. Patrascu, A. I., Hadar, A., & Pastrama, S. D. (2019). Structural Analysis of a Freight Wagon with Composite Walls. *Materiale plastic*, 57(2), 140-151. DOI: <https://doi.org/10.37358/mp.20.2.5360> (in English)
13. Płaczek, M., Wróbel, A., & Olesiejuk, M. (2017). Modelling and arrangement of composite panels in modernized freight cars. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 112, pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206022> (in English)
14. Street, G. E., Mistry, P. J., & Johnson, M. S. (2021). Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons. *Journal of Composites Science*, 5(6), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060152> (in English)
15. Zaynitdinov, O. I., Rahimov, R. V., Waail, M. L., & Ruzmetov, Y. O. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*, 9(2), 378-381. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v9i2.30519> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.11.2021

Прийнята до друку: 18.03.2022

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.21.04.2

М. М. ПОПОВИЧ¹, С. В. КЛЮЧНИК^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел.+38 (0562) 33 58 12, ел. пошта porovich.n.m@ukr.net, ORCID 0000-0003-1790-3110

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел.+38 (0562) 33 58 12, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Особливості напружено-деформованого стану сталезалізобетонної прогонової будови з попереднім вигином сталевих балки

Мета. Автори передбачають визначити особливості роботи сталезалізобетонної прогонової будови з балками, армованими двотавром, з їх попереднім напруженням за допомогою вигину. **Методика.** Для виготовлення сталезалізобетонної прогонової будови запропоновано армувати двотаврову балку з попереднім будівельним підйомом, який потім вирівнюють за допомогою прикладених зовнішніх навантажень. Для практичної зручності вертикальні зовнішні сили замінено на пару горизонтальних сил, що утримують металеву двотаврову балку в деформованому стані, у такому стані балку бетонують. Після набору міцності бетону зовнішні сили прибирають, і двотаврова металева балка створює попереднє напруження бетону. **Результати.** Для визначення напружень використано перевіркові розрахунки аналітичними методами та методом моделювання за допомогою програми ANSYS. Побудовано епюри напружень за нижніми та верхніми фібрами металевих двотаврових балок та напруження в бетоні верхньої й нижньої зон балки. Аналіз показав, що попередній вигин металевих балок можна використовувати для створення попереднього напруження, що поліпшує працездатність сталезалізобетонних прогонових будов, збільшує їх жорсткість і дозволяє використовувати таку конструкцію для збільшення прогонів залізничних та автодорожніх мостів. **Наукова новизна.** У роботі проведено дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонних балок залізничної прогонової будови з урахуванням попереднього напруження бетону. Запропоновано метод виготовлення сталезалізобетонних балок, що забезпечує попереднє напруження залізобетону за рахунок вигину сталевих двотаврових балок. **Практична значимість.** У результаті розрахунків виявлено, що конструкція, виготовлена вказаним методом, має більшу жорсткість порівняно із залізобетонними або металевими балками. Висота балки може бути меншою, ніж залізобетонної або металевих прогонових будов. Це важливо для залізничних мостів, особливо для швидкісного руху.

Ключові слова: сталезалізобетонна прогонова будова; будівельний підйом; металева балка; епюра напружень; напружено-деформований стан; комбінована модель

Вступ

Швидкісний рух потягів потребує великої кількості нових мостових споруд. Індустрія Бельгії виконує великий обсяг робіт із виробництва будівельних конструкцій, використовуючи сталезалізобетонні двотаврові та u-подібні [2, 10] балки повного заводського виготовлення

під автомобільне та залізничне навантаження [1]. Виготовлення прогонових будов засновано на способі попереднього вигину металевих частин, яку потім бетонують. Така конструкція отримала назву балки «preflex», або «flexstress» [6].

Перші сталезалізобетонні балки «preflex» були виготовлені 1951 р. На двох об'єктах бу-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

дівництва Tour du Midi та Berlaymont Building загальна кількість балок склала 453 шт., довжиною до 40 м [6, 10]. Preflex-балки – це прокатні металеві балки із залізобетонною нижньою полицею (рис. 1). Особливість їх виготовлення полягає в попередньому вигині прокатної балки з подальшим бетонуванням нижньої полиці. Бетонна частина стиснута, таким чином, отримує попереднє напруження, що призводить до підвищення опору вигину й мінімального прогину балок під час експлуатації моста [6, 11].

Виготовлення балок «preflex» складається із двох етапів. На першому етапі бетонують нижній пояс, на другому – останню частину балки на місці монтажу. Такий прийом бетонування збільшує жорсткість сталезалізобетонного перерізу порівняно з попередньою жорсткістю перерізу сталевго елемента.

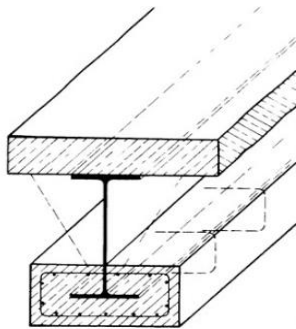


Рис. 1. Preflex-балки

Fig. 1. Preflex-beams

Використання цього прийому під час виготовлення прогонових будов такої конструкції дозволило будівельникам перекривати прогони великої довжини за найменшої будівельної висоти [6, 10].

Пошуки конструктивних форм прогонових будов для залізничного та автомобільного транспорту, які б відповідали місцевим умовам, сьогодні є актуальними [2]. Доволі часто вимогами до конструкцій, особливо для швидкісного руху, є збільшена довжина прогонів, більша жорсткість прогонових будов, зменшена будівельна висота та достатньо низький рівень шуму під час використання (шум повинен бути зведений до екологічно вподобаних параметрів).

Мета

Передбачено проаналізувати роботу балок прогонових будов із попереднім напруженням бетону за рахунок попереднього вигину (примусовий будівельний підйом) металеві двотаврової балки, яку потім вирівнюють за допомогою прикладених зовнішніх навантажень. При цьому для практичної зручності вертикальні зовнішні сили замінені на пару горизонтальних сил, що утримують металеву двотаврову балку в деформованому стані, у такому стані балку бетонують (вмуровують у залізобетонну конструкцію). Також необхідно виявити напружено-деформований стан прогонової будови на всіх стадіях виготовлення й роботи конструкції, провести аналіз результатів розрахунку.

Методика

Пропонуємо такий спосіб виготовлення залізничної сталезалізобетонної прогонової будови, армованої двотавровою балкою з попереднім будівельним підйомом: вертикальний лист двотавра розкроюють із верхньою та нижньою кромкою за формою лінії прогину балки під власною вагою. Величина підйому дуги дорівнює величині прогину балки. До цих кромek дуг приварюють верхній та нижній листи двотавра. Попереднє напруження металеві балки перед її бетонуванням виконують вирівнюванням двотавра за допомогою зовнішніх сил.

У роботі досліджено напружений стан сталезалізобетонної балки розрахункової довжини $L_{\text{розн}}=15,8$ м таврового перерізу під залізницю (рис. 2). Металеву балку виготовлено зі сталі 06Г2БД, із розрахунковим опором $R_y=445$ МПа, бетон класу В30.

Наведений переріз бетонної балки наближено до геометричних розмірів типових залізобетонних балок залізничних мостів серії 3.501.1–146. Розміри металевго двотавра взято по можливості розташування двотавра в бетоні, без перевірок розрахунків усієї балки за граничними станами.

Виконано порівняння аналітичних розрахункових величин напружень у бетоні та в металевій балці на всіх стадіях виготовлення прогонової будови з комп'ютерним моделюванням роботи комбінованої сталезалізобетонної конструкції.

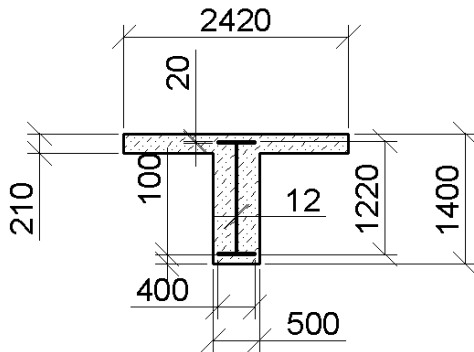


Рис. 2. Переріз сталезалізобетонної балки

Fig. 2. Section of a steel-reinforced concrete beam

Для дослідження використано програмний метод розрахунку – метод скінченних елементів [8, 11]. Об'ємне моделювання виконано в програмі Autodesk AutoCAD (США) (рис. 3, 4), обчислення готової моделі – у програмі ANSYS (США).

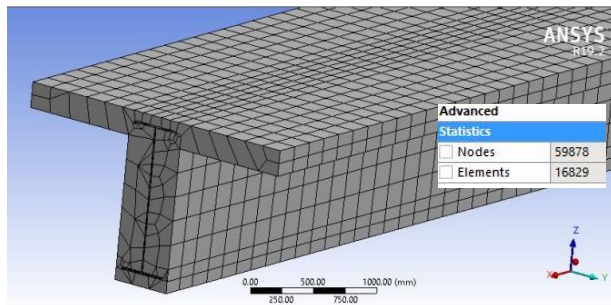


Рис. 3. Модель сталезалізобетонної прогонової будови

Fig. 3. Model of steel-reinforced concrete span structure

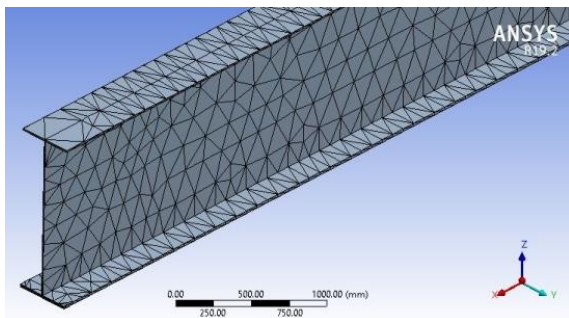


Рис. 4. Розбиття металевого двотавра прогонової будови

Fig. 4. Breakdown of the metal I-beam of the span structure

Послідовність визначення напруженого стану наближена до послідовності виготовлення блока прогонової будови (рис. 5):

- установлення сталевий балки з необхідним будівельним підйомом на опори (навантаження власною вагою металевий балки $g_{\text{ВВМ}}$);
- вигин сталевий балки за допомогою двох зосереджених сил P , що розташовані на відстані $0,4L_{\text{розр}}$ від опорних перерізів (навантаження власною вагою $g_{\text{ВВМ}}$ та силами P);
- заміна зосереджених сил на згинальний момент M (навантаження власною вагою $g_{\text{ВВМ}}$ та моментом M);
- бетонування блока прогонової будови (навантаження власною вагою металевий балки $g_{\text{ВВМ}}$ та власною вагою бетонної частини балки $g_{\text{бет}}$, разом зі згинальним моментом M);
- зняття згинального моменту M ;
- завантаження блока вагою мостового полотна (навантаження власною вагою сталезалізобетонної балки $g_{\text{б}}$ та навантаження $g_{\text{м.п.}}$);
- навантаження прогонової будови тимчасовим навантаженням $g_{\text{в}}$.

Пружність визначає можливість металу пружно деформуватися. Пружна деформація в металі зникає після закінчення дії моменту (пари горизонтальних сил).

Такі властивості притаманні металу, який схильний до впливу поступово доданих або повільно прибралих сил, та характеризують статичні властивості.

Сили, прикладені до сталевий балки, розраховано після досягнення металом напружень, що відповідають $0,8 R_y$ сталі 06Г2БД.

Результати

Розглянемо поетапну роботу залізничної балкової розрізної сталезалізобетонної прогонової будови що армована двотавровою металевий балкою висотою 1 220 мм, з їздою зверху. Поліці верхнього та нижнього пояса металевий балки мають ширину 400 мм і товщину 20 мм, вертикальний лист $\delta=12$ мм.

Перед обчисленням моделі у програмі ANSYS її було розбито на 16 829 гексаедральних скінченних елементів (рис. 3), що забезпечує достатньо високу точність розрахунків.

Вигин металевий балки під час виготовлення було засновано на величині межі плинності сталі $0,8 R_y$ (355 Мпа), він становить 100 мм.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Розміри бетонної частини балки взято відповідно до конструктивних параметрів залізобетонних типових балок.

Попереднє напруження металевої балки створено за допомогою двох вертикальних зосереджених сил по 642 кН, що встановлені на відстані 6,32 м ($0,4L_{\text{розр}}$) від опор.

Для зручності бетонування дію вертикальних сил замінено на дію згинального моменту парою горизонтальних сил. Після бетонування та набору міцності бетону згинальний момент прибирають, що створює зворотний вигин металевої балки та безпосередньо попереднє напруження в бетоні. Далі модель навантажено поетапно власною вагою сталезалізобетонної балки ($g_6=27,0$ кН/м), вагою мостового полотна на баласті ($g_{\text{м.п.}}=28,4$ кН/м) та тимчасовим навантаженням ($g_v=96,23$ кН/м).

На рис. 5 наведено розрахункові схеми та етапи навантаження сталезалізобетонної балки:

1) окреме навантаження металевої двотаврової балки власною вагою (для визначення прогину, який потрібно врахувати під час виготовлення металевого двотавра);

2) навантаження металевої двотаврової балки за допомогою двох вертикальних зосереджених сил по 642 кН, що встановлені на відстані 6,32 м ($0,4L_{\text{розр}}$) від опор;

3) момент, спричинений вертикальними силами P , продубльовано парою горизонтальних сил $N=3429$ кН;

4) навантаження власною вагою сталезалізобетонної балки $g_6=27,0$ кН/м (метал із бетоном) разом із горизонтальними силами N ;

5) зняття згинального моменту M , що давало попереднє напруження металевої балки (відсутні горизонтальні сили N);

6) до власної ваги сталезалізобетонної балки додано вагу мостового полотна $g_{\text{м.п.}}=28,4$ кН/м;

7) до попереднього навантаження додано тимчасове навантаження $g_v=96,23$ кН/м.

Розрахунки всіх етапів навантаження виконано аналітичним способом та за допомогою програмного забезпечення ANSYS методом скінченних елементів.

Для кожного з етапів навантаження визначено напруження у верхній фібрі верхнього пояса та нижній фібрі нижнього поясу металевого двотавру, а також для схем №5, 6 і 7 визначено

напруження в бетоні верхньої та нижньої зон балки.

На рис. 10 наведено результати переміщень моделі методом скінченних елементів, що становить 10,4 мм, із навантаженням власною вагою балки та мостового полотна разом із тимчасовим навантаженням.

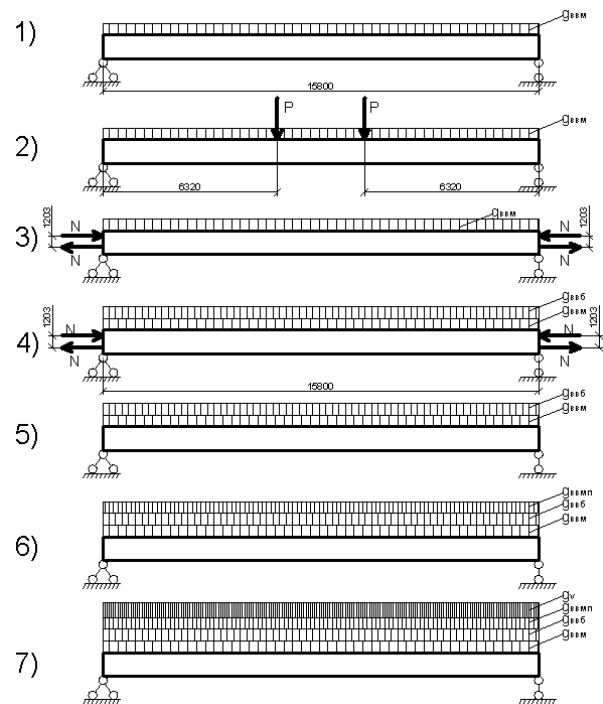


Рис. 5. Розрахункові схеми та етапи навантаження сталезалізобетонної балки

Fig. 5. Calculation schemes and stages of loading a steel-reinforced concrete beam

У табл. 1 наведено результати розрахунків, використаних у програмному комплексі ANSYS, на рис. 6 показано напруження у верхньому поясі середини металевої балки в разі розрахунку моделі методом скінченних елементів, а на рис. 7 – аналогічні напруження нижнього пояса. Епюри напружень і результати розрахунків моделі методом скінченних елементів та аналітичним методом показано на рис. 8 і 9 (у дужках наведено результати аналітичного розрахунку).

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

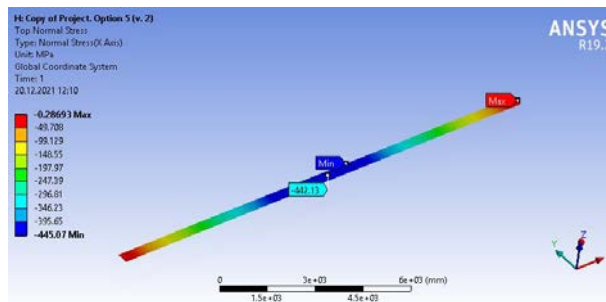


Рис. 6. Напруження верхнього пояса металевго двотавра за навантаження № 3, МПа

Fig. 6. Stress of the upper belt of the metal I-beam when loading no. 3, MPa

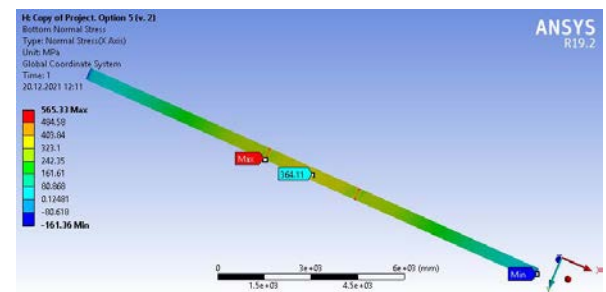


Рис. 7. Напруження нижнього пояса металевго двотавра за навантаження № 3, МПа

Fig. 7. Stress of the lower belt of the metal I-beam when loading no. 3, MPa

Таблиця 1

Результати розрахунків у програмному комплексі ANSYS

Table 1

Results of calculations in the ANSYS software complex

№ навантаження	Напруження в середині балки, МПа				Переміщення, мм
	метал		бетон		
	верх	низ	верх	низ	
1	-5,75	5,54			-1,38
2	-434,4	357,5			-8,45
3	-442,13	364,11			-8,78
4	-445,6	377,32	-2,07	3,36	-7,05
5	-335,5	289,1	7,3	-11,5	-7,4
6	-406,1	308,1	5,4	-8,4	-8,5
7	-442,6	372,9	-1,5	2,6	-10,4

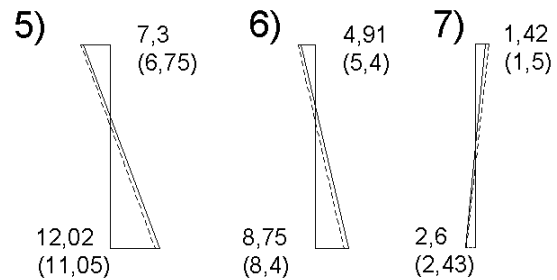


Рис. 8. Напруження в середині балки за бетоном, МПа

Fig. 8. Stress in the middle of the beam on concrete, MPa

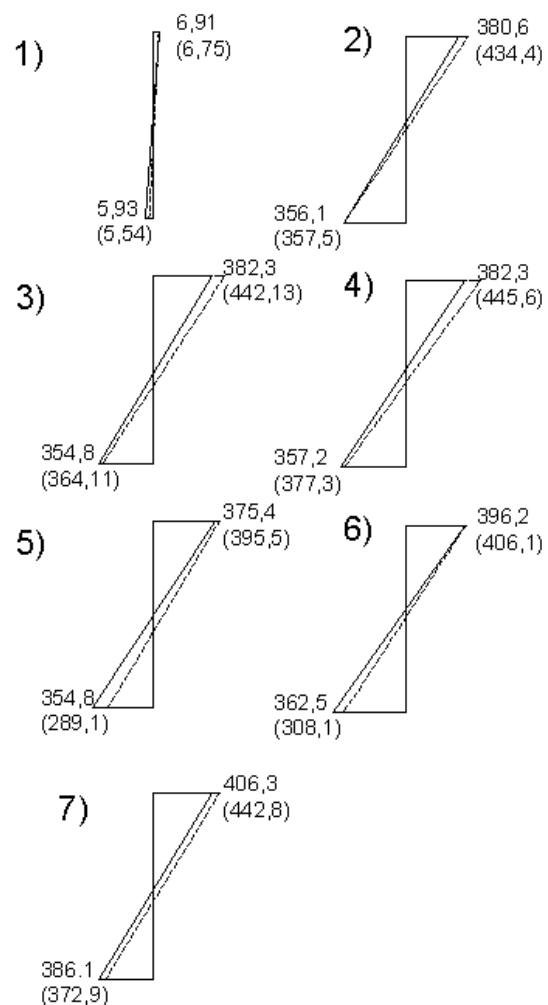


Рис. 9. Напруження у верхній фібрі верхнього пояса та нижній фібрі нижнього пояса в середині металеві балки, МПа

Fig. 9. Stress in the upper fiber of the upper belt and the lower fiber of the lower belt in the middle of the metal beam, MPa

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

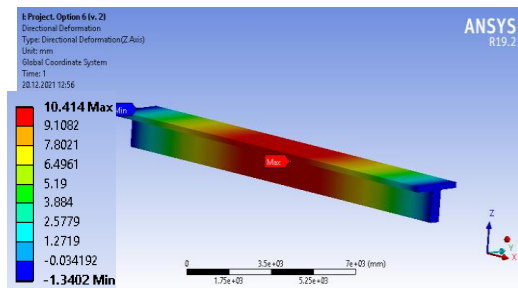


Рис. 10. Переміщення балки під навантаженням № 7, мм

Fig. 10. Movement of the beam under load no. 7, mm

Із діаграм напружень за бетоном, показаних на рис. 8, видно, що напружені стани блока прогонової будови за розрахунковими величинами й напруженнями, отриманим за допомогою методу скінченних елементів, у моделі рівні або близькі. Це свідчить про достатньо високе наближення програмної моделі до реальної конструкції, а отримані результати дають можливість застосувати принцип виготовлення прогонових будов із частковим попереднім напруженням перерізу для забезпечення необхідної міцності й тріщиностійкості.

За напруженнями верхнього й нижнього поясів металевих двотавра (рис. 9) результати мають розбіжність від 0,4 до 18 %, що свідчить про недостатню точність аналітичного методу розрахунку та необхідність більш ретельного підбору перерізу сталевих двотавра (у нашій роботі такого підбору не виконано).

Наукова новизна та практична значимість

У роботі досліджено напружено-деформований стан сталезалізобетонних балок залізничної прогонової будови з урахуванням

попереднього напруження бетону. Запропоновано метод виготовлення сталезалізобетонної балки, що забезпечує попереднє напруження залізобетону за рахунок вигину сталевих двотаврових балок.

У результаті розрахунків виявлено, що конструкція, виготовлена вказаним методом, має більшу жорсткість порівняно із залізобетонними або металевими балками. Висота балки може бути меншою за залізобетонну або металеву прогонову будову. Ці обставини є суттєвими для залізничних мостів, особливо для швидкісного руху.

Висновки

Аналіз результатів показав, що попередній вигин металевих балок можна використовувати для створення попереднього напруження залізобетонної балки, що поліпшує працездатність сталезалізобетонних прогонових будов.

Виготовлення сталезалізобетонних прогонових будов із попереднім вигином сталевих двотаврових балок для попереднього напруження бетону має відповідні переваги перед балковими розрізними залізобетонними та металевими прогоновими будовами, а саме:

- можна виготовляти конструкції довжиною більше ніж 40 м та вагою, яку забезпечують вантажопідйомні механізми;
- можна виготовляти конструкції з найменшою будівельною висотою за рахунок введення нижнього пояса;
- конструкція, виготовлена вказаним методом, має більшу жорсткість, що важливо для швидкісного руху по залізничних мостах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи [Чинний від 2009–11–11]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 83 с.
2. Гернич М. В., Ключник С. В., Співак Д. С. Сталезалізобетонні прогонові будови мостів для постконфліктного відновлення зруйнованої транспортної інфраструктури. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2021. № 19. С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872>
3. Каплін Р. Б. Сучасні сталезалізобетонні прогонові будови мостів малих і середніх прогонів. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2020. № 193. С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229530>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. Коваль П. М., Бабяк І. П., Ковальчик Я. І., Горба М. Б. Збірні залізобетонні попередньо напружені балки для автодорожніх мостів. *Електронний науковий архів Львівської політехніки*. 2013. № 755. С. 184–188.
5. Корнеев М. М. *Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию*. Киев, 2003. 547 с.
6. Риго Г. Сталежелезобетонные пролётные строения с предварительным выгибом стальной балки (Бельгия). *Мостостроение мира*. 2004. № 1–2. С. 50–56.
7. Belentsov Yu. A., Smirnova O. M. Influence of acceptable defects on decrease of reliability level of reinforced concrete structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. Iss. 11. P. 2999–3005.
8. Kliuchnyk S., Ovchynnykov P. Study of Railway Steel Bridges' Behaviour in Order to Identify the Causes of Their Defects. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19. Iss. 3. P. 77–88.
DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.7>
9. Qian J., Zhang H., Yang M., Huang Q., Tian L. Restudy of calculation method of cross-section bending capacity for preflex composite beams | [预弯组合梁截面抗弯承载力计算方法的再研究]. *Harbin Gongye Daxue Xuebao / Journal of Harbin Institute of Technology*. 2022. Vol. 54. Iss. 3. P. 65–73.
DOI: <https://doi.org/10.11918/202101124>
10. Veselov V. Application of Steel-Concrete Beam Structures in Transport Construction. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 402 LNNS. P. 269–277. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_30
11. Yao G., Xiong X. Quantitative study of deformation-based performance index for prestressed steel reinforced concrete flexural beams | [预应力型钢混凝土受弯梁的变形性能指标量化研究]. *Jianzhu Jiegou Xuebao / Journal of Building Structures*. 2022. Vol. 43. Iss. 6. P. 284–293.
DOI: <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0784>

M. M. POPOVYCH¹, S. V. KLIUCHNYK^{2*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (0562) 33 58 12, e-mail popovich.n.m@ukr.net, ORCID 0000-0003-1790-3110

^{2*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (0562) 33 58 12, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

Features of the Stressed-Strain State of a Steel-Reinforced-Concrete Span Structure with Preliminary Bending of a Steel Beam

Purpose. The authors aim to determine the features of the operation of a steel-reinforced concrete span structure with beams reinforced with an I-beam, with their pre-stressing using the bending of a steel I-beam. **Methodology.** To manufacture a steel-reinforced concrete span structure, it was proposed to reinforce an I-beam with a camber, which is then leveled with the help of applied external loads. For practical convenience, the vertical external forces are replaced by horizontal forces that keep the metal I-beam in a deformed state and in this state it is concreted. After the concrete strength development, the external forces are removed and the metal I-beam creates the pre-stressing of the concrete. **Findings.** When determining stresses, checking calculations by analytical method and the method of modeling with the help of the ANSYS program were used. The stress diagrams along the lower and upper fibers of a metal I-beam and stresses in concrete in the upper and lower zones of the beam were constructed. The analysis of the results showed that the pre-bending of a metal beam can be used to create a pre-stressing, which improves the performance of steel-reinforced concrete span structures, increases their rigidity and allows using of such a structure to increase the balks of railway and highway bridges. **Originality.** In the paper, a study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams of the railway span structure was carried out, taking into account the pre-stressing of the concrete. A method of manufacturing a steel-reinforced concrete beams is proposed, which provides pre-stressing of the reinforced concrete due to the bending of a steel I-beam. **Practical value.** As a result of the calculations, it was found that the structure, when manufactured by the specified method, has greater rigidity compared to reinforced concrete or metal beams. The height of the beam can be lower compared to reinforced concrete or metal span structures. These circumstances are essential for railway bridges, especially for high-speed traffic ones.

Keywords: steel-reinforced-concrete span structure; camber; metal beam; stress diagram; stressed-strain state; combined model

REFERENCES

1. *Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy, 83 DBN V.1.2-15:2009*. (2009). (in Ukrainian)
2. Hernich, M., Klutchnik, S., Spivak, D. (2021). Composite reinforced concrete bridge girders for post-conflict reconstruction of the destroyed transport infrastructure. *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 19, 28-37. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/233872> (in Ukrainian)
3. Kaplin, R. (2020). Modern steel-concrete span structures of small and medium-span bridges. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 193, 25-34. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.193.2020.229530> (in Ukrainian)
4. Koval, P. M., Babiak, I. P., Kovalchuk, Ya. I., & Horba, M. B. (2013). Zbirni zalizobetonni poperedno napruzeni balky dlia avtodorozhnikh mostiv. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*, 755, 184-188. (in Ukrainian)
5. Korneev, M. M. (2003). *Stalnye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu*. Kiev. (in Russian)
6. Rigo, G. (2004). Stalezhelezobetonnye proletnye stroeniya s predvaritelnyim vygibom stalnoy balki (Belgiya). *Mostostroenie mira*, 1-2, 50-56. (in Russian)
7. Belentsov, Yu. A., & Smirnova, O. M. (2018). Influence of acceptable defects on decrease of reliability level of reinforced concrete structures. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(11), 2999-3005. (in English)
8. Kliuchnyk, S., & Ovchynnykov, P. (2022). Study of Railway Steel Bridges' Behaviour in Order to Identify the Causes of Their Defects. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(3), 77-88. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.19.3.2022.3.7> (in English)
9. Qian, J., Zhang, H., Yang, M., Huang, Q., & Tian, L. (2022). Restudy of calculation method of cross-section bending capacity for preflex composite beams | [预弯组合梁截面抗弯承载力计算方法的再研究]. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/Journal of Harbin Institute of Technology*, 54(3), 65-73. DOI: <https://doi.org/10.11918/202101124> (in English)
10. Veselov, V. (2022). Application of Steel-Concrete Beam Structures in Transport Construction. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 402 LNNS, pp. 269-277). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_30 (in English)
11. Yao, G., & Xiong, X. (2022). Quantitative study of deformation-based performance index for prestressed steel reinforced concrete flexural beams | [预应力型钢混凝土受弯梁的变形性能指标量化研究]. *Jianzhu Jieyou Xuebao/Journal of Building Structures*, 43(6), 284-293. DOI: <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0784> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.11.2021

Прийнята до друку: 14.03.2022

ЗМІСТ

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. Н. СЕРДЮК, О. Б. ОЧКАСОВ

Розробка напівпровідникового реле часу
для локомотивів 5

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**С. В. АРПУЛЬ, А. М. АФАНАСОВ, Д. С. БІЛУХІН,
В. Є. ВАСИЛЬЄВ, О. С. ШАПОВАЛОВ, С. Ю. БУРЯК**

Визначення раціонального режиму взаємного
навантаження тягових двигунів магістральних
електровозів 13

**А. М. МУХА, С. В. ПЛАКСІН, Л. М. ПОГОРІЛА,
Д. В. УСТИМЕНКО, Ю. В. ШКІЛЬ**

Комбінована система синхронізованого керування рухом
і підвісом магнітоплана 23

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Л. І. ЖУЧИЙ

Онтологічна підтримка узгодження та інтеграції даних
інформаційних систем АТ «Укрзалізниця» 32

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**А. М. АФАНАСОВ, С. В. АРПУЛЬ,
В. Є. ВАСИЛЬЄВ, О. О. ГОЛОЛОВОБА,
С. М. ГОЛІК**

Автоматизовані системи керування взаємним
навантаженням тягових електромашин 50

**С. В. МЯМЛІН, Л. А. МУРАДЯН, О. А. ШИКУНОВ,
І. В. ПІЩЕНКО**

Вплив технічного обслуговування й ремонту буксових
вузлів на ризики їх відмов 59

**О. В. ФОМІН, А. О. ЛОВСЬКА, А. М. ФОМІНА,
С. С. СОВА**

Дослідження навантаження несучої конструкції
вагона-хопера з дахом із композитного матеріалу 71

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

М. М. ПОПОВИЧ, С. В. КЛЮЧНИК

Особливості напружено-деформованого стану
сталезалізобетонної прогонової будови з попереднім
вигином сталевих балки 80

CONTENTS

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. N. SERDIUK, O. B. OCHKASOV

Development of a Semiconductor Time Relay
for Locomotives 5

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

**S. V. ARPUL, A. M. AFANASOV, D. S. BILUKHIN,
V. Y. VASYLIEV, O. S. SHAPOVALOV, S. Y. BURIAK**

Determination of the Rational Mode of Mutual Loading
of Traction Engines of Main Electric Locomotives 13

**A. M. MUKHA, S. V. PLAKSIN, L. M. POHORILA,
D. V. USTYMENKO, Y. V. SHKIL**

Combined System of Synchronized Simultaneous Control
of Magnetic Plane Movement and Suspension 23

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

L. I. ZHUCHYI

Ontological Support for Harmonization and Integration
of Ukrzaliznytsia Information Systems Data 32

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

**A. M. AFANASOV, S. V. ARPUL, V. Y. VASYLIEV,
O. O. HOLOLOBOVA, S. M. HOLIK**

Automated Control Systems for Mutual Loads of Traction
Electric Machines 50

**S. V. MYAMLIN, L. A. MURADIAN,
O. A. SHYKUNOV, I. V. PITSENKO**

Influence of Maintenance and Repair of Axle Boxes
on the Risks of Their Failure 59

**O. V. FOMIN, A. O. LOVSKA, A. M. FOMINA,
S. S. SOVA**

Loading Research of Load-Bearing Structure of Hopper Car
with Composite Roof 71

TRANSPORT CONSTRUCTION

M. M. POPOVYCH, S. V. KLIUCHNYK

Features of the Stressed-Strain State of a Steel-Reinforced-
Concrete Span Structure with Preliminary Bending of a Steel
Beam 80

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.

№ 1 (97) 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. 10,70. Тираж 100 пр. Зам. №02/01

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. 1 (97) 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 10,70. 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

